

Capítulo 10

A CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE MATERIAIS POROSOS

Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
Fernando Antônio Medeiros Marinho
Miguel Angel Alfaro Soto

1. INTRODUÇÃO

O solo, na condição saturada, é constituído por um sistema que possui duas fases, a líquida e a sólida. Nessas condições, todo o comportamento do solo pode ser inferido com suficiente acurácia por meio do princípio das tensões efetivas. Os parâmetros de resistência, compressibilidade e condutividade hidráulica são diretamente associados com o índice de vazios, com as tensões efetivas e com a história de tensões efetivas. Quando o solo está na condição não saturada, uma fase adicional passa a fazer parte do sistema, e essa fase, gasosa, exige outra visão para a previsão do comportamento do solo. O comportamento do solo na condição não saturada exige a compreensão da distribuição, retenção e liberação da água nas diversas situações às quais o solo pode estar sujeito. Essas situações podem ser de ordem mecânica ou ambiental. A água pode mover-se para dentro ou para fora do solo por alteração no estado de tensão externo e/ou por questões ambientais, tais como infiltração e/ou evaporação.

A forma como se dá a presença da água no interior do solo pode ser representada pela curva de retenção de água. A curva de retenção consiste na relação entre a quantidade de água presente no material poroso e o estado energético da água. Pode-se afirmar que a maioria dos processos em solos não saturados pode ser, pelo menos em parte, compreendidos em função da curva de retenção. Fredlund (2002) e Fredlund (2006) se referem à curva de retenção como a propriedade chave para a implementação da mecânica dos solos não saturados na prática da engenharia. A curva de retenção é, de fato, a propriedade mais importante do solo não saturado.

Como reflexo da sua importância para a mecânica dos solos não saturados, existe uma vasta quantidade de publicações na literatura técnico-científica a respeito da curva de retenção, principalmente em língua inglesa. Destaca-se, como referência introdutória ao tema, o capítulo sobre curvas de retenção do livro publicado por Fredlund *et al.* (2012). A literatura brasileira sobre o tema também oferece importantes contribuições. O tema cur-

va de retenção é tratado com frequência, por exemplo, nos anais dos Simpósios Brasileiros de Solos Não Saturados.

Este capítulo não tem pretensão de apresentar um apanhado completo a respeito do tema, mas sim apresentar os principais conceitos, em nível introdutório. Por isso, serão sempre indicadas referências relevantes que poderão oferecer material complementar.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A relação entre a quantidade de água no solo e seu estado de tensão depende de como essas duas grandezas são representadas. Para dar um exemplo relativamente simples, a curva de retenção de um material compressível apresenta formato diferente utilizando umidade gravimétrica ou grau de saturação, sucção matricial ou sucção total. Da mesma forma, diferentes informações são obtidas ao se representar a curva de retenção de diferentes maneiras. Dessa forma, é importante definir como as variáveis de estado são representadas, o que será feito a seguir.

Os capítulos 5 e 9 trataram, em detalhe, de temas como índices físicos e potenciais da água no solo. Esses conceitos são fundamentais, pois, a partir deles, são definidas diferentes formas de examinar e interpretar a capacidade de retenção de água de um material poroso. Apesar de esses tópicos terem sido tratados em capítulos anteriores, faz-se necessário o reexame de alguns desses conceitos, explicando-se sua relevância para a curva de retenção.

2.1 Relações físicas para a quantidade da água armazenada

As relações físicas dos solos são necessárias para as análises relacionadas com o comportamento mecânico e hidráulico dos solos. Muitas vezes, as relações entre os índices físicos determinam aspectos do comportamento do solo, de forma que o entendimento dessas relações permite a correta interpretação de resultados de ensaios de resistência, compressibilidade, condutividade e retenção de água em meios porosos. A seguir, são apresentados, de forma resumida, os índices mais utilizados para a representação da curva de retenção e suas aplicações.

Teor de umidade gravimétrico

$$w = \frac{V_w \rho_w}{V_s \rho_s} = \frac{M_w}{M_s} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que: w é a umidade gravimétrica; V_w é o volume de água; ρ_w é a massa específica da água; V_s é o volume de sólidos; ρ_s é a massa específica dos sólidos; M_w é a massa de água; e M_s é a massa de sólidos.

A umidade gravimétrica é o parâmetro mais simples de ser obtido e é utilizado nas curvas de retenção e nas curvas de contração. Os parâmetros seguintes envolverão a necessidade de medição do índice de vazios do material, determinação relativamente menos simples.

Teor de umidade volumétrico

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que: θ é a umidade volumétrica; e V_t é o volume total.

O teor de umidade volumétrico também é utilizado nas curvas de retenção e na previsão da permeabilidade de solos na condição não saturada. Apesar de ser relativamente menos difundido no meio geotécnico, o teor de umidade volumétrico é muito empregado em análises de percolação em meios não saturados, sendo comum seu emprego nas formulações de balanço de massa de água.

O teor de umidade volumétrico permite, por exemplo, uma análise simples da capacidade de retenção e do volume disponível para infiltração em um perfil de solo. Nesse sentido, a quantidade de água no perfil pode ser obtida da seguinte forma:

$$h_w = \theta h_t \quad (\text{Eq. 3})$$

em que: h_w representa a “altura de água” armazenada em uma coluna de material; e h_t representa a altura total da coluna.

A Figura 1 ilustra o significado do teor de umidade volumétrico e sua relação com o conceito de altura de água no solo. A associação de tal altura com um volume qualquer de precipitação pode ser facilmente realizada. Uma coluna de 1 metro de profundidade submetida à infiltração de 100 mm de precipitação sofre um acréscimo de 10% no seu teor de umidade volumétrico. Da mesma forma, pode-se avaliar qual a quantidade de infiltração, Δh_w , necessária para saturar completamente uma coluna com teor de umidade volumétrica inicial θ_0 :

$$\Delta h_w = (n - \theta_0) h_t \quad (\text{Eq. 4})$$

em que: $n = V_v/V_t$ é a porosidade, correspondendo ao teor de umidade volumétrica do solo saturado.

A partir de simples análises como essas, é possível perceber que volumes significativos de precipitação, frequentemente superiores aos valores típicos de uma determinada região, seriam necessários para preencher completamente todos os vazios de um perfil de solo. Por exemplo, 1500 mm de infiltração, valor próximo da precipitação acumulada anualmente, em muitas regiões do Brasil, é capaz de preencher os vazios de 3 m de um solo com porosidade de 50%, se este estivesse inicialmente completamente seco. Em um cenário mais realista, um perfil com teor de umidade volumétrica inicial correspondente à metade do teor máximo teria seus poros saturados ao longo de 6 m. Essas análises são, obviamente, simplificadas e não levam em consideração distribuições não homogêneas ao longo da profundidade, como as apresentadas por Perotti *et al.* (2022), contudo, apesar da simplicidade, permitem avaliar a ordem de grandeza das variações de umidade esperadas no perfil.

