

Capítulo 29

CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PROPRIEDADES E COMPORTAMENTOS DOS SOLOS NÃO SATURADOS

José Camapum de Carvalho

Gilson de F. N. Gitirana Jr.

Sandro Lemos Machado

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

Francisco Chagas da Silva Filho

Roger Augusto Rodrigues

1. INTRODUÇÃO

Apresentam-se, neste capítulo, algumas questões sobre as propriedades e os comportamentos dos solos não saturados. Muitas delas, certamente, são tratadas ao longo dos capítulos que compõem o livro; outras, são abordadas em perspectivas distintas das aqui expostas.

Inicialmente, serão discutidas peculiaridades sobre as propriedades e os comportamentos dos solos, em especial, dos solos não saturados, para, em seguida, contextualizá-las em diferentes situações nas obras geotécnicas.

Não é objetivo deste capítulo estabelecer verdades, mas apontar importantes incógnitas a serem consideradas na construção do entendimento das propriedades e dos comportamentos dos solos não saturados. Não se pretende semear dúvidas, mas sim colocar os benefícios da reflexão quando se está a estudar tema ainda pouco conhecido e, que em muitos aspectos, não se distancia dos solos saturados, tópico um pouco mais conhecido.

As discussões aqui apresentadas possuem cunho mais filosófico que técnico, pois o técnico, mesmo que essencialmente prático, termina encontrando fundamento na filosofia, no refletir a partir da dúvida, para, só então, alcançar um *status* de verdade, ainda que efêmera.

2. QUESTÕES SOBRE PROPRIEDADES DOS SOLOS NÃO SATURADOS

A primeira grande pergunta, em se tratando de solos não saturados, seria quais propriedades seriam relevantes para o seu estudo e entendimento: propriedades físicas, químicas, mineralógicas, moleculares, atômicas, etc.?

A mineralogia constitui-se, provavelmente, o principal fator controlador do tamanho, da forma e das propriedades físicas e químicas das partículas do solo, intervindo diretamente em seu comportamento hidromecânico. Cabe, no entanto, entender que ela advém da estrutura química formada e esta da natureza dos elementos químicos, cujo entendimento completo é desafiador. Esses elementos químicos possuem constituição e natureza próprias. Alguns minerais têm particular relevância para o entendimento do comportamento hidromecânico dos solos na condição saturada e não saturada, pela frequência com que estão presentes e pela influência que exercem sobre esse comportamento, mesmo não sendo, muitas vezes, os minerais predominantes na composição do solo.

Em perfis de solos tropicais, como grande parte dos solos brasileiros, a questão mineralógica assume ainda maior importância devido à sua diversidade ao longo desses perfis, a qual influi diretamente nas propriedades físico-químicas e no comportamento hidromecânico do solo. Partindo da rocha composta por minerais primários geralmente menos ativos, a ação intempérica leva à formação dos saprólitos e, em seguida, dos solos saprolíticos ricos, em especial, em minerais primários e já contendo minerais secundários, como a illita e a montmorilonita, mas não necessariamente os dois ou qualquer deles. Na continuidade da ação intempérica, surge uma zona de transição na qual se fazem presentes minerais secundários como os citados e outros neoformados, como a caulinita e a haloisita. Prosseguindo na intemperização do perfil de solo a partir da rocha, surgem os solos profundamente intemperizados, ricos em minerais, como caulinita e haloisita, e em oxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Minerais primários resistentes ao intemperismo, como o quartzo, podem se mostrar presentes ao longo de todo o perfil, cabendo destacar que o quartzo, geralmente entendido como um mineral apenas primário, pode ser neoformado (Senaha, 2019).

Ainda sobre a importância da composição mineralógica dos solos, no caso dos solos profundamente intemperizados contendo agregados, embora ela seja relevante para a formação dos próprios agregados, dada a situação de bloqueio posicional das partículas que integram o volume agregado, ela tem, quando considerada em sua totalidade, importância reduzida. A Figura 23a, mostrada no Capítulo 28 deste livro (Gheling *et al.*, 2022), ilustra a situação de presença de um pacote de argila no interior de um agregado laterítico que, embora possa ser relevante para a concreção em si, não interfere no comportamento hidromecânico do solo que a possui, tornando relativa a composição mineralógica em situações similares. Cabe salientar que essas agregações são passíveis de serem destruídas. Dada a relevância da composição mineralógica dos solos para as suas propriedades e comportamento, fica aqui, diante da situação posta, a questão: qual composição mineralógica do solo considerar, por exemplo, no estudo da estabilização química de um solo ou na análise da forma de uma curva característica de retenção de água?

Portanto, surgem as questões: como considerar essa dinâmica mineralógica no estudo de outras propriedades, como estrutura, distribuição granulométrica, forma da curva característica de retenção de água e no próprio comportamento hidromecânico? Em qual horizonte de tempo e sob quais condições ambientais essa dinâmica mineralógica pode ser considerada como algo estático, uma propriedade intrínseca do solo?

A química, por sua vez, interfere diretamente nas propriedades dos minerais e no caso dos argilominerais a eles confere por meio de trocas iônicas, propriedades e comportamento que se alteram em consequência dessas trocas (Grim, 1962). Logo, diante de cons-

tantes alterações ambientais, como avaliar as possibilidades dessas trocas e seus impactos em questões de engenharia como a capacidade de carga das fundações e a estabilidade de encostas? Qual seria a dinâmica da curva característica de retenção de água e do próprio comportamento hidromecânico em consequência de tais alterações? Como considerar essas questões no âmbito dos estudos sobre os solos não saturados? Como interferirão as alterações da sucção osmótica com a mudança da química do meio nas propriedades e comportamento dos solos?

Indo agora para as propriedades físicas, aparentemente as mais simples das propriedades, pode-se colocar a questão inicial: como se formam e se transformam as estruturas dos solos ao longo do tempo, mesmo quando compactados? Geralmente, elas são consideradas como estáticas ao longo do tempo, mas não deixam de passar por transformações mais ou menos severas em função dos ciclos de energias atuantes, tais como: ciclos de energia natural como insolação e vento e ciclo de energia artificial, como os carregamentos repetitivos nas estruturas de pavimento. Em ambos os exemplos, a porosidade do solo tende a ser alterada com o tempo e há possibilidade de migração de compostos químicos devido ao fluxo em meio saturado e não saturado, como mostrou Lima (2003) ao estudar erosões do Distrito Federal. Mas qual o impacto dessas e de outras modificações estruturais na curva características de retenção de água e no comportamento hidromecânico dos solos? A partir de qual momento ou situação eles seriam relevantes? Ainda sobre as propriedades físicas, como as quebras de agregados e microagregados durante um processo de compactação ou mesmo durante a vida útil de uma construção impactam na curva característica de retenção de água e no comportamento hidromecânico do solo? E quais seriam as implicações das expansões estruturais e/ou mineralógicas que ocorrem em cortes atingindo solos pouco intemperizados, para as propriedades e comportamento dos solos não saturados? Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) mostram a importância de se considerar a estrutura e mineralogia dos solos quando se estudam as propriedades e os comportamentos dos solos.

Observa-se, deste item, que a percepção atual considerando o solo de modo estático no tempo e no espaço conduz a muitas interrogações. Logo, mesmo análises aparentemente contraditórias que podem ter sobressaído ao longo deste livro, certamente, são oriundas de enfoques distintos dessa dinâmica temporal e da influência espacial e merecem maior reflexão rumo ao avanço do conhecimento sobre as propriedades e comportamento dos solos não saturados.

3. QUESTÕES SOBRE A CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Para início das discussões, coloca-se a questão: qual o nome apropriado, curva característica? Curva característica de retenção de água? Curva característica solo-água ou ainda uma outra? A questão parece irrelevante, mas encontrar uma convergência, sem a pretensão de que o título proposto seja o mais apropriado, pode ser algo positivo, pois contribuirá para a uniformização da linguagem.

Geralmente, determina-se a curva característica de retenção de água para um determinado estado físico, químico e mineralógico do solo, mas ao longo do tempo ou mesmo espacialmente algumas, e, muitas vezes, todas essas propriedades não passariam por alterações que afetariam a própria curva característica de retenção de água? Lima (2003), ao

estudar perfis de solo próximos a ravinas e voçorocas do Distrito Federal, verificou que sim, como ilustra a Figura 1, obtida para amostras indeformadas coletadas em poços realizados a 3 m (Poço “1”) e a 20 m (Poço “2”) da face do talude da erosão por ela intitulada Ceilândia 2. Logo, é importante que, ao se determinar uma curva característica de um solo, reflita-se sobre sua representatividade espacial e ao longo do tempo.

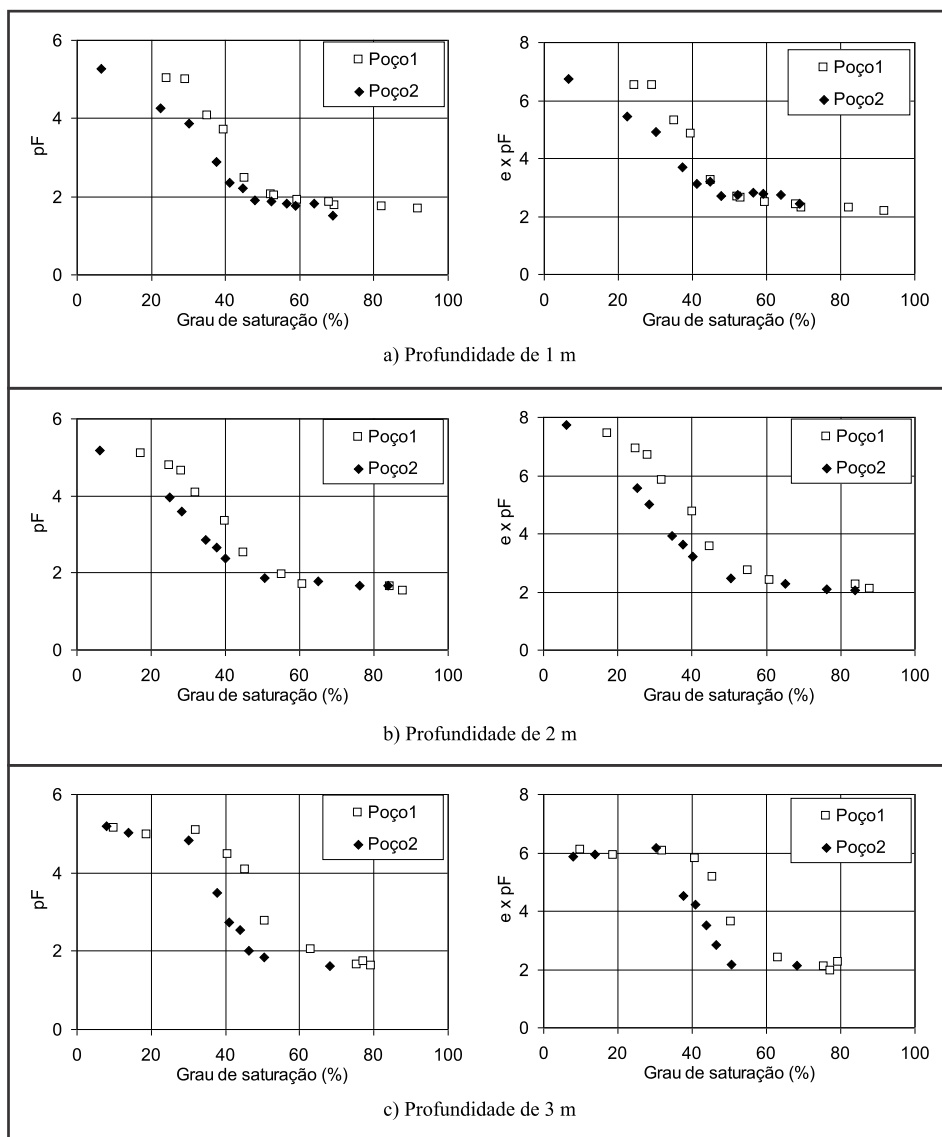


Figura 1 – Curvas características obtidas para três profundidades localizadas a 3m e 20m de um talude de erosão

Verifica-se, na Figura 1, que as curvas de $e.pF$ (pF é o logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água) em função do grau de saturação (S_r) não convergem para uma curva única conforme proposto por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004), o que indica que o índice de vazios não é o único elemento alterando a curva característica, concluindo-se que ocorre mudança nas propriedades do solo com o fluxo em direção ao talude no perfil de solo localizado a 3m de distância do talude da voçoroca. A mudança não só na curva característica como nas propriedades que a motivaram em consequência das novas condições de drenagem impostas ao maciço pela ocorrência da erosão aponta para a necessidade de se considerar, em casos similares, a dinâmica temporal e espacial da curva característica.

Muitas vezes, a diferença verificada entre curvas características determinadas para as trajetórias de umedecimento e de secagem podem levar a essa percepção da influência da temporalidade nas propriedades e no comportamento dos solos não saturados. Dentre outros, a diferença verificada pode ser devido a modificações estruturais ou a fenômenos temporais, pois as variações de sucção podem levar à compressão ou expansão do solo segundo a trajetória seguida seja, respectivamente, de secagem ou de umedecimento, que só se estabilizam com o passar do tempo, por vezes, muito tempo. É certo que, nas determinações da sucção com base em pesagens, como na técnica do papel filtro, a sua estabilização é quase sempre devida à limitação na precisão da balança, pois, assim como na consolidação secundária, as deformações de contração e expansão tendem a ocorrer em uma taxa que decresce ao longo do tempo.

Ainda no que se refere às curvas características de retenção de água, dado o uso indistinto que se faz na literatura e no meio técnico dos termos capilaridade e sucção, cabem as perguntas: são eles termos sinônimos? Distingui-los seria mero preciosismo? Na opinião dos autores, as respostas às duas questões postas é não, muito embora, em muitos solos, os dois fenômenos se façam concomitantemente presentes. Então, por que distingui-los? Primeiro, faz-se necessário conceituá-los para indicar por que distingui-los. A capilaridade é um fenômeno de natureza marcadamente física, sendo ditada pela dimensão dos poros e influenciada por suas geometrias, aspectos que definem a forma do menisco, o seu raio de curvatura. Cabe destacar que a expressão “marcadamente física” não significa “tão somente física”, visto que, do ponto de vista químico-mineralógico, é evidente que a natureza do mineral e as características do fluido exercem influência no fenômeno capilar. A sucção, por sua vez, engloba os fenômenos físicos da capilaridade e outros fenômenos, de natureza predominantemente eletroquímica, devido às forças de adsorção do mineral que dependem, predominantemente, da mineralogia do solo e da química do fluido, com destaque para a sua polaridade e/ou constante dielétrica, embora sofra influência da porosidade. Portanto, os fatores intervenientes na capilaridade e na sucção são os mesmos, mas a forma e o grau de intervenção nas propriedades e no comportamento hidromecânico dos solos não saturados são, em grande parte dos casos, distintos.