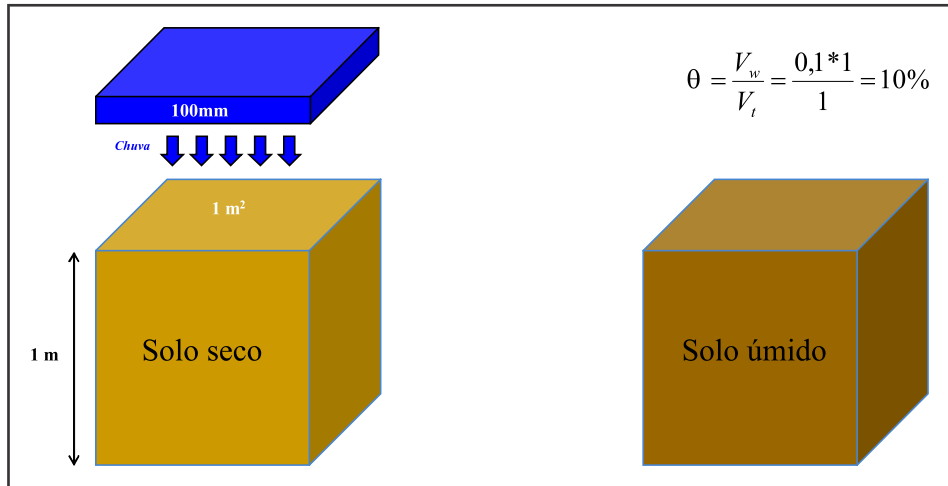


Figura 1 – Ilustração do teor de umidade volumétrica e da altura de água no solo

Grau de saturação

$$S = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{V_w}{V_v} \quad (\text{Eq. 5})$$

em que: V_a é o volume de ar; e V_v é o volume de vazios do solo.

O grau de saturação é fundamental para a definição do valor de entrada de ar e também muito utilizado para a previsão da permeabilidade do solo não saturado. Solos compressíveis quando submetidos a aumento de sucção podem sofrer redução da quantidade de água armazenada nos poros devido à redução do volume de vazios e à compressão do esqueleto sólido submetido ao efeito da sucção. Nesses casos, enquanto os teores de umidade gravimétrico e volumétrico apresentam decréscimo, o grau de saturação pode permanecer aproximadamente inalterado.

Relações entre os índices físicos

Algumas importantes relações entre os índices físicos descritos anteriormente podem ser determinadas:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = nS = w \frac{\rho_d}{\rho_w} = G_s (1-n)w \quad (\text{Eq. 6})$$

em que: θ é a umidade volumétrica; $\rho_d = M_s/V_t$ é a massa específica seca; V_t é o volume total; e $G_s = \rho_s/\rho_w$ é a densidade relativa.

Observa-se, na expressão anterior, que o teor de umidade volumétrico é igual à porosidade quando o solo está saturado.

Outra relação entre índices físicos do solo significativamente importante e que se relaciona diretamente com as representações da curva de retenção é a apresentada na equação a seguir:

$$Se = wG_s \quad (\text{Eq. 7})$$

em que: $e = V_v/V_s$ representa o índice de vazios e V_s representa o volume de sólidos.

As diversas relações entre esses índices podem ser plotadas em conjunto com os dados experimentais da curva de retenção, facilitando sua interpretação. Pode-se observar que, uma vez conhecida a porosidade do material e o peso específico dos sólidos, qualquer um dos três índices utilizados para quantificar a quantidade de água no material pode ser calculado a partir do conhecimento de um dos demais. O papel da compressibilidade no formato da curva de retenção fica evidente ao se examinarem as relações entre os índices físicos.

2.2 O estado de tensões

Conforme discutido anteriormente, a capacidade de retenção de água em um material poroso como o solo depende do seu estado de tensões. O estado de tensões em materiais não saturados foi e continua sendo tema de pesquisa e discussão no meio técnico científico. Fredlund e Rahardjo (1993) apresentam uma extensa revisão bibliográfica sobre esse tema, mostrando a evolução, desde os anos 1950, das propostas de como descrever o estado de tensões.

Pode-se afirmar que existem duas correntes de pensamento quanto à forma de representação do estado de tensões em materiais não saturados. A primeira, mais antiga, é baseada na busca de uma variável de tensões única, a exemplo do princípio de tensões efetivas de Terzaghi. A segunda corrente, muito difundida a partir do trabalho de Fredlund e Morgenstern (1977) e de outros que se seguiram, considera inadequada a tentativa de se resumir o estado de tensões no solo em função de uma única variável. Têm-se, nesse caso, a necessidade de se considerar duas variáveis de estado de tensão: a tensão total líquida, $(\sigma - u_a)$ e a sucção matricial, $(u_a - u_w)$.

Definição do estado de tensões

De maneira mais formal e completa, têm-se os estados de tensão definidos pelas tensões em planos ortogonais em um ponto qualquer da massa de solo. No caso bidimensional, por simplicidade, as variáveis de tensão são dadas pelos seguintes tensores:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\begin{pmatrix} u_a - u_w & 0 \\ 0 & u_a - u_w \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 9})$$

As poropressões atuam em termos de tensões volumétricas (ou seja, confinantes) e, naturalmente, não possuem papel na definição de estados de cisalhamento. A partir do estado de tensões genérico de um material não saturado, pode-se realizar a análise do estado de tensões de forma semelhante ao que se faz para materiais saturados. Pode-se definir o estado principal de tensões e também definir invariantes de tensão para se quantificar o nível médio de confinamento, o nível médio de cisalhamento e o desvio do estado de tensões com relação ao estado ortotrópico. Desse ponto em diante, será retomada a representação simplificada das variáveis de estado de tensão, fazendo-se referência ao estado completo apenas quando necessário.

Condições limites para o estado de tensões

É importante verificar que, conforme a sucção matricial se reduza, se ela tender a zero, têm-se as seguintes identidades:

$$u_a = u_w \quad (\text{Eq. 10})$$

$$(\sigma - u_a) = (\sigma - u_w) \quad (\text{Eq. 11})$$

Dessa forma, verifica-se que a tensão efetiva, $(\sigma - u_w)$, é um caso particular das duas variáveis de tensão independentes.

As duas variáveis de tensão do solo não saturado e a tensão efetiva devem também obedecer a condições limites, quais sejam:

$$(u_a - u_w) \geq 0 \quad (\text{Eq. 12})$$

$$(\sigma - u_a) \geq 0 \quad (\text{Eq. 13})$$

$$(\sigma - u_w) \geq 0 \quad (\text{Eq. 14})$$

Situações que violem tais condições são fisicamente improváveis ou até mesmo impossíveis. Não é possível haver poropressões de água maiores do que poropressão de ar. Em tal situação, a água ocupa parte dos volumes preenchidos pelo ar e ambas as pressões são equalizadas. Similarmente, não é possível uma situação na qual a poropressão de ar supere significativamente a tensão total do solo, caso contrário, resistências coesivas poderiam ser eventualmente vencidas, causando a desagregação do esqueleto sólido. A situação limite para tensões efetivas é considerada, por exemplo, quando é avaliada a possibilidade de formação do fenômeno de areia movediça.

2.2.1 A pressão da água e a sucção

Apesar de a capacidade de retenção de água de um material poroso qualquer ser função das duas variáveis de tensão, $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$, o papel da sucção matricial é mais significativo. Para compreender como se dá o papel da sucção matricial, é importante compreender o estado da água no poro. A água é encontrada na natureza em três estados:

sólido, líquido e gasoso. Esses três estados são representados no diagrama de fases, no qual está definido cada um desses estados em função da pressão e da temperatura. A Figura 2a apresenta esquematicamente o diagrama de fases da água. Ao se reduzir a pressão, sob temperatura constante, a água poderá sair do estado líquido para o estado gasoso. Esse fenômeno é denominado vaporização. Por outro lado, sabe-se que a água possui resistência à tração (Young, 1989) e, sob certas condições, mantém-se em estado líquido mesmo para pressões baixas, como ilustrado na Figura 2b. No solo, a água encontra as condições para se manter no estado líquido e sob pressão abaixo do zero absoluto.

A pressão de água no solo abaixo da pressão atmosférica corresponde exatamente à sucção matricial. É importante observar que a pressão atmosférica não tem papel na sucção matricial:

$$(\bar{u}_a - \bar{u}_w) = [(u_a + u_{atm}) - (u_w + u_{atm})] = (u_a - u_w)$$

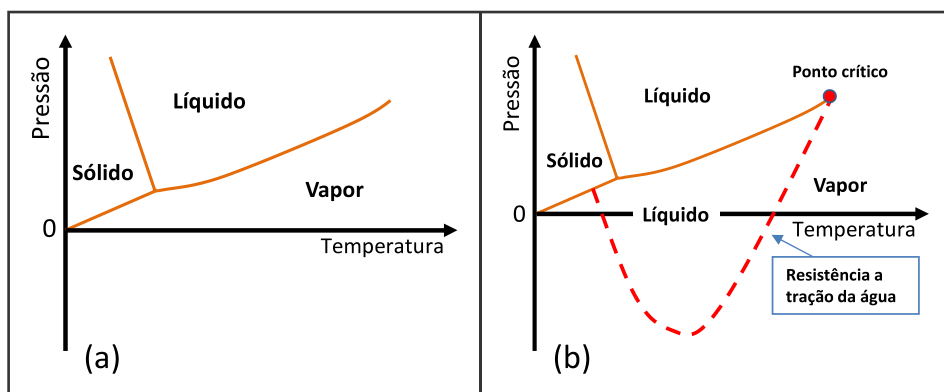


Figura 2 – Diagramas das fases: a) tradicional; b) água na condição metaestável sob pressões abaixo do zero absoluto

Por outro lado, a pressão atmosférica tem papel em outras situações, como a definição da pressão de cavitação em um sistema formado por água não perfeitamente aerada, como aquela, por vezes, encontrada em tensiômetros preparados de forma imperfeita.

De um ponto de vista mais geral, a pressão na água é apenas um de diversos fatores que estabelecem a energia na água armazenada em um material poroso. A água está submetida a diversos potenciais físicos e químicos. É comum dividir-se a sucção total, ψ , em dois componentes, o matricial devido à capilaridade, $(u_a - u_w)$, e o osmótico, π , devido à concentração de sais na água:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (\text{Eq. 15})$$

A sucção osmótica é, frequentemente, considerada constante quando envolve problemas com pequena amplitude de variação de teor de umidade. Sob esse argumento, a sucção osmótica é tratada como de pequena relevância em problemas práticos. Contudo, deve-se atentar para o fato de que, em problemas que envolvam contaminação de solos ou

que envolvam variações significativas de teor de umidade por evaporação de água, pode-se ter variação da sucção osmótica.

A Figura 3 apresenta a variação de sucção osmótica para diferentes concentrações salinas iniciais, calculada conforme indicado por Barbour (1998). Mesmo que o papel da sucção osmótica no comportamento mecânico seja considerado pequeno, a quantificação da sucção osmótica pode ser necessária quando curvas de retenção em termos de sucção total são determinadas. Afinal, é a partir da sucção total e dos valores conhecidos de sucção osmótica que se poderia determinar a sucção matricial.

A capilaridade é responsável por grande parte dos fenômenos de interesse, de forma que esse tema será tratado com maior detalhe no próximo item.

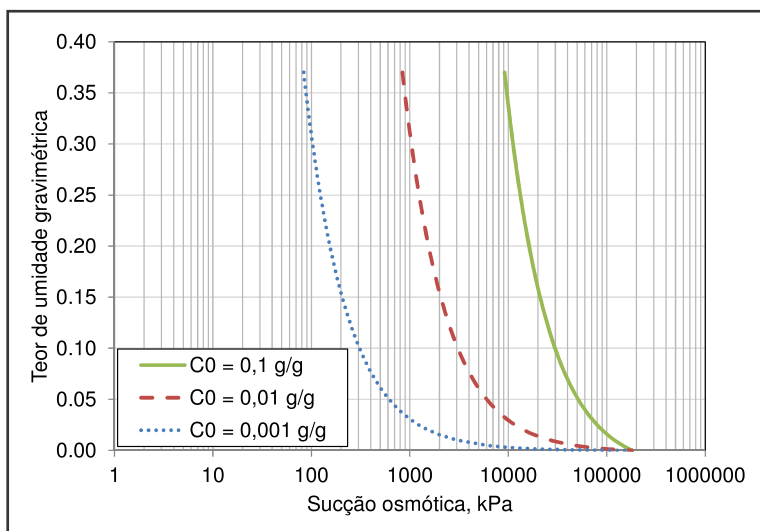


Figura 3 – Variação de sucção osmótica em função do teor de umidade gravimétrica para diferentes concentrações iniciais de sais

2.3 Capilaridade

Considere-se uma coluna de solo como a ilustrada na Figura 4. A coluna está imersa em água na parte inferior e não há entrada nem saída de água pela parte superior. Esse sistema entra em equilíbrio com o nível de água, gerando uma distribuição de pressão, como indicado no diagrama esquemático da Figura 4. Como será visto mais adiante, cada ponto da coluna poderá ter um valor de teor de umidade, que é função das características do solo e da sua posição no sistema. Isso representa a distribuição de água na coluna e pode ser convertido em curva de retenção de água para o material da coluna. Em outras palavras, cada ponto da coluna, representado por sua altura em relação ao nível de água inferior, possui uma pressão negativa igual a sua altura multiplicada pelo peso específico da água.