Assim, por exemplo, qual seria a forma como o fenômeno capilar e a sucção intervêm na resistência dos solos não saturados? Seria na coesão? Seria na tensão normal, ampliando a força de atrito interpartículas? Sendo a capilaridade um fenômeno mais físico, sua maior contribuição, provavelmente, dá-se alterando a tensão normal entre os grãos, o que modifica a força de atrito, mas que não deixa de contribuir para o surgimento de certa

coesão, mesmo que pequena, por intervenção da orientação molecular da água ao longo da intitulada membrana contrátil formada na interação água-ar. Isso sem se adentrar amiúde na célebre teoria adesiva do atrito de Terzaghi. Tratando-se, porém, de sucção, como o fenômeno depende, em maior escala, da energia de adsorção dos minerais, dependendo das proporções entre a energia capilar e a energia de adsorção, sua contribuição será predominantemente para a coesão, embora a junção da zona de hidratação de dois minerais vizinhos termine gerando certo efeito capilar, com as discutidas intervenções no comportamento, lembrando que entre partículas de argila o contato se dá, salvo raras exceções, por meio da água.

A análise de várias questões de ordem prática e de fundamentos mostra que entender os fenômenos definidores das propriedades e do comportamento dos solos não saturados é de suma importância, embora seja o entendimento fenomenológico, muitas vezes, para não dizer quase sempre, relegado a um segundo plano. A título de exemplo, a literatura, incluindo monografias, dissertações e teses, reporta, com certa frequência, o aumento do ângulo de atrito dos solos tropicais com o aumento da sucção. Isso se dá, em especial, nos solos profundamente intemperizados contendo agregados e microagregados, mas pode ocorrer, também, nos solos menos intemperizados contendo pacotes de argila e torrões formados na fase de preparação de amostras, preparação que, muitas vezes, leva à completa descaracterização do que é realmente o solo. Essa percepção é ampliada quando se usa o ensaio de cisalhamento direto. Camapum de Carvalho e Gitirana (2005) mostraram, por meio de experimentos usando esferas de vidro, que, no caso do ensaio de cisalhamento direto, o aumento se dá porque os agregados e microagregados, ao ganharem resistência com o aumento da sucção/capilaridade, fazem com que a superfície de ruptura contorne tais agregados aumentando, assim, a área cisalhada e, por consequência, a força cisalhante que, ao ser dividida por um área considerada constante, termina por ampliar a resistência ao cisalhamento e o ângulo de atrito calculado. Tem-se, então, o entendimento do fenômeno e faz-se, agora, necessária melhor avaliação de seu impacto sobre problemas práticos envolvendo os solos não saturados.

Realçando-se a importância da interação fluido-mineral e, por consequência, da composição do mineral e do fluido, Grim (1962) apresenta resultados oriundos de Samuels (1950), mostrando o impacto dos cátions trocáveis na resistência ao cisalhamento de uma bentonita e de uma caulinita, sendo ela importante na bentonita e pequeno na caulinita. Em termos de ângulo de atrito, a bentonita apresentou significativa variação em função dos cátions trocáveis, tendo sido desprezível para a caulinita, invertendo-se esse comportamento em relação à coesão. Como provavelmente os resultados foram obtidos para o solo saturado, mas mesmo que tenham sido obtidos para os solos em estado não saturado, fica aqui a pergunta: seria ou não relevante o impacto da sucção osmótica e de suas variações no comportamento hidromecânico dos solos, em especial daqueles que estão sendo submetidos a alterações químicas do meio por meio de estabilizações químicas e infiltração de águas contaminadas?

Outro aspecto que chama a atenção para a necessidade de se entender os fenômenos envolvendo as propriedades e comportamento dos solos não saturados diz respeito à relação entre a distribuição de poros e a forma da curva característica de retenção de água. Dessa relação, advêm as propostas de obtenção da curva característica de retenção

de água a partir da curva granulométrica ou a partir da distribuição de poros, sendo que, nesse último caso, também existe a proposta de obtenção da distribuição de poros a partir da curva característica de retenção de água (Mascarenha, 2008), mas quais fenômenos estariam envolvidos nesses mecanismos de inter-relação?

Gitirana Jr. *et al.* (2006) mostram que a curva característica de retenção de água dos solos profundamente intemperizados pode ser estimada a partir das curvas granulométricas se considerada, na definição da zona de microporos da curva característica, a granulometria com defloculante e para a zona de macroporos a granulometria sem defloculante, mas por que tal compartimentação? Qual a explicação? Que fenômenos estariam envolvidos? Hoje, já com outro olhar, certamente, os autores daquele trabalho e que a esse, em parte, subscrevem em coautoria com outros colegas, arriscariam apresentar a seguinte percepção fenomenológica: em nível de microporos, está agindo a sucção, ou seja, a energia de adsorção das partículas de argila, daí ser importante o conhecimento das dimensões dos grãos de forma individualizada, enquanto, em nível de macroporos, a atuação da energia oriunda da interação água-solo tem natureza capilar, pois se dá entre os agregados, fazendo-se necessário conhecer o solo nesse estado, ou seja, a granulometria do solo em estado agregado. Nos macroporos, só a interação mineral-água dos minerais presentes na superfície dos agregados ou presentes de forma independente no solo vão contribuir para a sucção matricial. Assim, isso tem implicações de ordem prática sobre o comportamento mecânico, pois, se o fenômeno é de origem capilar, ele interfere nas tensões normais interpartículas e, se tem sede na sucção sua interferência tende a se dar de modo predominante na coesão. Provavelmente, aqui estariam, dependendo da natureza químico-mineralógica dos agregados, envolvidos os aspectos capilaridade e sucção, mas essa é uma questão que fica para a reflexão do leitor.

Essa breve exposição aponta para a relevância de se conhecer e distinguir os fenômenos capilares e de sucção em geral, pois enquanto, na capilaridade, o arranjo físico das partículas define o comportamento do solo para uma determinada umidade, na atuação da sucção, o comportamento pode ser modificado a partir de intervenções de natureza química, devendo ficar claro que, se a química altera a característica física, ela vai, também, de modo marcante, intervir no fenômeno capilar.

Considerando-se, agora, a forma da curva característica de retenção de água, um primeiro ponto a considerar é o relativo à escala e unidade utilizada, pois, muitas vezes, não se consideram os seus efeitos na interpretação dos resultados. Por exemplo, o ideal é trabalhar com a sucção em função da umidade gravimétrica ou do grau de saturação sem falar de outros índices físicos como a umidade volumétrica? Depende da interpretação que se pretende dar aos resultados, pois, por exemplo, a umidade gravimétrica representa apenas o potencial de retenção de água pelos minerais, mesmo que por intervenção do fenômeno capilar; já o grau de saturação ou a umidade volumétrica envolve, também, a porosidade por meio do índice de vazios no primeiro caso e o volume total, incluindo o volume de vazios, no segundo.

Outras questões sobre a forma da curva características são relevantes, pois permitem, a partir de suas observações, retirar informações sobre as propriedades e comportamento dos solos. Por exemplo, teria alguma relevância prática a maior ou menor inclinação do trecho inicial da curva característica traçada em função do grau de saturação,

trecho entre a pressão nula e a pressão correspondente a entrada de ar no solo? A própria pressão de entrada de ar estabeleceria uma fronteira de comportamento mecânico para os solos? É possível, em ambos os casos, perceber que sim. A inclinação do trecho inicial da curva apontada no primeiro caso se refere às variações volumétricas ocorridas no solo, seja de expansão, no caso da trajetória de umedecimento, seja de contração na trajetória de secagem, variações volumétricas que não são, normalmente, consideradas no traçado da curva característica de retenção de água. No segundo caso, a energia predominantemente capilar que surge na superfície do corpo como um todo se distribui sobre ele, mas atuando apenas na superfície, o que confere menor impacto sobre o comportamento do solo. A Figura 2a, obtida a partir dos resultados mostrados por Machado e Vilar (1998) e apresentada por Camapum de Carvalho e Pereira (2001), mostra, se considerado um índice de vazios igual a 1, que a coesão dos solos analisados tende para zero para um valor de sucção maior que zero, ou seja, isso só seria possível se a sucção atuasse só na superfície do corpo de prova e seu efeito fosse distribuído nele como um todo e se o solo fosse desprovido de coesão, porém, a Figura 2b mostra que, à exceção da profundidade de 2 m, o solo possui certa coesão efetiva (c').

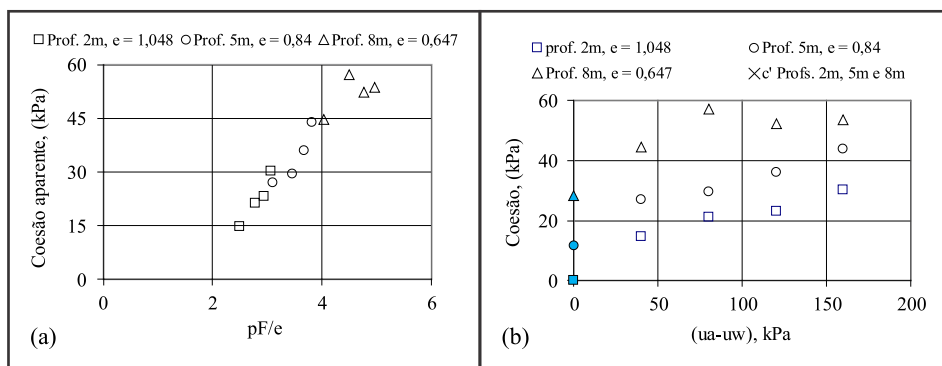


Figura 2 – Coesão em função de pF/e (a) e de $(u_a - u_w)$ (b) (modificado de Machado e Vilar, 1998)

Várias outras questões podem ser colocadas sobre a relação existente entre a forma da curva característica de retenção de água e as propriedades e comportamento dos solos. Por exemplo, qual sua relação com as características de expansividade mineralógica do solo (Campos *et al.*, 2008)? Qual sua relação com a distribuição de poros no solo e, por consequência, com o comportamento do solo, já que este depende diretamente da distribuição de poros (Camapum de Carvalho e Pereira, 2002)? Qual sua relação com a forma da curva de compactação do solo?

Enfim, várias outras questões relevantes poderiam ser formuladas e encontrarem resposta na forma da curva característica, mas ficam aqui duas últimas questões para reflexão: a) do ponto de vista prático, aplicado, qual trajetória seguir na determinação da curva característica de retenção de água, a de molhagem, a de secagem ou a mista? A chave da resposta encontra-se na palavra “depende”, então, convidamos o leitor a refletir sobre

as situações em que cada uma delas se aplica; b) com os atuais níveis de contaminação do ar, da água, inclusive a da chuva, e do solo, não seria relevante ampliar os estudos sobre a influência da sucção osmótica e de suas alterações nas propriedades e no comportamento dos solos não saturados e mesmo dos solos saturados?

4. QUESTÕES SOBRE O COMPORTAMENTO DOS SOLOS NÃO SATURADOS

O comportamento dos solos não saturados está diretamente ligado ao estado hídrico e de porosidade em que ele se encontra. É evidente que outros fatores, como a química do meio, a temperatura e o nível de tensão atuante, interferem no comportamento. Contudo, atendo-se aos fatores umidade e porosidade e considerando-se os demais como constantes, é possível ser colocada uma primeira questão de cunho geral: que limites e condições impor aos estudos realizados em laboratório para que os resultados obtidos se apliquem em um projeto e na execução da obra sem restrições? Essa é uma questão que, apesar de simples, requer reflexão, pois, em uma obra, por exemplo, um projeto de fundação em estacas hélice contínuas ou a construção de um aterro ou ainda a execução de um corte, podem ser acarretadas variações significativas de umidade e mesmo de porosidade em zonas de interesse até que se estabeleçam as condições de equilíbrio de umidade e de porosidade, as quais podem ser distintas das estudadas em laboratório. Considerando-se ainda o mesmo exemplo, qual o papel da sucção atuante no solo quando da execução de uma estaca hélice contínua, tendo em vista que tal sucção captará para o solo compostos químicos presentes no concreto, podendo afetar sua estabilidade textural e estrutural (Ayala, 2020; Wanderley Neto, 2020)?

Particularizando-se para o caso dos solos compactados, sabe-se que as condições fixadas para a realização de uma determinada obra compreendem um grau de compactação mínimo e uma faixa de umidade, gerando, assim, mais de uma condição de sucção para o solo compactado. Com o passar do tempo, dependendo da situação, a obra passará não só durante a construção como durante a sua vida útil por modificações de porosidade, umidade e sucção. Esse conjunto de variações de umidade e porosidade e, por consequência, de sucção, amplia indiscutivelmente o volume de estudos experimentais a serem realizados em laboratório para que se conheça, de modo amplo, o comportamento do solo. Essa ampliação no volume de estudos requer tempo e recursos financeiros, apontando para a necessidade de formulação de hipóteses simplificadoras e de concepção de métodos de estudo e análise que permitam a otimização dos dois fatores mencionados anteriormente. Nesse ponto, embora não seja objetivo deste capítulo tratar amiúde desse tema, é válido que sejam indicadas técnicas simplificadoras que podem ser usadas em estudos preliminares e nos casos em que não se disponha de recursos para estudos mais detalhados.

Existem, na literatura, algumas proposições nesse sentido. Por exemplo, Vilar e Rodrigues (2007) apresentam “métodos expeditos para previsão de resistência de solos não saturados e identificação de solos colapsíveis”.

Para a previsão da resistência, Vilar e Rodrigues (2007) fazem uso de uma função hiperbólica cujos parâmetros são obtidos a partir da resistência efetiva do solo saturado e da resistência do solo seco ao ar. Segundo os autores, pode-se usar, ainda, na formulação, em lugar da resistência do solo seco ao ar, a resistência do solo com certa umidade, des-

de que a sucção nele atuante seja superior à máxima atuante no problema sob análise. Em ambos os casos, os autores reportam ter encontrado boa concordância entre os resultados estimados a partir desse método e resultados obtidos experimentalmente.