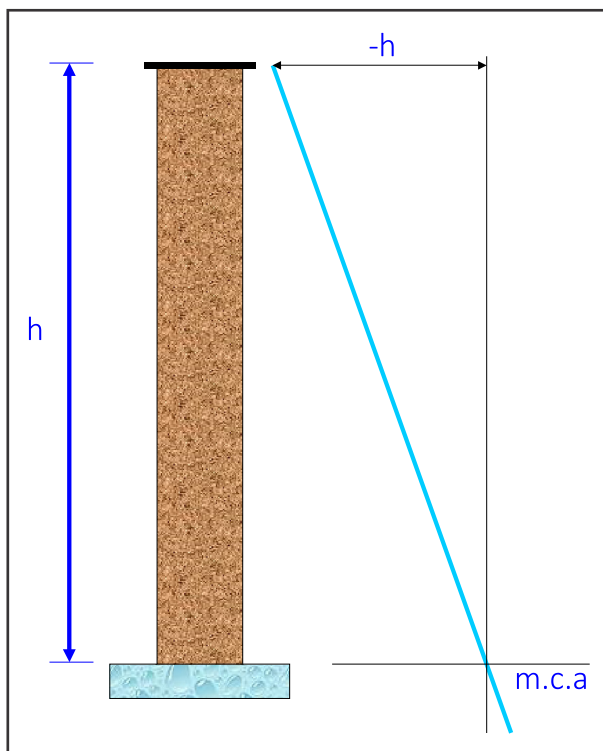


Figura 4 – Diagrama de distribuição de pressões para uma coluna de solo

A coluna ilustrada na Figura 5 oferece uma oportunidade para se compreender a importância da curva de retenção na distribuição de umidade ao longo de perfis e o papel do fenômeno da capilaridade. Em condições de equilíbrio com ausência de fluxo, a poropressão sempre terá a distribuição de pressão hidrostática indicada, independentemente do tipo de material que a coluna contenha. Já o teor de umidade dependerá das características do material. Na Figura 5, tem-se o diagrama descrito anteriormente, que representa um estado de equilíbrio e a variação do teor de umidade para três tipos de material poroso. A curva do material 1 indica que o material não é capaz de reter água e tem o teor de umidade reduzido logo acima do nível de água. Já a curva 3 mantém o mesmo teor de umidade até uma determinada altura, indicando que possui uma maior capacidade de reter água. A curva 2 apresenta um comportamento intermediário. É importante salientar que a manutenção do teor de umidade associada a grandes alturas indica um material mais fino, possivelmente, mais argiloso. Os materiais mais finos se mantêm saturados até alturas maiores. A curva de retenção pode ser obtida correlacionando-se a pressão com o teor de umidade na mesma altura. Para solos granulares, esse procedimento pode ser uma solução eficiente para se obter a curva de retenção, o que possibilita ainda a determinação da função de permeabilidade por meio de análise inversa em colunas monitoradas (por exemplo, Marinho & Pinto, 2002; Oliveira & Marinho, 2007).

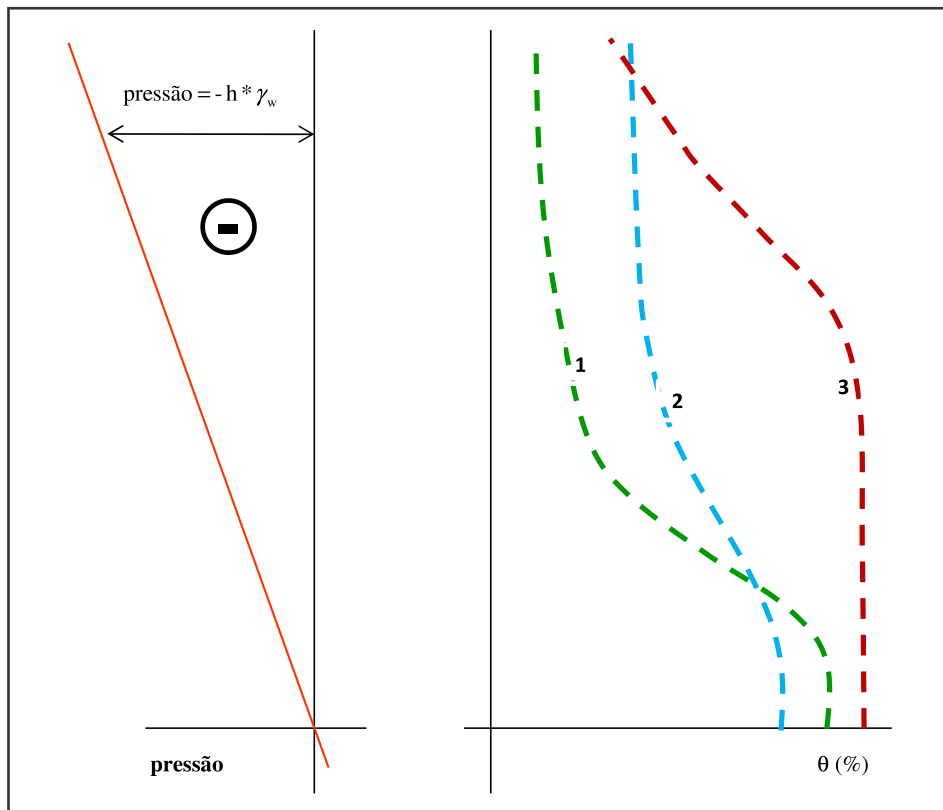


Figura 5 – Diagrama de pressão em uma coluna e variação de teor de umidade para três materiais

A ascensão da água na coluna da Figura 4 pode ser mais bem compreendida a partir da analogia desse fenômeno com o processo de ascensão de água em um tubo capilar, conforme ilustrado na Figura 6. A afinidade entre a água e o material do tubo é caracterizada pelo ângulo de contato, α , que define a direção da força de interação no contato sólido-líquido-gás. Um ângulo de contato nulo indica que o tubo é composto por um material perfeitamente hidrofílico, enquanto que um ângulo de 180° indicaria um material perfeitamente hidrofóbico. A ascensão capilar se dá apenas para materiais com ângulos de contato menores do que 90° , produzindo uma força T_s direcionada de forma ascendente. Solos são compostos por uma variedade de materiais, incluindo minerais e matéria orgânica. Os materiais que compõem os solos são predominantemente hidrofílicos.