Nos ajustes, Vilar e Rodrigues (2007) utilizaram a Equação (1), na qual c' é a coesão efetiva determinada a partir do solo saturado, a e b são parâmetros de ajuste e $(u_a - u_w)$ é a sucção matricial atuante no solo.

$$c = c' + \frac{(u_a - u_w)}{a + b(u_a - u_w)} \quad (\text{Eq. 1})$$

Buscando manter o caráter simples da proposta, os autores consideram que a taxa de ganho de resistência com a sucção para valores de sucção que tendem a zero é função da tangente de ϕ' (Equação 2).

$$a = \frac{1}{\tan \phi'} \quad (\text{Eq. 2})$$

Para a determinação de b , os autores recorrem ao fato de que o aumento da resistência com a sucção se dá até um determinado limite a partir do qual a resistência tende a se estabilizar, tendo-se, então, uma associação entre a resistência máxima e a umidade residual presente no solo. Em outras palavras, é considerado que, quando a sucção tende para infinito, a resistência tende para um valor máximo, que os autores intitulam c_r . Essa tendência foi mostrada por vários autores e é ilustrada na Figura 3, na qual são mostrados resultados oriundos de diferentes tipos de ensaios realizados em um mesmo solo, sendo as sucções estimadas a partir de curvas características de retenção de água (Camapum de Carvalho, 1985). Segundo propõem Vilar e Rodrigues (2007), b pode, com base no exposto, ser obtido a partir da Equação 3.

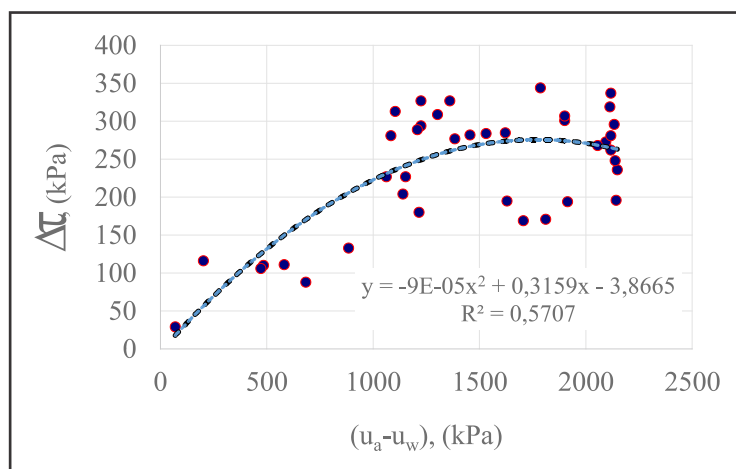


Figura 3 – Variação da resistência de um solo rico em carbonato de cálcio com a sucção (modificado Camapum de Carvalho 1985)

$$b = \frac{1}{c_r - c'} \quad (\text{Eq. 3})$$

Para a obtenção de c_r os autores recomendam o uso de ensaio sobre amostra seca ao ar, ou seja, conduzidos à umidade higroscópica.

Nos casos em que se dispõe de ensaios realizados com o solo em umidades superiores à residual, os autores propõem o uso da Equação 4. Nessa equação, c_m corresponde à máxima coesão medida para a máxima sucção matricial utilizada nos ensaios.

$$b = \frac{1}{c_m - c'} - \frac{1}{(u_a - u_w) \tan \phi'} \quad (\text{Eq. 4})$$

Coloca-se, aqui, em evidência, a acertada prudência dos autores em apresentarem a proposta como uma alternativa de previsão da resistência dos solos não saturados sem o objetivo de substituir estudos mais elaborados.

Objetivando possibilitar a obtenção de parâmetros de resistência de solos não saturados em laboratórios onde técnicas mais elaboradas não estejam disponíveis, Valencia *et al.* (2007) propuseram uma metodologia para a determinação dos parâmetros da envoltória de ruptura de solos não saturados a partir de ensaios de cisalhamento direto em amostras saturadas e de ensaios de tração indireta e de compressão simples em amostras não saturadas para as quais se determinaram as curvas características de retenção de água. É evidente que o uso dos ensaios de cisalhamento direto pode ser substituído por ensaios triaxiais, mais raros nos laboratórios pelo próprio custo do equipamento.

Na técnica proposta por Valencia *et al.* (2007), é recomendável que se defina a curva característica de retenção de água usando-se os corpos de prova que serão, em seguida, submetidos ao ensaio de tração indireta por meio de compressão diametral, o que pode ser feito pela técnica do papel filtro, como procederam os autores da proposta. A partir dessa técnica, os autores chegaram à determinação de um gráfico da coesão em função da sucção matricial (Figura 4a) obtida a partir dos ensaios de tração, compressão simples e tração-compressão simples, e de ϕ^b (ângulo de atrito em função da sucção matricial) em função da sucção matricial (Figura 4b). A diminuição da coesão a partir de um determinado valor de sucção matricial pode parecer contraditório com o discutido anteriormente e mostrado na Figura 3, no entanto, esse tipo de comportamento não é raro e pode ocorrer devido a dois fatores: 1) fissuras e microfissuras que aparecem no solo com o fenômeno da retração, que ocorre paralelamente ao aumento da sucção, principalmente, quando esse aumento de sucção se dá por exposição ao ar sem a ação de tensões confinantes; 2) em pontos onde atua o fenômeno capilar, o desaparecimento do menisco conduz ao desaparecimento da tensão capilar e por consequência à perda de resistência do solo, fenômeno facilmente visualizado quando se caminha sobre a areia de praia como retratado na imagem que compõe a capa da primeira edição deste livro *Solos não saturados no contexto geotécnica* (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

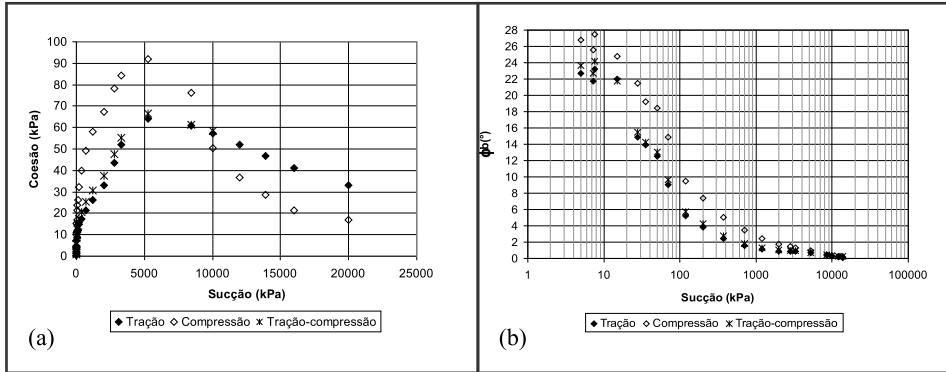


Figura 4 – a) Coesão e ϕ^b em função da sucção matricial (Valencia *et al.* 2007)

Na metodologia proposta por Valencia *et al.* (2007), considera-se que a ruptura é produzida por tração teoricamente uniforme que se acentua na região central do corpo carregado diametralmente, o que torna possível a obtenção da resistência a tração do solo (σ_{3t}) de modo indireto, conforme a Equação 5 proposta por Carneiro e Barcellos (1953).

$$\sigma_{3t} = \frac{-2P}{\pi DL} \quad (\text{Eq. 5})$$

onde:

D = Diâmetro da amostra,
L = Espessura da amostra e
P = Carga aplicada.

Com fundamento no exposto em Moraes *et al.* (2005), com base na teoria da elasticidade e no critério de ruptura de Griffith, torna-se possível relacionar a tensão máxima de tração (σ_{3t}) à resistência à tração uniaxial (σ_{1t}) por meio da Equação 6.

$$\sigma_{1t} = -3\sigma_{3t} \quad (\text{Eq. 6})$$

Valência *et al.* (2007) indicam que, se conhecendo o ângulo de atrito efetivo do solo saturado (ϕ'), a resistência à tração (σ_{3t}) e a resistência à compressão simples (σ_{1c}), pode-se determinar a coesão total (c), respectivamente, a partir da Equação (7) e da Equação (8).

$$\sigma_{3t} = k_p \sigma_{1t} + 2c\sqrt{k_p} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\sigma_{1c} = k_p \sigma_{3c} + 2c\sqrt{k_p} \quad (\text{Eq. 8})$$

Na Equação (8), como $\sigma_{3c} = 0$ no ensaio de compressão simples, resulta:

$$\sigma_{1c} = 2c\sqrt{k_p} \quad (\text{Eq. 9})$$

De onde, ao se substituir a Equação (9) na (7), resulta a Equação 10.

$$k_p = \frac{\sigma_{3t} - \sigma_{1c}}{\sigma_{1t}} \quad (\text{Eq. 10})$$

Fazendo-se, então, a substituição de k_p , obtido da Equação (10) na Equação (9), determina-se a coesão total c .

$$c = \frac{\sigma_{1c}}{2\sqrt{k_p}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Segundo Valência *et al.* (2007), para a obtenção da coesão total a partir da Equação (7) e da Equação (8), k_p deve ser determinado a partir da Equação (12), na qual o ângulo de atrito efetivo (ϕ'_{cd}) é proveniente do ensaio de cisalhamento direto, sendo a Equação (10) usada apenas no caso em que se recorre aos ensaios de resistência à tração e de compressão simples.

$$k_p = \frac{1 + \text{sen}\phi'_{cd}}{1 - \text{sen}\phi'_{cd}} \quad (\text{Eq. 12})$$

Para o cálculo do ângulo de atrito (ϕ^b) do solo, Valência *et al.* (2007) utilizam a Equação (13), na qual a sucção é oriunda da curva característica, a coesão efetiva provém do ensaio de cisalhamento direto e a coesão total é determinada conforme exposto com base nos resultados de resistência à tração e de compressão simples.

$$\phi^b = \tan^{-1} \left(\frac{c - c'}{(u_a - u_w)} \right) \quad (\text{Eq. 13})$$

A metodologia apresentada por Valência *et al.* (2007), a exemplo da metodologia apresentada por Vilar e Rodrigues (2007), deve ser considerada em estudos preliminares, não devendo constituir-se em impedimento para estudos mais elaborados realizados, fazendo-se ensaios à sucção controlada.

Além das duas técnicas apresentadas anteriormente, cita-se a técnica apresentada por Camapum de Carvalho e Pereira (2001, 2002), segundo a qual o comportamento mecânico tende a ser único quando analisado em função da sucção em pF normalizada em relação ao índice de vazios em situações em que o parâmetro decresça com o aumento da porosidade, por exemplo, a coesão, e transformada em relação ao índice de vazios quando o parâmetro se amplie com o aumento da porosidade, por exemplo, o colapso. Essa técnica de análise permite ampliar o alcance dos resultados obtidos para condições específicas de umidade, porosidade e sucção matricial para condições não estudadas desde que mantida distribuição de poros semelhante.

A Figura 2 ilustra a aplicação desse método, mostrando que os resultados de coesão, obtidos por Machado e Vilar (1998), para solos de um perfil com porosidade variando com a profundidade, convergiram para uma tendência única, ou seja, por meio da técnica torna-se possível extrapolar os resultados experimentais obtidos. Outras análises demons-

trando o alcance da técnica são apresentadas por Camapum de Carvalho e Pereira (2001 e 2002). Destaca-se que, sendo possível a realização de ensaios específicos para outras condições de porosidade ou sucção, isso deve ser feito, pois o método proposto permite, apenas, a estimativa de outros resultados em situação intermediária ou de extrapolação.

Em se tratando de solos não saturados, os três principais problemas oriundos da variação volumétrica do solo estão associados aos fenômenos da expansão/contração, do colapso e do adensamento quando da presença de bolhas oclusas. Surgem, então, dentre outras, as questões: a) a que se devem as ocorrências desses fenômenos? b) o que faz com que cada um deles ocorra? c) qual a dinâmica de ocorrência desses fenômenos?

Se analisados esses diferentes fenômenos em sua origem, certamente, ver-se-á que eles ocorrem devido a desequilíbrios de energia gerados em consequência de alterações ora da energia externa, por exemplo, aplicação de uma tensão ou de uma vibração, ora da energia interna, por exemplo, variações de umidade e alteração da química do fluido e ora de ambas as energias.

A expansão e a contração do solo são fenômenos mais complexos por serem passíveis de se originarem de variações volumétricas estruturais, ou seja, entre as partículas, e de variações volumétricas da própria partícula nos argilominerais expansivos por meio da alteração da distância interplanar basal. Essa particularidade tem sido considerada nas análises de comportamento dos solos não saturados e na própria definição da curva característica desses solos expansivos? Destaca-se ainda, que, embora a expansão e a contração, geralmente, ocorram devido a variações de umidade e das tensões atuantes no solo, no caso de solos pouco intemperizados, apresentando elevada capacidade de troca catiônica, elas também podem ocorrer ou se ampliarem em consequência de alterações químicas do meio afetando, em especial, a sucção osmótica. Contudo, onde entrariam essas alterações químicas nesses fenômenos? Essas alterações não correspondem a uma modificação na energia das partículas e, portanto, na energia de interação entre elas?

O colapso está quase sempre associado a variações na tensão aplicada e, em especial, a ampliações no teor de umidade, no entanto, o melhor seria tratar o fenômeno como relacionado à metaestabilidade estrutural do solo. Sendo a estrutura metaestável, tem-se uma importante sensibilidade a desequilíbrios de energia nos contatos, interagregado ou interpartículas. Por exemplo, uma vibração excessiva ou a simples alteração da qualidade do fluido de umedecimento, sem a necessidade de variação no teor de umidade do solo, são, em certos casos, suscetíveis de gerarem o colapso da estrutura do solo. Contudo, sendo o colapso fruto desse desequilíbrio de energia localizado, ele poderia ocorrer em um solo saturado? Um solo ao ser saturado perderia suas características colapsíveis? Esse é um tema polêmico e fica, aqui, uma questão concreta para reflexão: antes do enchimento do lago Paranoá em Brasília, Distrito Federal, a natureza porosa e metaestável dos solos que margeavam o curso d'água compondo o manto de solo profundamente intemperizado apresentava características colapsíveis, com o enchimento do reservatório esses solos deixaram de ser colapsíveis ao tornarem-se submersos?

O adensamento e mesmo a resistência dos solos contendo bolhas oclusas, talvez, não integrem as principais preocupações dos pesquisadores sobre as propriedades e comportamento dos solos não saturados, no entanto, inegavelmente, é um problema de solos não saturados e que termina se afastando do comportamento dos solos saturados propriamente

ditos, embora se possa argumentar que não. A situação de bolha oclusa ocorre nos solos compactados quando se atinge a umidade ótima de compactação, mas, mesmo no ramo seco, considerando-se a dinâmica do solo em campo, ela pode vir a ocorrer, por exemplo, em função das variações volumétricas que sofre o solo compondo a base de um aterro em construção. Por isso, em aterros de maior altura, considera-se, no projeto, um percentual de geração de pressão neutra em relação às tensões oriundas da sobrecarga do próprio aterro. Nos solos naturais, em camadas presentes abaixo do nível d'água, as bolhas oclusas podem ocorrer, por exemplo, em função de transformações de matéria orgânica e da ação de micro-organismos.

Portanto, esses fenômenos ligados a variações volumétricas dos solos não saturados são dotados de certa complexidade e técnicas de avaliação expeditas podem ser relevantes nos estudos preliminares.