A força T_s é conhecida como tensão superficial e é representada por unidades de força por comprimento. A tensão superficial assume um valor característico do fluido em questão. No caso da água pura a 20°C é igual a $72,75 \text{ mN/m}$. Wang e Fredlund (2003) apresentam uma revisão sobre o papel da tensão superficial e da película contrátil no comportamento da água no solo.

A altura de ascensão capilar, h_c , pode ser determinada fazendo-se o equilíbrio de forças verticais no sistema da Figura 6(a), obtendo-se:

$$h_c = \frac{2T_s \cos \alpha}{R_c \gamma_w} \quad (\text{Eq. 16})$$

em que: R_c é o raio do tubo capilar.

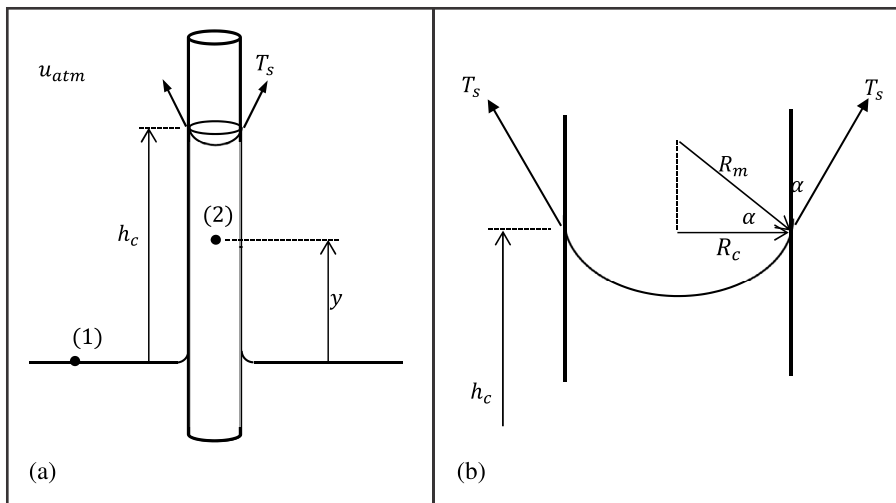


Figura 6 – Ascensão de água em um tubo capilar: a) sistema completo; b) detalhe do menisco

Considerando-se que o raio do capilar é relacionado com o raio do menisco pela fórmula $R_c = R_m \cos \alpha$, a altura de ascensão capilar pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$h_c = \frac{2T_s}{R_m \gamma_w} \quad (\text{Eq. 17})$$

Como a coluna de água erguida por capilaridade se encontra estática, a poropressão de água pode ser determinada em qualquer ponto do sistema, admitindo-se que a carga hidráulica é constante ao longo do sistema. Comparando-se, por exemplo, a carga hidráulica nos pontos 1 e 2, tem-se a poropressão de água em função da coordenada do ponto:

$$u_w(y) = -\gamma_w y \quad (\text{Eq. 18})$$

Finalmente, pode-se obter a sucção matricial no topo da coluna como sendo a diferença entre a poropressão de ar e de água:

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_m} \quad (\text{Eq. 19})$$

Uma generalização da equação de capilaridade para uma condição tridimensional, na qual o menisco possui dois raios de curvatura em direções ortogonais, é dada pela Equação de Laplace:

$$(u_a - u_w) = T_s \left(\frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{R_{m2}} \right) \quad (\text{Eq. 20})$$

A equação do capilar cilíndrico é um caso particular da Equação de Laplace, já que, no capilar cilíndrico, o menisco tem a forma de uma calota de esfera, com $R_{m1} = R_{m2}$.

Apesar de os capilares formados pelos vazios de materiais porosos, como o solo, não terem geometria perfeitamente cilíndrica, a análise do tubo capilar cilíndrico é uma aproximação que facilita o entendimento da capacidade de retenção de água por materiais porosos. Vários conceitos podem ser enumerados a partir da análise do comportamento da água no capilar cilíndrico:

- A máxima sucção matricial que um poro pode suportar sem drenar é inversamente proporcional ao seu raio, ou seja, quanto menor o poro, maior a sucção necessária para drenar a água desse poro.
- A sucção matricial pode ser determinada a partir do raio do menisco.
- O raio do menisco pode ser diferente do raio do poro caso o ângulo de contato seja maior que zero ou caso a sucção máxima possível não tenha se desenvolvido. Este último caso seria observado caso o tubo capilar não fosse erguido até uma altura que superasse a altura de ascensão capilar.

Sistemas porosos ideais, formados por esferas, podem oferecer uma visão mais próxima da condição da água capilar. Alves *et al.* (2020) apresentam uma avaliação de como a geometria do poro e o arranjo de esferas pode afetar a geometria dos meniscos e a sucção matricial correspondente.

3. FORMAS DE APRESENTAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO

A curva de retenção pode ser apresentada de diversas formas, sendo algumas delas ilustradas pela Figura 7. Os dados apresentados nas quatro figuras são da mesma curva. As diversas formas de representar uma curva de retenção são resultado de diferentes maneiras de apresentar a quantidade de água armazenada no solo e de representar a sucção. O termo genérico “sucção” é utilizado na figura, pois, nesse momento, não é relevante fazer referência ao tipo de sucção.

Na Figura 7(a), pode-se observar uma curva em termos de grau de saturação. A curva é apresentada com a sucção obedecendo a uma escala cujo valor inferior é arbitrado em função das menores sucções a partir das quais o solo começa a dessaturar. A máxima sucção pode ser arbitrada como sendo igual a 1.000.000 kPa, que corresponde, aproximadamente, ao valor teórico de sucção para o qual o solo se encontra completamente seco (Edlefsen e Anderson, 1943).

A Figura 7(b) apresenta a curva em termos de teor de umidade volumétrico. A diferença mais notável é o máximo valor de teor de umidade, que, nesse caso, corresponde

à porosidade do solo. O formato da curva permanece semelhante àquele da Figura 7(a) no caso de solos com relativamente baixa compressibilidade. Solos altamente compressíveis, como solos muito plásticos, apresentarão curvas com formatos que dependem da forma de representação da quantidade de água.