Quando se tratar de solos compondo perfis de intemperismo tropical, uma primeira técnica a ser usada é a de avaliação textural do solo com e sem o uso de defloculante químico e/ou mecânico. Geralmente, os solos com diferença significativa entre o teor de argila com e sem o uso de defloculante e/ou de ultrassom indicam a presença de agregados e, por consequência, de macroporos, o que constitui um indicativo de suscetibilidade ao colapso. Deve-se, no entanto, atentar para o fato que solo com agregados pouco estáveis podem, mesmo possuindo agregados, não apresentar diferenças texturais entre as duas técnicas de ensaio. Por outro lado, solos podem conter agregações estáveis em presença de água e não serem colapsíveis. Dessa forma, a avaliação a partir de curvas granulométricas apenas indica a possibilidade de colapso nesse tipo de solo argiloso quando em estado natural e mesmo compactado, dependendo da condição de compactação, apontando, então, para a necessidade de estudos complementares específicos concernentes ao colapso.

Outra técnica para a identificação de solos colapsíveis, agora com alcance mais amplo que apenas os solos argilosos, é a proposta por Vilar e Rodrigues (2007). A técnica proposta se fundamenta no cálculo do grau de compactação do solo em estado natural em relação à massa específica aparente seca máxima obtida em um ensaio Proctor na energia normal. Segundo os autores, a técnica resgata a proposta de Mello (1973) segundo a qual solos com grau de compactação natural inferior a 80% são potencialmente colapsíveis. Os autores reavaliaram esse limite com base em resultados experimentais da literatura e propuseram que se considerem solos potencialmente colapsíveis como sendo aqueles com grau de compactação natural inferior a 90%.

Vargas (1978) descreve o colapso como um fenômeno típico de solos arenosos fofos com poucos finos que também se faz presente nos solos tropicais argilosos lixiviados, macroporosos. Na Figura 5, obtida para duas amostras oriundas de um perfil de intemperismo típico do Distrito Federal, uma coletada a 3m de profundidade (Figura 5a) e outra a 9m de profundidade (Figura 5b) estão apresentadas as curvas de compactação Proctor normal com os pontos representados em escala de grau de compactação. Na Figura 5b, também foi plotado o resultado obtido para uma amostra coletada no mesmo perfil a 12m de profundidade. Fazendo-se um paralelo entre esses resultados e os coeficientes de colapso analisados por Camapum de Carvalho *et al.* (2002), pode-se notar a boa aderência aos dados experimentais da técnica apresentada por Vilar e Rodrigues (2007).

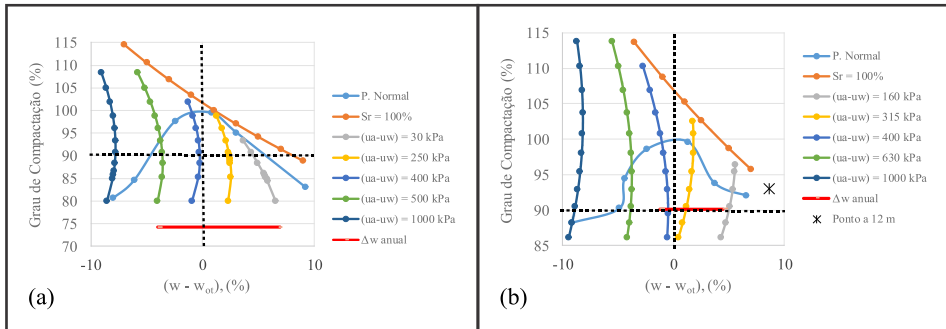


Figura 5 – Curvas de compactação e de isosucção de solos do Distrito Federal: a) coletado a 3m de profundidade; b) coletado a 9m de profundidade

Por outro lado, observa-se, na Figura 6a, que o comentário feito por Vargas (1978) é pertinente, pois a bimodalidade mostrada na curva característica do solo natural coletado a 3m de profundidade confirma a macroporosidade do solo. Essa característica, bimodal, não se faz presente na amostra de solo coletada a 9m de profundidade (Figura 6b). As faixas de umidade registradas para as amostras coletadas a 3m e 9m de profundidade (Figura 5) e a mudança na forma da curva características, ao se passar da profundidade de 3m para 9m, não estaria a mostrar a relevância de se considerar a mestaestabilidade estrutural do solo, conforme indicam Vilar e Rodrigues (2007), e o próprio perfil de intemperismo?

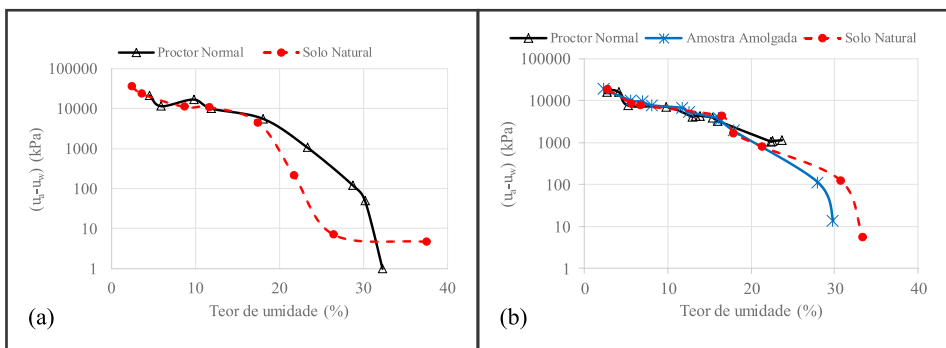


Figura 6 – Curvas características de retenção de água de solos do Distrito Federal: a) coletado a 3m de profundidade; b) coletado a 9m de profundidade

Fazendo-se um paralelo entre as simplificações apresentadas para se estimar a resistência dos solos não saturados e o seu potencial a apresentar colapso, vale ressaltar que, no primeiro caso, trata-se de estimar o comportamento a partir de outros resultados de ensaios onde se avalia o comportamento mecânico obtido para o solo, enquanto, no segundo caso, seja por meio de avaliação textural, seja por meio da determinação do grau de compactação natural, a estimativa se dá apenas com base na avaliação do estado físico do solo e não se define o grau de colapso.

Quanto ao estudo do comportamento mecânico do solo por meio de ensaios de campo, várias questões podem ser formuladas, por exemplo: 1) Como considerar o efeito da condição não saturada se os projetos geotécnicos são quase exclusivamente baseados em dados obtidos por meio de campanhas de investigação pontuais e a curto prazo, ou seja, que não consideram variabilidade espaço-temporal?; 2) Como considerar o efeito da condição não saturada se os projetos geotécnicos são quase sempre fundamentados em resultados de ensaios obtidos para os solos em condições saturadas ou em parâmetros estimados a partir de correlações postas na literatura e que foram, na maioria das vezes, estabelecidas em relação ao comportamento dos solos saturados?

Nos perfis de solos não saturados, principalmente em regiões de clima seco e de evidente sazonalidade, tem-se, além da variabilidade espacial condicionada pela geologia, aquela que é temporal. A variação da sucção em campo depende das propriedades geotécnicas, da dinâmica da água subsuperficial, da geomorfologia de superfície e subsuperfície e da transferência de água e de energia entre a atmosfera e o solo, sendo geralmente maior na superfície do terreno, onde o solo interage diretamente com a atmosfera. Especificamente nas regiões de clima tropical, os solos sofrem influência da variação de umidade devido às estações de seca e de chuva.

Apesar dos avanços obtidos por meio de técnicas especialmente desenvolvidas para medida e controle da sucção em laboratório e de modelagem constitutiva e numérica, a necessidade de informações básicas de campo ainda prevalece, uma vez que muitos estudos carecem de dados contínuos de monitoramento de sucção *in situ*, restringindo-se, muitas vezes, a previsões de comportamento baseadas em análises pontuais.

Evidentemente que monitorar a sucção a longo prazo e em diversos locais não parece viável usando-se técnicas e equipamentos disponíveis devido ao custo elevado para a aquisição, instalação, manutenção e coleta dos dados. No que diz respeito ao custo, faz-se necessário que sejam sempre colocadas as questões: 1) Qual a relação entre o custo do monitoramento e o custo do empreendimento?; 2) Qual a relação entre o custo do monitoramento e o inestimável custo de vidas que podem ser perdidas em consequência do desempenho inadequado da obra?

Correlacionar dados de sucção *in situ* com variáveis atmosféricas e, dessas correlações, desenvolver modelos simplificados para aferir a sucção de campo mesmo que de forma preliminar pode ser um caminho (Mascarenha, 2003). O exemplo dos modelos hidrológicos que contemplam a coleta, o armazenamento e o gerenciamento de dados atmosféricos pode ser um ponto de partida. Obviamente alguns obstáculos para isso se destacam, como a variabilidade geológica, a geomorfologia natural e antropizada, a influência da vegetação, a densidade das obras de engenharia que cobrem extensas regiões, dentre outros.

Considerando-se que a investigação do subsolo tem como premissa básica escolher um método de ensaio de campo que possibilite definir o perfil do subsolo e estimar os parâmetros mecânicos de interesse de cada camada, outras perguntas que surgem são: 1) Todos os métodos de ensaio de campo apresentam sensibilidade suficiente para capturar o efeito da sucção no solo?; 2) Se o método de ensaio destrói a estrutura do solo na frente de avanço, como ele permitirá avaliar a influência da não saturação no comportamento do solo (Camapum de Carvalho e Gítrana Jr., 2021)?; 3) Quando o método de ensaio ou a interpretação dos resultados obtidos não contemplam as variações sazonais dos perfis

de umidade, como eles poderão otimizar o projeto no que tange à consideração do comportamento do solo em estado não saturado, incluindo-se situações críticas em termos de comportamento? O resultado tem sido quase sempre obras de maior custo e/ou envolvendo maiores riscos.

Na engenharia de fundações, por exemplo, as investigações são quase sempre realizadas exclusivamente com sondagens SPT. O projeto é geralmente feito segundo uma abordagem direta, correlacionando-se o comportamento do elemento de fundação com resultados do SPT. Variações dos valores de SPT entre períodos seco e chuvoso, bem como a sua relação com as sucções nesses dois períodos têm sido observadas, porém, tal ensaio apresenta a mesma sensibilidade se comparado ao CPT?

É importante destacar que os ensaios de campo são realizados tanto em solos saturados quanto em solos não saturados, no entanto, o desconhecimento da sucção é um empecilho para o avanço da interpretação dos resultados. Medir a sucção, principalmente ao longo do perfil de subsolo de interesse, não é uma tarefa simples para ser introduzida na prática. Por essa razão, alternativas relativamente simples podem ser incorporadas para melhor interpretação dos resultados, como a determinação da umidade do solo durante a etapa da investigação do subsolo e o conhecimento da curva característica de retenção de água do solo em laboratório. A umidade pode ser determinada por meio de amostras de solo que são coletadas no amostrador ou à trado ou técnicas TDR e a curva característica de retenção de água pode ser determinada pelo método de papel filtro. Determinar o índice de vazios é relevante mesmo que de maneira aproximada, usando-se as amostras de solo contidas no amostrador, por exemplo, pois indicará o grau de saturação do solo e, quando se tratar de solo saturado, a umidade determinada a partir da amostragem permitirá estimar o índice de vazios do solo, parâmetro de grande relevância nos processos de adensamento.

Determinar a umidade e correlacioná-la diretamente com a sucção por meio de curvas características de retenção de água resolveria o problema da estimativa da sucção no campo? Sim, considerando que essa abordagem é simplificada, pois as curvas geralmente não representam uma relação única entre umidade e sucção devido à histerese, e se tem ainda a dinâmica do perfil de umidade *in situ*.

As curvas de secagem e de umedecimento representam condições limites de sucção (máxima e mínima), e isso significa que a sucção *in situ* não necessariamente corresponderá a um desses valores limites de sucção. A umidade obtida a partir do dado no campo não fornece uma indicação clara se a sucção correspondente está sobre a curva de secagem ou sobre a curva de umedecimento, pois isso depende da redistribuição da umidade do solo decorrente dos processos de infiltração e evaporação de água do solo no campo, podendo as análises serem otimizadas ao se adotar trajetórias mistas a partir da umidade presente em campo.

Para se reduzir a imprecisão dessa estimativa, outra possibilidade é, a partir da umidade, calcular a sucção média entre as curvas características de retenção de água de umedecimento e de secagem sobre o eixo logarítmico da sucção, uma vez que, sob a trajetória de secagem, a curva de retenção de água permitirá uma estimativa do valor máximo da sucção, enquanto que, sob a trajetória de umedecimento uma estimativa do valor mínimo, conforme já apontado.

Se a variação da sucção no campo for relativamente baixa, como acontece para diversos solos de regiões de clima tropical, onde não há deficiência de umidade, ou em situações onde as variações de umidade se dão na zona de macroporos presentes nos solos

profundamente intemperizados, e, se o solo apresentar pouca histerese, a estimativa da sucção pode ser realizada de forma satisfatória. Essa alternativa, portanto, mesmo que simplista, precisa evoluir no meio técnico, pois permite estimar a sucção por meio de curvas características de retenção de água, que passam a ser informação fundamental para se compreender o efeito da sucção nos resultados de ensaios de campo.

Abordagens que incorporam o efeito da condição não saturada na interpretação de resultados de ensaios de campo ainda não estão suficientemente desenvolvidas, principalmente para os ensaios de perfilagem, como o SPT, o CPT e o DMT.

Desse modo, tem-se procurado incorporar conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados, a fim de se considerar o efeito da sucção nos resultados desses ensaios. Dentre as propostas disponíveis para considerar o efeito da sucção nos resultados de ensaios de campo, destacam-se as que incorporam o efeito da sucção nas tensões efetivas para solos não saturados por meio da equação de Bishop (1959). Nesse caso, considerar a variação do parâmetro χ linear com o grau de saturação de 0 a 1, conforme proposto por Robertson *et al.* (2017), é um recurso simples, com bons resultados e, portanto, interessante para fins de aplicação prática. No entanto, a aplicação de conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados na interpretação de resultados de ensaios de campo de perfilagem precisa evoluir ainda mais de modo a responder com mais acerto e precisão às questões que se colocam.

5. QUESTÕES SOBRE EROSÕES, ENCOSTAS, ESTABILIZAÇÃO, BARREIRAS AO FLUXO E OBRAS EM SOLOS NÃO SATURADOS

Sendo as propriedades físicas, químicas e mineralógicas dotadas de certa dinâmica em relação aos aspectos espacial e temporal, não seriam o comportamento hidráulico e mecânico dotados dessa mesma dinâmica espacial e temporal nos solos não saturados presentes nas obras de engenharia? Em muitos casos, certamente sim, como se depreenderá da breve discussão apresentada a seguir, o que conduz à necessidade de reflexões mais amplas sobre a direção a ser dada aos estudos aplicados do comportamento dos solos não saturados.

5.1 Erosões

Cabe destacar, inicialmente, que as discussões que se seguem se referem à erosão hídrica, em especial, à continental, mas podem ser estendidas, em vários aspectos, para as erosões costeiras e de bordo de reservatório. Muitas vezes, faz-se necessário sair da erosão em si e adentrar em questões ambientais que estão a desencadeá-las ou simplesmente intervindo em seus processos evolutivos sem que se atente para elas. A título de exemplo, Santos Jr. *et al.* (2017) apontam que merece maiores análises o impacto nas erosões costeiras de possíveis alterações nas correntes marinhas geradas pela implantação de plataformas para a exploração de petróleo.

O tema erosão, em um país marcado pelo predomínio do clima tropical, como o Brasil, com significativa cobertura por um manto de solo profundamente intemperizado, requer aprofundamento no entendimento dos fenômenos e processos responsáveis por sua deflagração e evolução. Nesse contexto, não mereceriam maior ênfase os estudos e o en-

tendimento das propriedades e do comportamento dos solos não saturados para que se entendesse tais fenômenos e processos?

Segundo o dicionário Houaiss, etimologicamente, o termo erosão corresponde à “ação de corroer”, que pode ser interpretada como o “desgaste da superfície terrestre pela ação mecânica e química da água corrente, das intempéries ou de outros agentes geológicos”. No meio técnico, geralmente, considera-se que a erosão é um fenômeno que compreende três fases: desprendimento de partículas, arraste e deposição. Percebe-se, então, que o significado existente no dicionário Houaiss é mais amplo, pois envolve a ação química além da puramente física.

Essa conceituação inicial é relevante para que se formule a questão para reflexão: o fenômeno da eluviação ou esqueletização dos maciços em função do fluxo em meio saturado ou não saturado corresponde a um processo erosivo? Caso o leitor entenda que sim, estaria envolvido, nesse mecanismo, apenas o transporte de compostos químicos solubilizados ou incluiria a movimentação de micropartículas, como os argilominerais? É provável que a resposta seja encontrada em Lima (2003), o que não impede a realização de novos estudos para melhor compreensão do fenômeno.

Refletindo, agora, sobre os macromecanismos responsáveis pela deflagração e evolução dos processos erosivos, surge a questão de fácil resposta: assumiriam, as propriedades e os comportamento dos solos não saturados, algum destaque na ocorrência desses mecanismos? No campo dos solos saturados, sobressaem como relevantes na análise dos processos erosivos o solapamento dos pés de taludes, favorecendo sua ruptura e a erosão interna, mas mesmo esses mecanismos não seriam afetados pelas propriedades e pelo comportamento dos solos não saturados? Sobre a erosão superficial, teria alguma relevância o estado não saturado presente na fase inicial do processo erosivo? Para maior reflexão e resposta a essa questão, seria relevante levar em conta as energias externas e internas atuantes no processo e suas dinâmicas temporais e espaciais. Por exemplo, qual a importância da coesão e do atrito? Que relevância teria, dependendo do estado de saturação do solo, o surgimento de pressões positivas na fase ar presente nos solos não saturados? Qual o impacto do choque e gradiente térmico? Certamente, após a leitura deste livro, o leitor já terá a resposta para muitas dessas questões e de outras que se poderia formular, mas espera-se, sobretudo, que, aguçada a curiosidade, avance-se nos estudos voltados para o entendimento, controle e, em especial, a prevenção dos processos erosivos. A questão térmica, embora pouco considerada nos estudos e projetos, exceto as condições extremas como aquelas ligadas ao congelamento, impacta diretamente na curva característica do solo e, portanto, em seu comportamento (Lima, 2018). Ao influir na curva característica qual seria, por essa perspectiva, o impacto da temperatura na erodibilidade do solo não saturado?

5.2 Encostas

As rupturas de encostas, talvez, constituam o cenário mais completo para que se reflita sobre a importância das propriedades e do comportamento dos solos não saturados. Se observadas imagens das várias rupturas de encostas que têm ocorrido em regiões serranas no Estado do Rio de Janeiro e Santa Catarina nos últimos anos, vários aspectos intervenientes na dinâmica temporal das propriedades e do comportamento dos solos não

saturados poderão ser colocados em evidência, embora o ônus de tais rupturas recaia inextricavelmente sobre os ombros da indefesa chuva. Serão, então, colocadas, aqui, para reflexão e maiores análises, algumas questões.

A primeira questão seria: qual o potencial de degradação físico-química dos maciços junto a encostas e outros taludes naturais ou de corte em curtos espaços de tempo, 10 anos, 20 anos, 50 anos, um pouco mais ou um pouco menos? A resposta, os leitores encontrarão em Lima (2003), e a imagem mostrada na Figura 7 ilustra a ruptura de um talude de corte realizado para a implantação de uma rodovia próximo a Salvador.



Figura 7 – Ruptura de talude em Salvador (imagem cedida por Luis Edmundo Prado de Campos)

Outra questão seria: diante no novo *modus vivendi* da sociedade moderna, em especial, em países como o Brasil, onde se privilegia o transporte individual, qual impacto ele estaria gerando na qualidade e temperatura da água da chuva e qual seria a influência das eventuais alterações nas propriedades e no comportamento dos solos saturados e não saturados?

Qual o impacto imediato, a médio e a longo prazo de usos do solo como o agropecuário e o urbano na degradação textural e estrutural dos solos compondo os maciços? O leitor poderá entender melhor a importância dessa questão com as leituras de Oliveira *et al.* (2012) e Pérez (2018).

Trazendo-se para o contexto das questões levantadas neste texto, ficam as perguntas: as rupturas de encostas registradas em fevereiro de 2022 na cidade de Petrópolis (Figura

8, Foto Antonio Guerra) teriam alguma relação com variações de sucção? Caso tenham, qual variação de sucção foi mais impactante, a osmótica ou a matricial? A resposta a essas perguntas depende de outras questões: como atuou a variações de sucção osmótica e mátrica ao longo do tempo no processo de deflagração das rupturas das encostas?



Figura 8 – Rupturas de encosta em Petrópolis - RJ
(Fotos de Antonio Guerra, fevereiro de 2022)

Essas e muitas outras questões poderiam, ainda, ser colocadas para que se chegue a um melhor entendimento dos fenômenos envolvendo alterações das propriedades e comportamento dos solos não saturados, os quais têm levado os cenários de encostas brasileiras e de outros países a passarem, em um piscar de olhos, do belo para o feio e, quase sempre, triste e mesmo aterrorizador.

5.3 Estabilização

A estabilização dos solos pode seguir vários caminhos, inclusive, dar-se por meio do próprio aumento da sucção atuante no solo. As mais frequentes, no entanto, são a mecânica, a textural, a química e a oriunda da inclusão de fibras naturais ou sintéticas. Recentemente, estudos vêm sendo realizados sobre a estabilização dos solos por meio de cimentações geradas por bactérias nativas (Valencia 2009 e Muñeton 2013).

Alguns autores dividem a estabilização em melhoria do solo e estabilização propriamente dita quando se incorpora um maior teor de aditivo ao solo. Neste item, será considerado, apenas, o termo geral estabilização, dando-se ênfase à estabilização química, embora as estabilizações granulométricas e por meio da inclusão de fibras reflitam nas curvas características de retenção de água e, por consequência, no comportamento hidromecânico do solo. Serão abordadas a estabilização com cal, a estabilização com emulsão asfáltica e a estabilização de materiais granulares com cimento. Na discussão do tema envolvendo a estabilização com cal e emulsão asfáltica, serão considerados os resultados obtidos por Pessoa (2004) ao estudar um solo fino contendo argilominerais expansivos oriundo de Urucu, estado do Amazonas. No estudo realizado por Pessoa (2004), os corpos de prova (CP) foram compactados estaticamente na condição ótima da energia Proc-

tor intermediário e, em seguida, submetidos à secagem ou ao umedecimento, objetivando atingir diferentes níveis de sucção. Os índices de vazios iniciais variavam um pouco em função da repetibilidade da compactação e em função de contrações do CP quando da secagem ou expansão quando do umedecimento. Os corpos de prova eram curados por 14 dias, período em que eram mantidos em contato com o papel filtro para a determinação da sucção atuante.

A escolha dos dois produtos químicos como agentes estabilizantes se deu por se pretender separar a estabilização fundamentada nas reações químicas e trocas catiônicas, ou seja, a estabilização com cal, daquelas provocadas por relações predominantemente interativas por meio de pontos de aderência e por mudanças nas características do fluido que ocupa os vazios presentes no solo, que é o caso da estabilização com emulsão.

O interesse em se discutir o tema está atrelado à sua grande complexidade quando se insere, nas análises, a variável sucção. Por exemplo, as estabilizações envolvendo reações químicas afetam a sucção atuante no solo por dois caminhos, alterando o teor de umidade do solo, inclusive a umidade de equilíbrio, e modificando os vazios nele presentes. É evidente que se poderia e se pode buscar fazer a análise da contribuição do aditivo para a melhoria do comportamento do solo, ensaiando-o na condição saturada de modo a se eliminar o efeito da sucção/capilaridade, embora a influência osmótica poderia ser mantida. Contudo, cabe aí uma questão: essa é a situação na qual o solo estabilizado irá atuar na obra? Sendo positiva, a opção de estudo é apropriada. No entanto, se o solo vai atuar na condição não saturada cabem perguntas como: qual será a sucção de equilíbrio em campo diante da nova química e nova física do solo? Qual é a dinâmica temporal das reações químicas envolvidas e seus reflexos nas propriedades e no comportamento do solo? Embora quase sempre os aditivos químicos cal e cimento sejam considerados agregadores, Ayala (2020) e Wanderley Neto (2020) mostraram que eles podem atuar instabilizando texturalmente o solo. A Figura 9 apresenta resultados obtidos para o solo natural e estabilizado com 2%, 3%, 4% e 6% de cal. A Figura 9a apresenta os valores de ISC em função da sucção em pF. Nessa figura, constata-se, sem que se leve em conta a porosidade dos corpos de prova, a tendência de pequenos teores de cal piorarem o comportamento do solo para, em seguida, melhorá-lo com 6% de cal. A pergunta seria: efetivamente, a cal piora o comportamento desse solo estudado? A Figura 9b mostra, sem que se leve em conta a sucção, que, para um mesmo índice de vazios, o aumento do teor de cal tende a melhorar o comportamento do solo, mas cabe aqui uma pergunta: o teor de cal afetaria a porosidade resultante para uma mesma energia e umidade de compactação?

Passando, agora, à análise dos resultados obtidos na estabilização com emulsão, verifica-se, na Figura 9c, a tendência ao aumento do teor de emulsão piorar o comportamento do solo se considerada uma mesma sucção. A Figura 9d, no entanto, mostra que, se observada a porosidade, ocorre uma tendência de melhoria do comportamento ao se passar da amostra natural para 2% de emulsão e, depois, ao se passar de 2% para 1% ou 3%. A semelhança dos resultados entre 1% e 3% de emulsão na Figura 9d remete a se observar a sucção na Figura 9c, e lá se observam maiores valores de sucção para a amostra com 1% de emulsão, justificando os resultados da Figura 9d. Observando-se os resultados da Figura 9c, cabe a pergunta: a emulsão estaria intervindo na sucção matricial por meio da alteração da química do fluido?

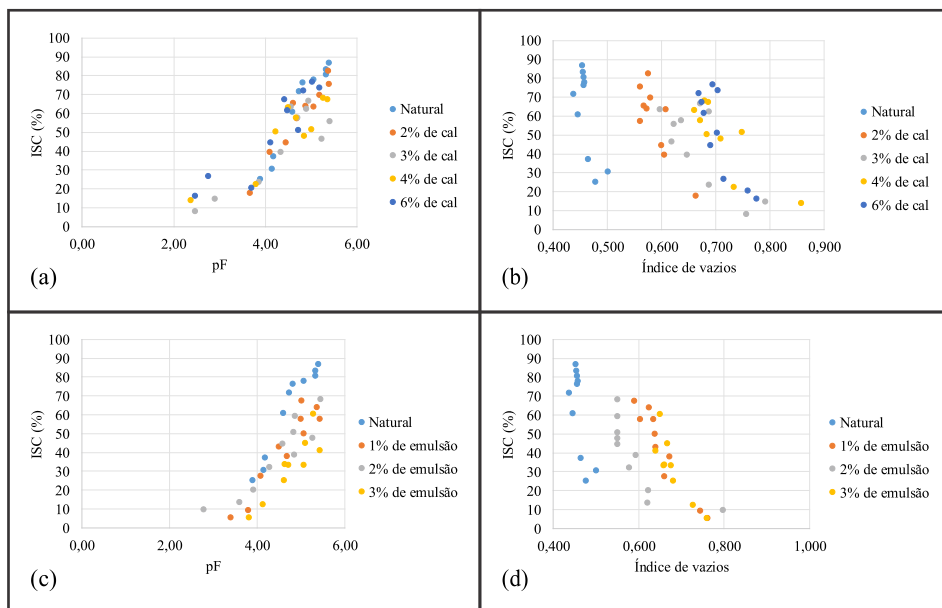


Figura 9 – Estabilização química de um solo tropical:
a e b – estabilização com cal; c e d – estabilização com emulsão

Analisando-se os resultados em função de pF/e conforme proposta de Camapum de Carvalho e Pereira (2002), verifica-se, na Figura 10a, que o comportamento do solo estudado efetivamente tende a melhorar com o aumento do teor de cal. A melhoria também ocorre ao se adicionar emulsão ao solo, como mostra a Figura 10b, no entanto, em menor grau e não tendo diferença substancial entre os teores de emulsão utilizados.

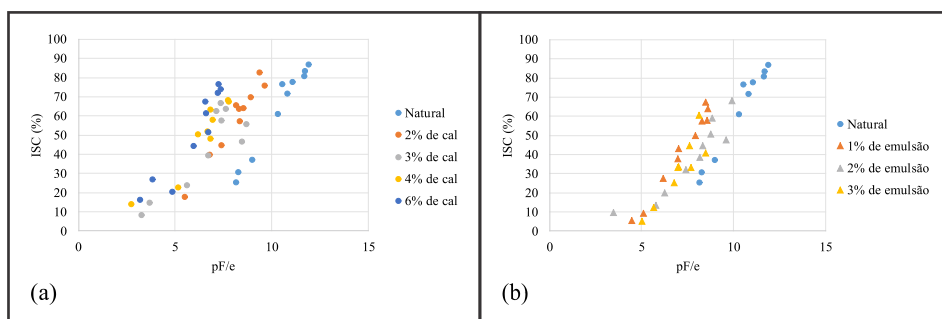


Figura 10 – Variação do ISC com a sucção em pF
normalizada em relação ao índice de vazios

Observa-se, então, desses resultados mostrados a importância do entendimento dos fenômenos físico-químicos que ocorrem no processo de estabilização química para que

se possa concluir se houve ou não melhoria das propriedades e do comportamento do solo não saturado com a adição do produto químico. O estudo da influência da não saturação nas propriedades e no comportamento do solo não pode se dar isoladamente de outros fatores, como porosidade. Adicionalmente, fica aqui a pergunta: que relevância teria a sucção osmótica na estabilização química e qual a sua dinâmica temporal?