A Figura 7(c) mostra por que a apresentação da sucção em escala linear geralmente não é aconselhável. A tentativa de apresentar sucções que variam ao longo de várias ordens de magnitude em escala linear não é bem-sucedida. Pode-se dizer que se trata da mesma situação que exige a apresentação de curvas granulométricas utilizando dimensões de abertura de peneiras em escala logarítmica.

Finalmente, a Figura 7(d) mostra uma forma alternativa de representação da curva de retenção, na qual foi empregado o grau de saturação efetivo, definido como:

$$S_e = \frac{S - S_{res}}{1 - S_{res}} \quad (\text{Eq. 21})$$

em que: S_{res} é o grau de saturação correspondente à condição residual.

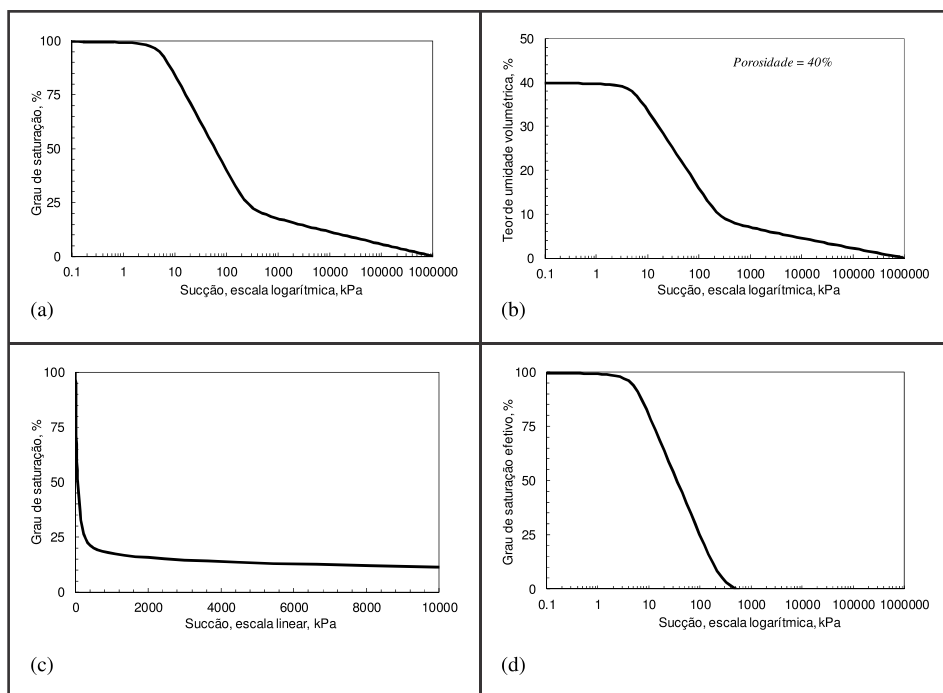


Figura 7 – Algumas formas de representação de uma curva de retenção:

- a) grau de saturação em escala linear e sucção em escala logarítmica;
- b) teor de umidade volumétrica; c) grau de saturação e sucção na escala linear;
- d) grau de saturação efetivo

O grau de saturação efetivo é uma das possíveis manipulações da representação da quantidade de água no solo, que tem por objetivo extrair informações adicionais sobre a capacidade de retenção do solo. No caso do grau de saturação efetivo, o interesse é saber qual é a porcentagem de água relativamente livre armazenada no solo. Nesse caso, admite-se que S_{res} representa a porcentagem de água que não é capaz de fluir facilmente, como água líquida. O grau de saturação efetivo é utilizado, por exemplo, na formulação de Brooks e Corey (1964) de previsão da permeabilidade de solos na condição não saturada.

De forma geral, curvas de retenção apresentam formatos definidos por parâmetros com significados físicos relativamente bem definidos. A Figura 8 apresenta uma curva de retenção que pode ser dividida em três trechos, definidos por três parâmetros:

Valor de entrada de ar, ψ_b ou $(u_a - u_w)_b$ – O primeiro trecho corresponde ao intervalo de sucção para o qual o material se encontra completamente saturado. Esse trecho estende-se até o valor de sucção, conhecido como “valor de entrada de ar”. Um dos possíveis significados físicos do valor de entrada de ar seria a máxima sucção que os maiores poros do material são capazes de suportar sem serem drenados. Essa relação faz referência à relação do tamanho de poro e raio de menisco com a sucção matricial.

Sucção residual, ψ_{res} ou $(u_a - u_w)_{res}$ – O segundo trecho da curva de retenção corresponde ao intervalo de sucção para o qual o solo sofre drenagem sob o efeito de aumento da sucção, sendo tal drenagem possível em termos de fluxo de água líquida, ou seja, a água a ser drenada está em uma condição relativamente livre nos poros do solo. Para sucções superiores à sucção residual, a remoção de água exige sucções expressivas e se dá predominantemente por processos de transferência de vapor.

Grau de saturação residual, S_{res} – Corresponde àquela quantidade de água armazenada nos poros do material em condição relativamente menos livre do que a água drenada na forma de fluxo líquido.

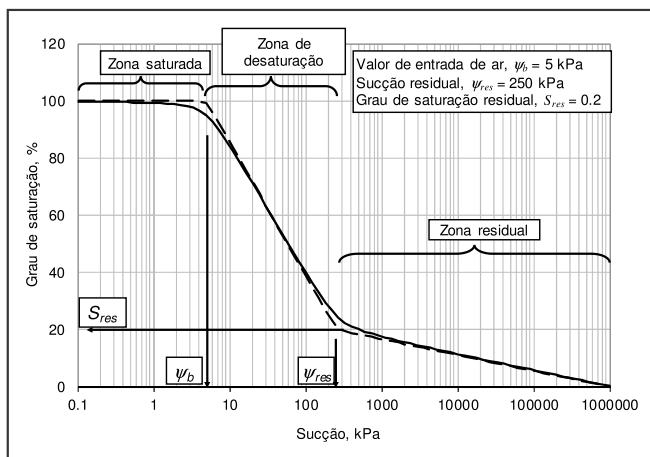


Figura 8 – Parâmetros de uma curva de retenção

O emprego de parâmetros com claro significado físico facilita o estudo da curva característica. Pode-se citar, como exemplo, a maior facilidade de emprego de equações de

ajuste (Gitirana Jr. & Fredlund, 2004). Além disso, tornam-se viáveis avaliações estatísticas dos parâmetros da curva de retenção (Gitirana Jr. & Fredlund, 2016).