Adentrar no tema estabilização de materiais granulares com cimento torna-se oportuno devido ao uso crescente desses materiais, as BGTCs (brita graduada tratada com cimento), em camadas de estruturas de pavimento, ficando as análises quase sempre restritas à simples avaliação do comportamento das misturas em função do teor de cimento sem que se considere o impacto da sucção nesse comportamento nem a sua influência na própria degradabilidade da estabilidade das misturas com o passar do tempo. Para fundamentar as análises aqui realizadas, foram utilizados resultados apresentados na literatura (Yeo, 2011; Yeo *et al.*, 2011).

Uma primeira questão a ser considerada diz respeito a qual sucção utilizar quando se trata de uma mistura com cimento de material granular contendo matriz grossa (diâmetro maior que 2 mm) e fina (diâmetro menor que 2 mm), a exemplo das misturas usadas por Lima (2022), Yeo (2011) e Yeo *et al.* (2011). Embora se requeiram mais estudos específicos, é possível estimar que a sucção atuante na matriz fina terá significativa influência na estabilidade e no comportamento mecânico dos grupamentos cimentícios formados, podendo inclusive as suas variações cíclicas intervirem a médio e longo prazo na estabilidade desses grupamentos e, por consequência, da mistura como um todo. Cabe aqui um parêntese para fazer um paralelo entre o comportamento dos solos tropicais profundamente intemperizados e a BGTC. Assim como a sucção atuante nos microporos dos agregados e nos macroporos presentes em solos tropicais profundamente intemperizados interferem pouco no seu comportamento mecânico, no caso das misturas de materiais granulares com o cimento a situação é similar e a microporosidade presente nos fragmentos da rocha britada, assim como os poros de maior tamanho presentes entre os elementos de maior tamanho vão intervir pouco no comportamento mecânico da BGTC. Ainda fazendo um paralelo, Silva (2022) mostrou que a aplicação dos modelos propostos para a estimativa da curva característica de retenção de água a partir das propriedades físicas dos solos quando aplicados aos solos tropicais agregados requer se considere a compartimentação da matriz textural do solo. Esses entendimentos foram aqui aplicados na elaboração de questões importantes no estudo do desempenho mecânico das BGTCs a curto e longo prazo. A curto prazo, ao se considerar o comportamento mecânico da BGTC logo após a cura normalmente adotada nos estudos, e, a longo prazo, para que se avalie o impacto da variação cíclica da sucção em função da umidade e da temperatura.

A Figura 11 apresenta as curvas características estimadas a partir das curvas granulométricas utilizando-se o modelo de Arya e Paris (1981) conforme analisado por Silva (2022). Observa-se, nessa figura, o deslocamento da curva, mantendo-se o seu formato, tendo em vista a não consideração de fatores como eventuais alterações químico-mineralógica dos grãos segundo o seu tamanho e das formas dos próprios poros presentes. Considerou-se, nas análises, a curva característica obtida para a fração inferior a 2,16 mm, admitindo-se que é essa fração que estará contribuindo para a ampliação da resistência entre os agregados de maior dimensão por meio de maiores interações com o cimento.

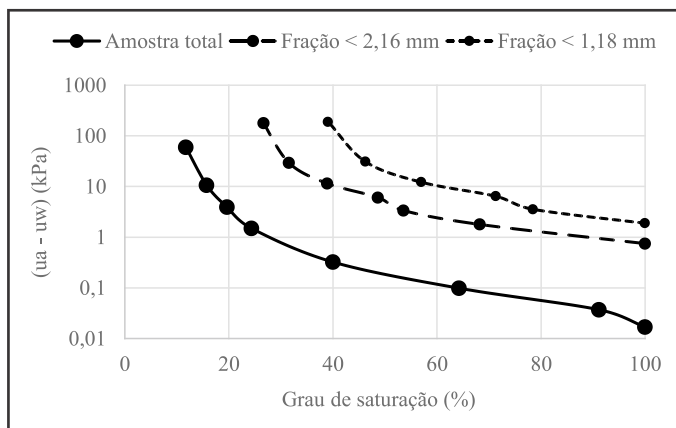


Figura 11 – Curvas características para o índice de vazios igual a 0,2

Lima (2022) mostrou boas correlações entre o comportamento mecânico e as relações $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$, nas quais T_c é o teor de cimento, w o teor de umidade, e e o índice de vazios. O autor propõe a primeira relação com fundamento no fato de que o comportamento mecânico da BGTC é diretamente proporcional ao teor de cimento e inversamente proporcional ao teor de umidade e ao índice de vazios. Já a segunda relação foi proposta com base na constatação de que o comportamento mecânico é diretamente proporcional à relação teor de cimento / índice de vazios (T_c/e) e inversamente proporcional ao fator água / cimento (w/T_c).

As Figuras 12a e 12b mostram, respectivamente, boas relações entre as resistências à compressão simples (RCS) apresentadas por Yeo *et al.* (2011) e $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$. Incorporando-se a cada uma dessas relações os valores de pF/e (pF é igual ao logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água), relação esta usada por Camapum de Carvalho e Pereira (2001 e 2002) na análise do comportamento mecânico de solos, obtiveram-se as Figuras 12c e 12d. Tendo em vista que, para a realização das análises recorreu-se a cálculos estimados de parâmetros como umidade, índice de vazios e grau de saturação mantendo-se, no entanto, as tendências observadas nas Figuras 12a e 12b, levantam-se aqui, dentre outras, dada a influência da sucção no comportamento mecânico, duas questões que requerem maiores estudos para o melhor entendimento do comportamento mecânico e da durabilidade da BGTC: 1) como atua a sucção nas BGTCs em função da distribuição de poros influenciando no seu comportamento mecânico? As variações cíclicas impostas à sucção por meio de alterações térmicas e de umidade ao longo do tempo não comprometeriam a estabilidade dos grupamentos cimentícios formados? Esclarecer tais questões por meio de estudos complementares assume grande relevância, pois enquanto a primeira permitirá a elaboração de projetos mais eficientes quanto ao dimensionamento, a segunda possibilitará a introdução de soluções, como a incorporação de fibras, lembrando que a simples interposição de camadas de reforço estrutural ou a adoção de camadas de base e sub-base invertidas não resolvem os problemas das micro e microfissurações, o que poderá se dar por meio da introdução das fibras nas misturas.

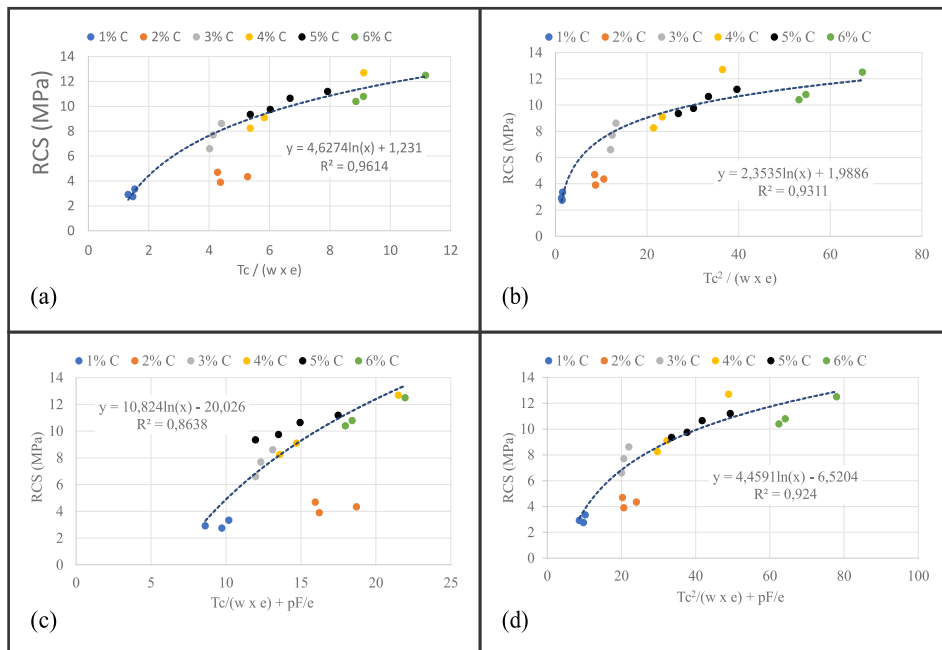


Figura 12 – Resistência à compressão simples (RCS) em função de:
a) $T_c/(w \times e)$; b) $T_c^2/(w \times e)$; c) $T_c/(w \times e) + pF/e$; d) $T_c^2/(w \times e) + pF/e$

5.4 Barreiras ao fluxo

Pode-se afirmar que um dos importantes impactos técnicos e econômicos da mecânica dos solos não saturados na prática da Geotecnia acontece no projeto de sistemas de isolamento de resíduos, particularmente, os de mineração. Avanços tecnológicos têm permitido o desenvolvimento de projetos cada vez menos empíricos.

Quando se fala de barreiras ao fluxo de água, a primeira questão a ser colocada é qual fluxo se pretende evitar. Deve-se, também, lembrar que o fluxo de água dá por diversos mecanismos, sendo o fluxo de água líquida apenas um deles. Importantes quantidades de água podem ser transportadas por meio do solo via migração de vapor, sendo que esse fluxo pode ser por difusão e advecção. Além disso, gradientes térmicos passam a ser relevantes à medida que também causam migração de vapor de água. Dessa forma, vários mecanismos de fluxo intervêm nas propriedades e nos comportamentos dos solos não saturados.

Tem-se, em seguida, a consideração: o fluxo de água em barreiras é o resultado da combinação de fatores externos ao solo e mecanismos internos. Os mecanismos externos e internos são dependentes um do outro de forma que não há como avaliar um sem considerar o outro. Surge daí a questão: quais são os agentes provocadores de fluxo que devem ser considerados? Por exemplo, deve ser considerado o fluxo oriundo de infiltrações gerado por energia externa gravitacional, como a relativa à infiltração de águas pluviais ou

o proveniente de fluxos oriundos de energias internas atuantes no solo, como sucção, capilaridade e diferenças nas concentrações químicas no fluido presente no solo?

As barreiras impermeáveis podem evitar o fluxo da água proveniente de ambas as formas de energia atuantes no maciço, a externa e a interna. Sua interposição tem duas consequências, em princípio, opostas para as propriedades e comportamentos dos solos não saturados. Primeiramente, a propagação da frente de umidade ou saturação. Em segundo plano, conforme o caso, gerar, sob a barreira impermeável, a concentração de vapor e umidade como ocorre, muitas vezes, sob revestimentos asfálticos usados na construção rodoviária. Não raro essa segunda consequência, geralmente, pouco considerada proporciona sérios problemas por afetar diretamente a resistência do solo.

As barreiras permeáveis, por sua vez, objetivam combater o fluxo oriundo da energia interna, sendo conhecidas como barreiras capilares. Essa solução geralmente busca impedir o fluxo de água em estado líquido e não impede o fluxo da água em estado de vapor, dificultando, assim, a concentração de umidade por condensação sob elas. Essas barreiras podem ser construídas com agregados naturais e artificiais e com a aplicação de geossintéticos. Em qualquer dos casos, é importante que se reflita sob a óptica dos solos não saturados, colocando-se a seguinte questão: qual seria o efeito da histerese proveniente do tempo necessário ao equilíbrio de energia entre a água, o ar e o composto sólido de contorno, seja ele mineral ou fibra sintética? A resposta a essa questão permitirá uma melhor avaliação do efetivo comportamento dessas barreiras.

5.5 Os solos não saturados de cobertura dos aterros sanitários

Assim como no caso de barreiras de fluxo para resíduos sólidos industriais e de mineração, a análise de sistemas de cobertura para aterros sanitários é desafiadora. Talvez, o estudo das propriedades e do comportamento dos solos não saturados de cobertura dos aterros sanitários seja o mais complexo por envolver variáveis adicionais antes não consideradas. A complexidade se inicia na própria condição de compactação, pois, devido à elevada compressibilidade do material suporte, o resíduo, qual seria a melhor condição de compactação? Já se avaliou e se considerou a densificação do solo colocado em estado mais úmido e menos compacto por efeito da atuação da sucção capilaridade? O processo certamente dará origem a trincas de retração, mas esse problema pode ser contornado por soluções de engenharia.

Outras questões que merecem reflexão são: qual o impacto do gradiente térmico nas propriedades e comportamento dos solos não saturados? Como considerar a transição entre a pressão positiva na fase gasosa na base da camada e nula em sua superfície? E em relação ao fluxo de água na zona não saturada da cobertura?

5.6 Fundações de edifício e de obras de terra

A análise do comportamento das fundações, em especial, das fundações profundas, implantadas mesmo que parcialmente em mantos de solo não saturados, é, quase sempre, dotada de certa complexidade devido à dinâmica da umidade e ao menor grau da dinâmi-

ca da porosidade do solo. Cabe, então, uma primeira questão: quais seriam as características dessas dinâmicas e como considerá-las?

Quanto à variação de porosidade, a previsão dessa dinâmica quase sempre oferece menor grau de complexidade, pois dependerá, em grande parte, das tensões induzidas, a menos que ocorram fenômenos, como o do colapso ligado à perda de estabilidade estrutural do solo, e da expansão, que pode ocorrer em função de alterações na condição de hidratação. Já a dinâmica da umidade depende de uma variedade de fatores de difícil controle, como precipitação, temperatura, grau de impermeabilização de infiltração da água da chuva e de águas servidas. Mascarenha (2003), após uma série de tentativas de avaliação dos resultados de provas de carga com base em perfis de sucção estimados a partir de curvas características de retenção de água, sugere o uso do índice de umidade mensal como elemento de avaliação da capacidade de carga de estacas em perfil de solo não saturado. Se os resultados das provas de carga por ela analisadas se relacionaram bem com o índice de umidade, que ajustes devem ser realizados para que seja possível o uso da influência da própria sucção no comportamento mecânico da interação solo-estrutura de fundação? Sendo o perfil de umidade dotado de certa dinâmica ao longo do ano (Mascarenha 2003) como considerar o impacto da histerese na sucção e suas consequências para a interação solo-estrutura de fundação?

Outra questão que merece ser colocada no caso das fundações escavadas em obras civis assentes em solos não saturados diz respeito à realização de provas de carga. Em quanto tempo ocorre o equilíbrio entre a umidade do maciço e a umidade do solo junto à fundação que é ampliada quando da concretagem? Qual o impacto dessa variação no comportamento da estaca?

Voltando à questão do colapso, ele ocorrendo ou sendo passível de ocorrer, seriam relevantes apenas os deslocamentos dele oriundos? Qual seria a importância dos recalques pós-colapso oriundos da ação da sucção na estrutura do solo rompida? Um solo que entrou em colapso por aumento do grau de saturação estaria isento de novas perturbações estruturais de ordem colapsável? Dependendo do solo, uma mudança posterior da química do fluido de saturação poderia ampliar o colapso?

A Figura 13 (Camapum de Carvalho 2004), obtida para um solo submetido a uma tensão vertical igual a 24 kPa em uma célula oedométrica, permite que se faça uma reflexão mais ampla sobre essas questões colocadas quanto ao colapso. Nessa figura, em um primeiro momento, verifica-se a ocorrência de colapso devido à saturação do solo, ou seja, devido à redução da sucção atuante à zero. Retirada a água da célula oedométrica e permitindo-se a desidratação do solo por ação da atmosfera, verifica-se, em seguida, a ocorrência de recalque oriundo da atuação da sucção. Em seguida, o solo foi novamente imerso, mas, agora, com um fluido contendo o defloculante hexametáfosfato de sódio, o que deu origem à ampliação do colapso estrutural do solo. Procedeu-se, então, a uma nova retirada da água da célula oedométrica e permitiu-se a desidratação do solo por ação da atmosfera. Nessa fase, os resultados mostram a ocorrência de recalque oriundo da atuação da sucção ainda maior que o registrado anteriormente, refletindo a ampliação do efeito da sucção quando a estrutura foi complementarmente comprometida pela ação do defloculante químico.

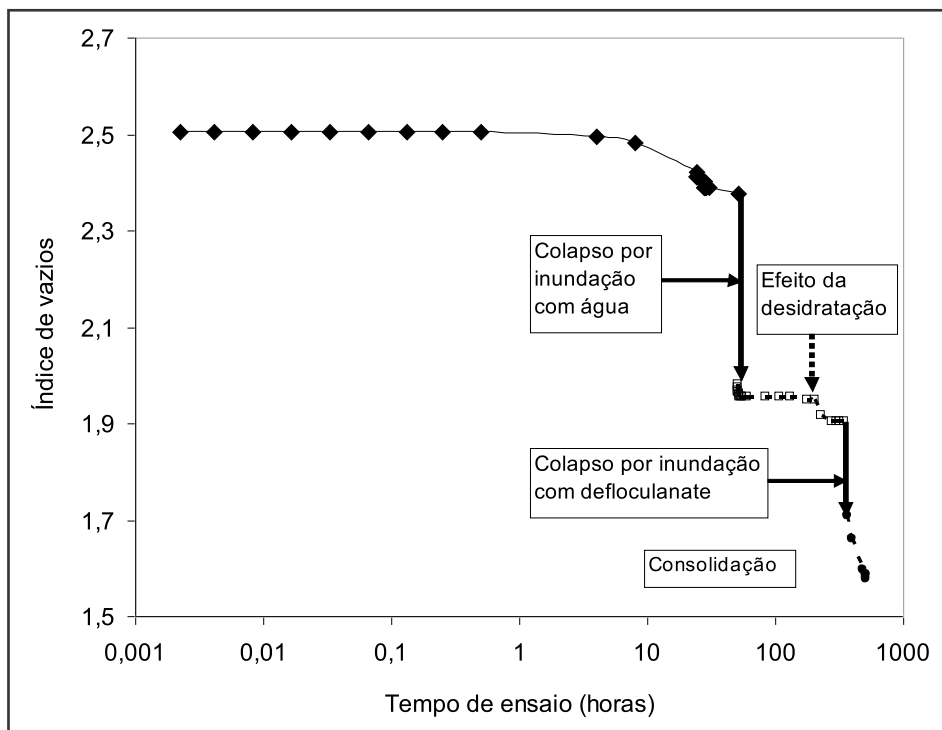


Figura 13 – Variações do índice de vazios em um solo submetido ao colapso (Camapum de Carvalho, 2004)

Os resultados obtidos por Ayala (2020), mostrando o impacto da cal hidratada na estabilidade textural de um solo profundamente intemperizado, e os resultados de análise granulométricas obtidos por Wanderley Neto (2020), indicando que esse mesmo solo em condições não saturadas presentes na circunvizinhança de uma microestaca de concreto moldada *in locu* tinha suas agregações instabilizadas, conduzem à pergunta: a sucção presente no solo que atua captando compostos químicos da fundação concretada *in situ* poderia, a médio e longo prazo, contribuir para a piora da interação solo estrutura? Quais seriam os papéis das sucções osmótica e matricial nesse processo de captação de compostos químicos do concreto?

Além dessas, é evidente que outras questões poderão ser colocadas para reflexão, mas espera-se que não só elas como as respostas a elas sejam ampliadas com o estudo e uso dos conceitos de solos não saturados na prática da engenharia de fundação. Por exemplo, embora não se tenha dado maior ênfase aos solos não saturados, como fundação de aterros, não seria o entendimento do seu comportamento a base para se evitar problemas nos aterros de acesso a viadutos?

5.7 Os solos não saturados em projetos de barragem

É provável que os projetos e construção de barragens de terra e enrocamento sejam os que mais reflexões exigem pela dinâmica por que passam as propriedades e o comportamento dos solos e enrocamentos ainda em estado não saturado e quando submetidos à saturação. Por exemplo, como considerar a geração de pressão neutra positiva na base dos maciços em função da própria construção? É evidente que a resposta não pode ser a simples consideração da pressão neutra como uma fração das tensões induzidas, pois, nesse caso, a questão poderia ser ampliada: para até onde irão as pressões neutras geradas? E onde elas não chegaram a serem geradas, qual foi o impacto no comportamento mecânico do solo?

Outra questão que pode ser colocada diz respeito à ascensão capilar em núcleos de barragens quando do enchimento. Ora, se o solo se encontra, devido à compactação e eventual desidratação, com uma sucção capilar elevada, na fase inicial, a zona de saturação deve ir além do previsto para a linha freática, mas como considerar esse efeito e quais suas consequências para o projeto? Além disso, se a barragem apresenta formato curvo em planta, como considerar o efeito dessa morfologia sobre o fluxo e sobre os drenos?

Embora outras questões possam ser colocadas no âmbito dos solos não saturados, uma última merece ser posta para maior reflexão: qual o impacto da geração de pressão neutra positiva na fase ar presente em enrocamentos e solos de margem de reservatório sobre sua degradação quando submetidos a frentes de saturação?

5.8 Os solos não saturados em projetos de estruturas de pavimento

As estruturas de pavimento, talvez, sejam as obras de engenharia que mais se submetem à dinâmica climática, tendo em vista o fato de que os solos nelas envolvidos, estrutura de pavimento e subleito, são relativamente superficiais. Além do aspecto umidade, que varia com as condições climáticas, a própria variação da temperatura assume relevância significativa não só para o comportamento da obra como para a sua própria execução, pois as condições de estudo de laboratório são geralmente distintas das de campo. Os resultados apresentados por Collantes (2022) sobre a influência da temperatura no comportamento mecânico e na própria curva de compactação, como mostram as Figuras 14a e 14b, inclusive indicando que a influência depende do tipo de solo, deixam aqui a questão: como considerar a influência da temperatura no comportamento mecânico dos solos e no próprio controle da execução da obra no caso dos solos compactados?

Outro aspecto que as coloca na vanguarda da dinâmica das propriedades e de comportamento não saturado diz respeito à grande variedade de morfologias da própria via, morfologias dos relevos nos quais se insere e também do uso e ocupação do solo em seu entorno, elementos indiscutivelmente relevantes para essa dinâmica.

Considerando-se tais dinâmicas, ficam as perguntas: nos pavimentos flexíveis, são considerados, na avaliação de fenômenos, como o da fadiga, os ciclos de energia impostos às estruturas de pavimento em função das variações de sucção/capilaridade? Nos pavimentos rígidos, tem sido avaliada a influência das alterações na deformabilidade dos materiais de fundação a partir dos bordos sobre o desempenho do revestimento? O impacto da geomorfologia da via e de seu entorno, por influenciar na umidade de equilíbrio

e, portanto, na sucção, tem sido considerado em estudos, projetos e execuções das estruturas de pavimento?

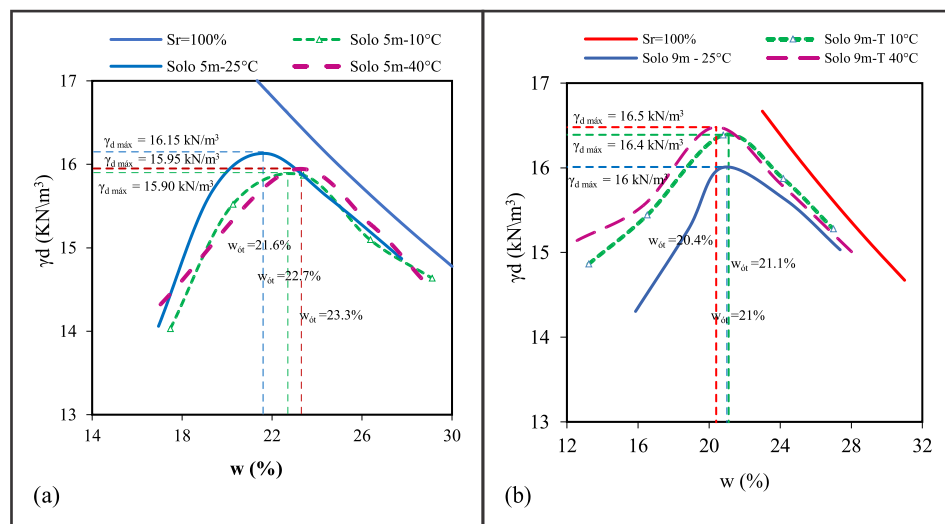


Figura 14 – Influência da temperatura na compactação dos solos compondo um perfil de intemperismo tropical: a) solo coletado a 5 m; b) solo coletado a 9 m

5.9 Os solos não saturados em projetos de túneis

Os túneis são, talvez, as obras de engenharia nas quais a influência da não saturação dos solos, quando presentes nesse estado, é mais marcante, embora, quase nunca considerada. Para realçar essa importância, apresentam-se, aqui, apenas algumas questões: em mantos de solos tropicais profundamente intemperizados, a escavação de túneis pode dar origem a processos de colapso estrutural do solo? Por quê? Como levar em consideração o efeito da sucção e de sua dinâmica nas alterações dos estados de tensões oriundas da escavação dos túneis? Em escavações realizadas abaixo do nível freático, sendo este rebaixado na frente de escavação, como fica o impacto das pressões neutras negativas que vão aparecer na zona rebaixada, assim como de sua dinâmica? Como o entendimento do comportamento do solo não saturado pode beneficiar a definição de processo construtivo mais apropriado?

5.10 Os solos não saturados em projetos de lagoas de estabilização

Os projetos e execução de lagoas de estabilização destinadas ao tratamento de águas servidas é, talvez, um dos casos em que se aplicam os conceitos de solos não saturados de modo mais amplo, pois envolvem desde questões de fluxo até questões pertinentes ao comportamento mecânico do solo, passando por problemas ambientais de contaminação do solo e da água de subsuperfície, além da carga química sobre a atmosfera, que termina

atingindo a sucção total por meio da interação solo-atmosfera. Contudo, serão colocadas, aqui, apenas algumas questões com base em um estudo de caso.

Certa feita, dois acadêmicos foram solicitados a prestarem auxílio por meio de extensão universitária a um projetista da região Sul do país, o qual estava desenvolvendo um projeto de Lagoas de Estabilização no Distrito Federal e, por prudência, como não conhecia bem os solos regionais, precisava inteirar-se melhor sobre os riscos de colapso estrutural dos solos de fundação da obra que estava a projetar.

Tratava-se de uma área de cerrado, medindo, aproximadamente, 200 m por 200 m, dotada de pequena declividade, 5% a 10%, com manto de intemperismo espesso, na qual estava prevista a implantação de algumas lagoas de estabilização com parte em corte e parte em aterro de modo a aproveitar a declividade do terreno natural e não necessitar a importação de material. Os acadêmicos sugeriram a realização de estudos em três perfis de solo distribuídos diagonalmente do extremo de maior altitude para o de menor. Os estudos compreenderiam apenas ensaios de granulometria com e sem o uso de defloculante e ensaios de colapso duplo oedométricos, pois, na parte de aterro, a sobrecarga variava até atingir a zona de corte. Cabe salientar que os estudos foram realizados na estação seca, mas a previsão da execução das obras era para o período chuvoso, de dezembro a março. Aqui, já cabem duas perguntas: quando usar o ensaio duplo oedométrico e quando usar ensaios de colapso sob tensão controlada? Quando usar ensaios oedométricos e quando usar ensaios triaxiais?

Feitos os estudos, em um dos extremos, as análises granulométricas com e sem o uso de defloculante não apresentaram diferenças, mas depreendia-se, pela diferença entre os ensaios oedométricos realizados com e sem inundação, que o colapso por inundação nesse local seria significativo. No outro extremo do terreno, ocorreu exatamente o oposto em ambas as análises, granulométrica e de colapso. Para surpresa do projetista, os acadêmicos recomendaram tranquilidade quanto ao problema de colapso para o extremo onde o solo apresentou colapso por inundação, e, para o outro, onde indícios de possibilidade de colapso não foram visualizados, nos ensaios duplos oedométricos, recomendaram cautela e a impermeabilização das Lagoas de Estabilização. Com base nos conhecimentos adquiridos ao longo deste livro ou mesmo de outros que já possuía, fica neste final de capítulo, a questão para o leitor: por que os acadêmicos fizeram tais sugestões que chegaram a surpreender o projetista? Estaria a verdadeira prática da engenharia fundamentada na experiência ou na reflexão? A resposta a essa última questão é, certamente, o caminho para uma engenharia melhor, com mais qualidade.