Assim como a forma de representar a quantidade de água armazenada, o tipo de sucção empregado também resulta em curvas de retenção diferentes. A Figura 9 apresenta dados obtidos para um solo de Goiânia-GO, utilizando-se diferentes métodos de determinação da sucção. Os dados obtidos com um potenciômetro de ponto de orvalho e os dados obtidos com papel filtro sem contato correspondem a sucções totais. Os pontos experimentais obtidos pela técnica do papel filtro utilizando o papel em contato com o solo devem corresponder a sucções matriciais. Os dados de potenciômetro disponíveis não envolvem sucções relativamente baixas, em função da faixa ideal de funcionamento do equipamento empregado.

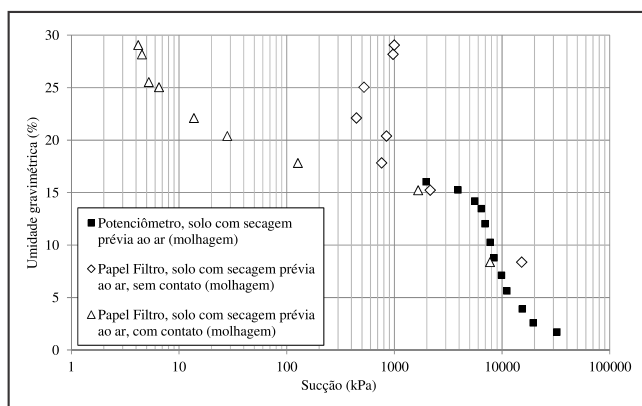


Figura 9 – Papel do tipo de sucção na representação da curva de retenção (Gomes *et al.*, 2015)

A diferença entre as curvas obtidas é notável. Os valores de sucção total obtidos pela técnica do papel filtro são superiores aos valores de sucção matricial, sendo que a diferença observada corresponde à sucção osmótica do solo. Os valores relativamente constantes de sucção total para o intervalo de umidade de 15 a 30% são resultado de uma sucção osmótica aproximadamente constante e com valor médio de 700 kPa, somada a sucções matriciais relativamente baixas.

Fredlund (2002) discute a forma de se empregar dados como os apresentados na Figura 9. Em princípio, dados de sucção matricial são os de maior interesse, de forma que os dados de papel filtro sem contato (i.e., dados de sucção total) assumem papel secundário na interpretação e utilização da curva de retenção. Por outro lado, os dados de sucção total para baixos teores de umidade, neste caso, menores do que 15%, confundem-se com os próprios dados de sucção matricial. Conforme Fredlund (2002), a composição de uma curva híbrida, que combina dados de sucção matricial e sucção total, é conveniente, pois os dados de sucção matricial são os de interesse para baixas sucções. Além desse aspecto, é importante ressaltar que algumas técnicas de medição (como o papel filtro) fornecem uma transição da sucção matricial para total, conforme observado por Marinho e Chand-

ler (1993) e Marinho e Gomes (2012). Ao mesmo tempo, as elevadas sucções encontradas para baixas umidades são necessárias, por exemplo, em análises envolvendo evaporação, situação na qual a sucção total é a variável que governa o processo.

4. ASPECTOS FÍSICOS E ELETROQUÍMICOS E A CURVA DE RETENÇÃO

Existem materiais que apresentam curvas de retenção com formatos diferentes daquele apresentado na Figura 8. A Figura 10 apresenta alguns formatos típicos de curvas de retenção apresentadas em termos de grau de saturação. Diferentes fatores físicos e eletroquímicos determinam o formato dessas curvas. Dessa forma, a discussão desses fatores será iniciada pela simples descrição de tais curvas.

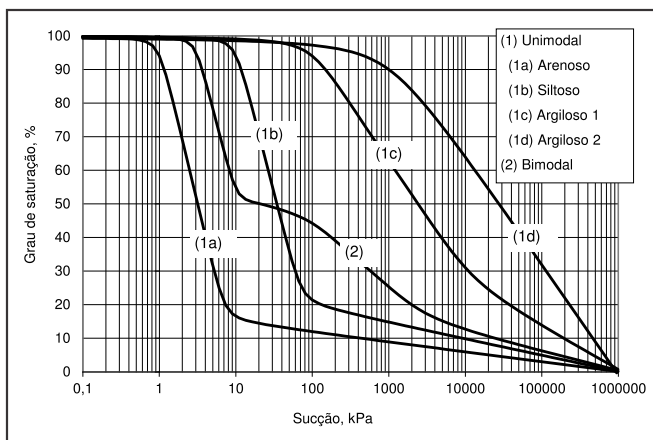


Figura 10 – Alguns formatos típicos de curvas de retenção (modificado de Gitirana Jr. & Fredlund, 2004)

As curvas da Figura 10 estão divididas em dois grupos. O primeiro grupo, das curvas unimodais, é assim denominado porque todas essas curvas apresentam um único trecho de dessaturação. Como consequência, a primeira derivada dessas curvas apresenta um formato de sino único. Esse formato se assemelha àqueles de distribuições de frequência unimodais, daí a denominação dada a essas curvas. A analogia com distribuição de frequência não é coincidência, pois, a partir da derivada da curva de retenção, pode ser avaliada a distribuição de frequências de tamanho de poros do material.

No primeiro grupo, têm-se alguns solos com formatos que obedecem ao formato sugerido pela Figura 8, com parâmetros já discutidos, mas destaca-se, nesse grupo, o segundo solo argiloso, que não apresenta grau de saturação residual aparente. Esse tipo de curva é frequentemente observado para certos materiais altamente plásticos.

O segundo grupo da Figura 10 é formado por um único material, denominado bimodal. Esse material apresenta dois trechos de dessaturação. Como consequência, a primeira derivada tem a aparência de uma distribuição de poros bimodal. A curva bimodal apresenta dois valores de entrada de ar, sendo o primeiro correspondente a uma família de poros

de dimensões relativamente maiores, e o segundo, a outra família de poros, menores. Serão discutidos, mais adiante, os fatores que podem levar a curvas de retenção desse tipo, já que solos com essas características são frequentes e particularmente relevantes para a prática da Geotecnia no Brasil. Pode-se afirmar que solos bimodais podem ser o resultado de diferentes processos genéticos, tais como materiais com distribuições granulométricas descontínuas, estruturas de poros com micro e macroporos formados por agregação física pelo processo de intemperismo, com predominância de lixiviamento do solo, processos biológicos e, no caso de solos compactados, quando o material é compactado com baixa energia e no ramo seco.

Existem também materiais que apresentam curvas com múltiplos trechos de dessaturação, denominados multimodais. O formato da curva de retenção, em última instância, pode não seguir padrões pré-definidos, sendo sempre um reflexo da sua distribuição de tamanho de poros, mineralogia, dentre outros fatores.