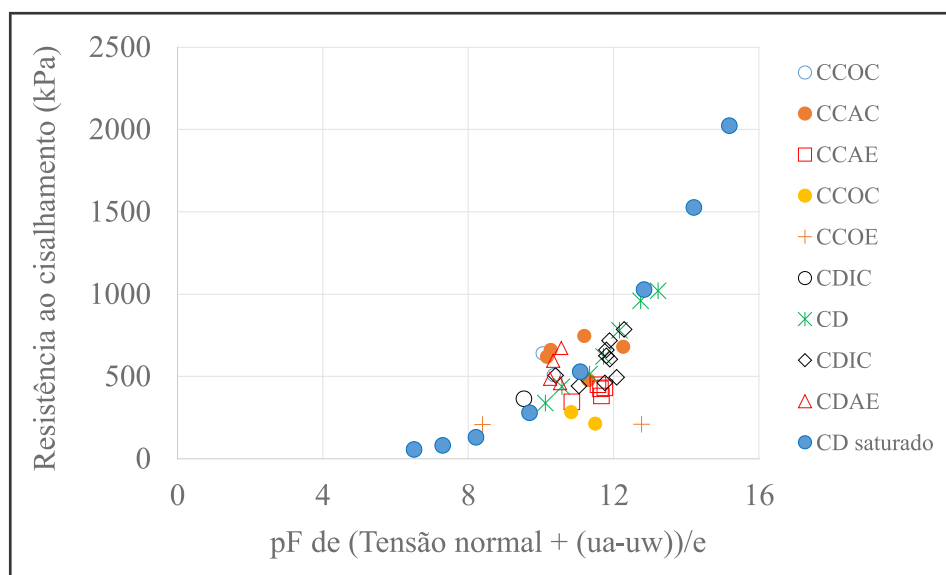
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Buscou-se, neste capítulo, colocar algumas questões para reflexão sobre as propriedades e o comportamento dos solos não saturados, na certeza de que muitas delas encontrarão respostas neste livro e outras servirão para aguçar a busca e novas reflexões.

Além da necessidade de um maior estreitamento entre os estudos voltados para os solos não saturados e aqueles endereçados aos solos saturados, pois as propriedades de ambos sofrem influência das variações de energia, da dinâmica espacial e temporal, a ampliação do alcance dos estudos das propriedades e dos comportamentos dos solos não

saturados requer estabelecer maior estreitamento entre os estudos experimentais e a modelagem numérica.

O estudo dos solos não saturados não deve se distanciar do estudo dos solos saturados até porque o que está em estado não saturado pode passar a saturado e vice-versa. Pensar o comportamento do solo em ambos os estados em termos de energia parece ser o melhor caminho para se chegar ao entendimento do comportamento do solo como um todo. A Figura 15, obtida a partir dos resultados apresentados por Camapum de Carvalho (1985), com dados oriundos de ensaios de cisalhamento direto realizados sobre o solo em estado saturado e diferentes tipos de ensaio realizados sobre o mesmo solo em estado não saturado aponta nesse sentido, indicando que o efeito da sucção/capilaridade se soma ao da tensão. Destaca-se que, para esses resultados, os valores de sucção foram estimados a partir de curvas características de retenção de água.



CC - ensaio triaxial a velocidade constante; CCA (E - extensão, C - compressão) - a partir de um estado de tensão anisotrópico; CCO (E - extensão, C - compressão) - a partir da origem; CDI (E - extensão, C - compressão) - ensaio triaxial consolidado isotropicamente; CDAE - Ensaio triaxial de extensão sobre corpo de prova consolidado anisotropicamente; CD ensaio de cisalhamento direto.

Figura 15 – Comportamento mecânico de um solo compactado

A Figura 16 apresenta as curvas de fluidez obtidas nos ensaios de limite de liquidez realizados para dois solos localizados próximos um do outro sendo, no entanto, um localizado sob um aterro sanitário e o outro fora da área de influência dos contaminantes provenientes desse aterro (Ramirez, 2016). Os resultados para os dois solos são bastante distintos e levam à questão: não seria relevante, em situações envolvendo estabilizações químicas e alterações químicas do meio, a consideração da influência da sucção osmótica no comportamento mecânico do solo afetado?

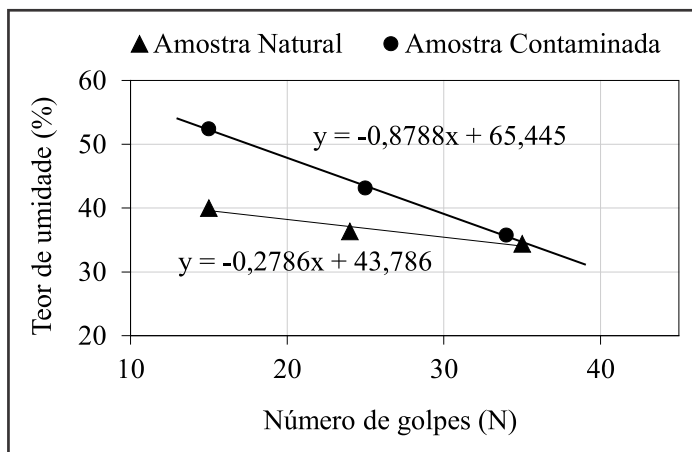
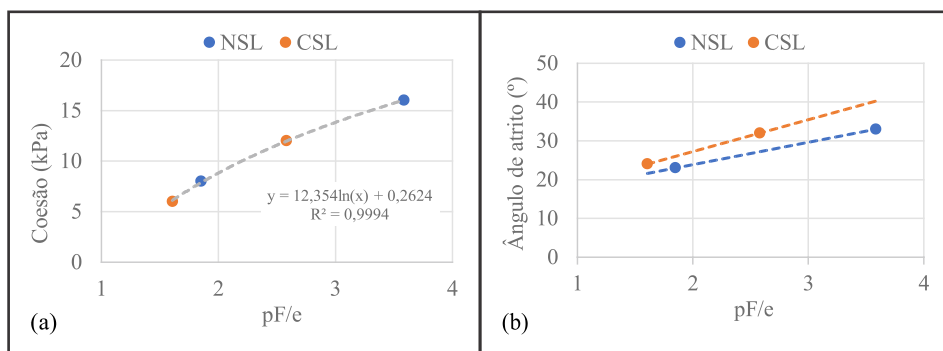


Figura 16 – Curvas de fluidez (modificado Ramirez, 2016)

Ainda fazendo-se referência à mesma linha de estudo, a Figura 17 apresenta análises de resultados publicados por Valência *et al.* (2022), considerando a proposta de avaliação comportamento mecânico em função da sucção matricial em pF (logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água) normalizada pelo índice de vazios apresentado por Camapum de Carvalho e Pereira (2001, 2002). Nessa Figura, NCL diz respeito ao solo não contaminado e CSL ao solo contaminado. Embora o número de resultados publicados nesse artigo seja pequeno, ele mostra que, em termos de coesão, onde predomina a influência da sucção matricial, os resultados se enquadram em uma mesma tendência (Figura 14a). No entanto, o atrito que depende mais diretamente das forças interativas entre a água que recobre o mineral e o mineral, intervindo aí, de modo direto, a sucção osmótica, mostra claramente a influência do contaminante no ângulo de atrito, ficando a questão: o impacto dos contaminantes no comportamento mecânico não necessitaria de estudos mais amplos nos domínios dos solos saturados e, em especial, dos solos não saturados?

Figura 17 – Parâmetros de resistência em função de pF/e (modificado, Valência *et al.*, 2022)

Fazendo-se a junção interpretativa entre os resultados apresentados na Figura 13 e na Figura 14, ficam aqui duas últimas questões que realçam a importância da ampliação das reflexões na Engenharia Geotécnica: 1) Em especial, quando de alterações químicas do meio, os limites de Atterberg não teriam um alcance mais amplo que a simples classificação do solo quanto à plasticidade? 2) Mesmo em se tratando de resultados obtidos para o solo em estado saturado, quando se fazem os ensaios de limite de liquidez (w_l) e de plasticidade (w_p), os limites de Atterberg não dariam uma boa sinalização para a relevância da sucção osmótica atuante nos solos em estado não saturado quando de alterações químicas do meio?

REFERÊNCIAS

- ARYA, L.M. & PARIS, J.F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. In: Soil Science Soc. Am. J., 45, pp. 1023-1030.
- AYALA, R.J.L. (2020). Melhoria de solos com fibras provenientes da indústria avícola. Brasília: Tese de Doutorado, G.TD-159/2020, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 272 p. <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/teses-e-dissertacoes>
- BISHOP, A.W. (1959). The principle of effective stress. Teknisk Ukeblad. 106:859e63.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1985). Etude du comportement mécanique d'une marne compactée. Tese de Doutorado. INSA, Toulouse, 181 p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2004). Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados. V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos, v. II. pp. 1-22.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA JR, G.F.N. (2005). Considerações sobre parâmetros de resistência de solos tropicais. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, Goiânia, pp. 183-191.
- CAMPAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA JR., G.P.N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. In: Soils and Rocks, 44(3). www.soilsandrocks.com
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S. (2004). Curva característica de sucção transformada. Solos e Rochas, (27)3: 231-242.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. & PEREIRA, J.H.F. (2001). Estudo do comportamento mecânico dos solos não saturados com base na sucção normalizada. IV Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre, pp.134-148.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & PEREIRA, J.H.F. (2002). Une approche pour la description des propriétés des sols non saturés. 3th International Conference On Unsaturated Soils, Recife, v. II, pp. 501-506.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., PEREIRA, J.H.F. & GUIMARÃES, R.C. (2002). Etfondrement de Sols Tropicaux. Third International Conference on Unsaturated Soils, Recife, v. II, pp. 851-856.

CAMPOS, I.C.O.; GUIMARÃES, E.M. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2008). Busca de entendimento da curva característica de materiais expansivos. XIV COBRAM-SEG, Búzios, pp. 1-8.

COLLANTES, R.C.P. (2022). Influência da temperatura na sucção e comportamento mecânico dos solos tropicais compactados. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 177 p

GITIRANA JR., G. F. N., CAMAPUM DE CARVALHO, J. & CORDÃO NETO, M. P. (2006). Previsão de curvas características de um perfil de solo colapsível de Brasília utilizando curvas granulométricas. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba, v. I, 6 p.

GRIM, R.E. (1962). Applied clay mineralogy. McGraw-Hill Book Company, New York, 422 p.

LIMA, M.C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 336 p. <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/teses-e-dissertacoes>

LIMA, M.R.C. (2018). Estudo de técnicas alternativas para monitoramento ótico de tensões, deformações e temperatura em obras de engenharia. Brasília: Tese de Doutorado G. TD – 145/2018, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 169 p. <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/teses-e-dissertacoes>

LIMA, R.M. (2022). Análise do comportamento mecânico de britas graduadas tratadas com cimento (BGTC). Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. 111 p.

MACHADO, S.L. & VILAR, O.M. (1998). Resistência ao cisalhamento de solos não saturados: Ensaio de laboratório e determinação expedita. Solos e Rocha, 2(21): 65-78.

MASCARENHA, M.M.A. (2003). Influência do recarregamento e da sucção na capacidade de carga de estacas escavadas em solos porosos colapsíveis. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. 141 p.

MASCARENHA, M.M.A. (2008). Influência da microestrutura no comportamento hidromecânico de uma argila siltosa não saturada incluindo pequenas deformações. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 158 p.

MELLO, V.F.B. (1973). Notas de aula da disciplina Mecânica dos Solos. EP-USP. Universidade de São Paulo.

MORAES, T.R.; NUNES, A.L.L.S. & LACERDA, W.A. (2005). Resistência ao cisalhamento de dois solos coluvionares lateríticos através de ensaios de: compressão diametral e cisalhamento direto. IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Salvador, v. I, pp. 193-204.

MUÑETÓN, C.M. G. (2013). Avaliação geotécnica de um perfil de solo tratado biotecnologicamente para fins de pavimentação. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 168 p.

OLIVEIRA, M.C.; FAGG, C.W.; CARVALHO, J.C. & CORREIA, C.R.M.A. (2012). Queimadas, práticas agrícolas, recuperação de áreas degradadas e a infiltração no Cerrado. CARVALHO, J.C.; GITIRANA JÚNIOR, G.F.N. & CARVALHO, E.T.L. (orgs.). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Faculdade de Tecnologia, Brasília, pp. 207-234.

PÉREZ, A.C. (2018). Influência de insumos agrícolas em propriedades físicas de solos tropicais. Brasília: Dissertação de Mestrado G.DM. – 298/2018, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 103 p. <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/teses-e-dissertacoes>

PESSOA, F.H.C. (2004). Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia Universidade de Brasília, 151 p.

RAMÍREZ, A.Q. (2016). Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en las propiedades geotécnicas de un suelo tropical. Medellín: Dissertação de Mestrado, Universidade Nacional da Colômbia, Faculdade de Minas, Departamento de Engenharia Civil.

SAMUELS, S.G. (1950). The effect of base Exchange on the engineering properties of soils. Bld. Research Sta. G. Britain, Note C176.

ROBERTSON, P. K.; VIANA DA FONSECA, A.; ULRICH, B.; COFFIN, J. (2017). Characterization of unsaturated mine waste: a case history. Canadian Geotechnical Journal, v. 54, n. 12, p. 1752-1761. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0129>.

SANTOS JR., O.F.; FREITAS NETO, O.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; CAMPOS, L.E.P.; SCUDELARI, A.C. & SEVERO, R.N.F. (2017). Erosão continental, costeira e de bordas de reservatórios. Goiânia: In Erosão em Borda de

Reservatório. Universidade Federal de Goiás, pp. 345-367. <https://gecon.eec.ufg.br/p/18785-publicacoes>

SENAHA, S.C.F. (2019). A quartzilização em perfis de intemperismo tropical. Brasília: Dissertação de Mestrado G.DM. – 332/2019, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 159 p.

SILVA, F. C. (2022). Estimativa de curvas características de solos tropicais brasileiros via métodos indiretos. Dissertação de Mestrado G.DM. - 372/2022, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 236 p.

VALENCIA, Y.G. (2009). Influência da biomineralização nas propriedades físico – mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 183 p.

VALENCIA, Y.G.; FARIAS, M.M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. & CORDÃO NETO, M.P. (2007). Determinação dos parâmetros da envoltória de ruptura em solos não saturados a partir de diversos ensaios simples de laboratório. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Salvador, v. I, pp. 339-342.

VALENCIA, Y.G.; RAMIREZ, A.Q. & VALENCIA, L.A.L. (2022). A laboratory methodology for predicting variations in the geotechnical parameters of soil exposed to solid waste leachates in the field. In. ELSEVIER, Results in Engineering, Volume 14, junho de 2022, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100398>

VARGAS, M. (1978). Introdução à mecânica dos solos. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 509 p.

VILAR, O.M. & RODRIGUES, R.A. (2007). Métodos expeditos para previsão da resistência de solos não saturados e identificação de solos colapsíveis. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Salvador, v. II, pp. 575-592.

WANDERLEY NETO, R.V. (2020). Estudo experimental de interfaces solo-concreto no contexto de solos não saturados. Brasília: Dissertação de Mestrado G.DM. – 344/2020, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 183 p. <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/teses-e-dissertacoes>

YEO, Y.S. (2011). Characterisation of cement treated crushed rock basecourse for western australian roads. Tese de doutorado. School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University. 340 p.

YEO, Y.S.; JITSANGIAM, P. & NIKRAZ, H. (2011). Moisture susceptibility of cement stabilised basecourse. In Proceedings of the 7th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology, pp. 299-309.