4.1 O papel da variação de volume total

O solo retém água nos seus poros por efeitos capilares e eletroquímicos. Sendo assim, a retenção depende não somente da estrutura, mas também da mineralogia. Uma das formas mais simples de se observar a retenção de água é por meio da curva de secagem. Esse processo leva à determinação do chamado limite de contração. A Figura 11 apresenta a relação entre o volume por 100 g de solo seco em relação ao teor de umidade. O processo de secagem leva o solo de um estado com mais água ao de menos água entre os poros.

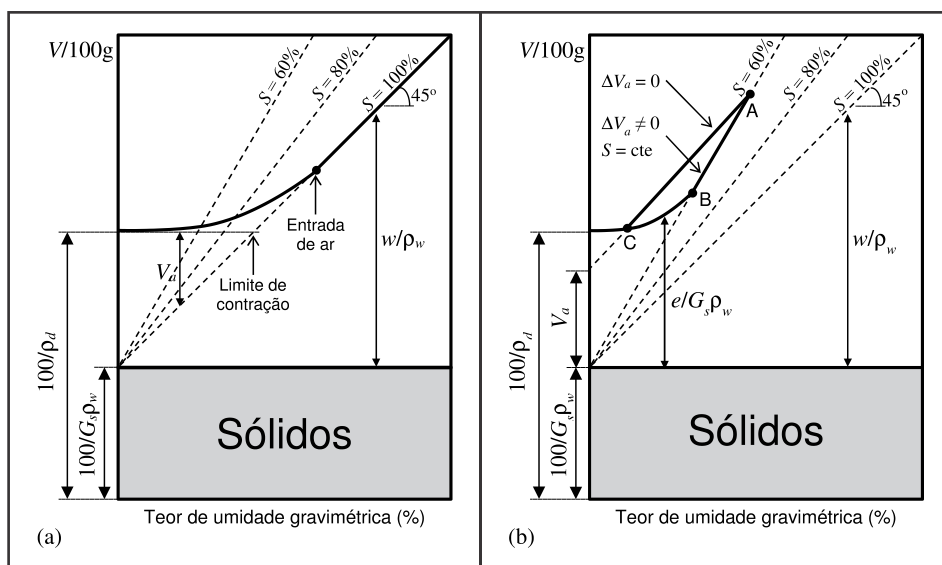


Figura 11 – Relação entre o volume por 100 g de solo seco em relação ao teor de umidade com: a) variação de volume iniciando desde $S=100\%$; b) variação de volume iniciando desde $S<100\%$ (Marinho, 1994)

Em alguns solos, os mais argilosos, a perda de água é acompanhada de variação de volume. A variação de volume pode ser igual à perda de água, fazendo com que o solo permaneça saturado, como ilustra a Figura 11(a). O processo de secagem não leva o solo ao menor volume possível, pois as forças capilares induzidas durante a secagem têm sua efetividade reduzida quando o solo se dessatura. Os solos que iniciam um processo de secagem sem que estejam saturados também podem apresentar variação de volume, igual ou diferente do volume de água perdido. A Figura 11(b) ilustra esse aspecto.

Essas considerações permitem que se conclua a importância de se medir a variação de volume durante o processo de perda de umidade para fins de obtenção da curva de retenção de água. A Figura 12 ilustra a relação teórica entre teor de umidade volumétrico, índice de vazios e grau de saturação, sendo apresentadas trajetórias de secagem possíveis. A trajetória vertical indica um solo que não varia de volume com a secagem. Quando um solo perde água e não varia de volume, automaticamente acontece a dessaturação. Pode-se verificar que a interpretação de curvas de retenção de água por materiais porosos exige a compreensão dos diversos fenômenos que acontecem durante a perda ou absorção de água.

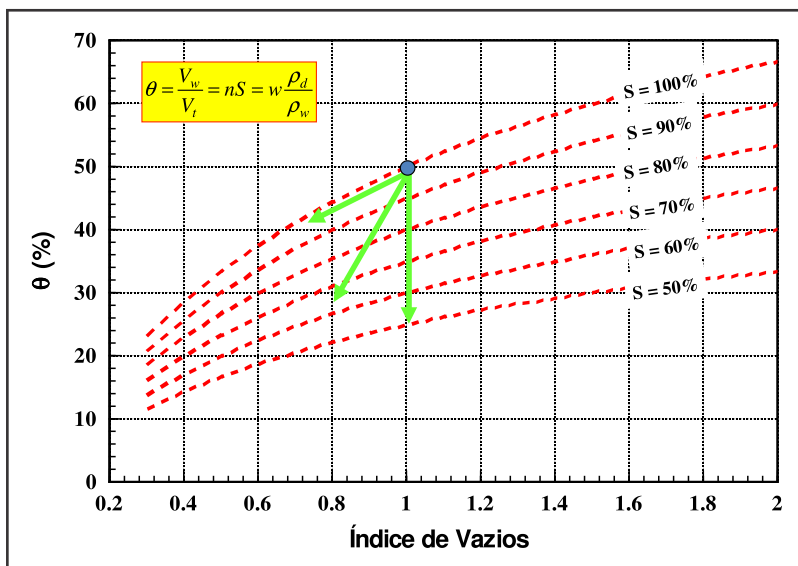


Figura 12 – Relação teórica entre teor de umidade volumétrico, índice de vazios e grau de saturação

4.2 O papel da distribuição de tamanho de poros

O uso de fenômenos capilares ajuda a compreender como ocorre o aumento da sucção com a perda de água (para o caso de uma trajetória de secagem). A Figura 13 ilustra a forma da curva de retenção e sua relação direta com o esvaziamento dos vazios. Para isso, Laloui (2010) utiliza três tubos capilares conectados (A, B e C) da forma indicada na Fi-

gura 13. O processo inicia com todos os tubos completamente preenchidos com água, ou seja, saturados. Assim, o ponto 1 da curva representa o estado saturado. Ao se induzir uma perda de água (por qualquer processo), será necessária uma sucção para vencer as forças capilares criadas em todos os terminais dos capilares. Quem controla a menor sucção é o tubo de maior diâmetro e, nesse momento, o volume de água perdido é o equivalente ao ponto 2 na Figura 13. Logo em seguida, quando a sucção aumenta a ponto de vencer as forças capilares daquele vazio, um volume de água maior é drenado de todos os vazios com aquela geometria, como ilustrado pelo ponto 3. A seguir, o vazio imediatamente menor assume a perda de água e assim sucessivamente. Esse processo gera a curva de retenção indicada pela curva pontilhada.

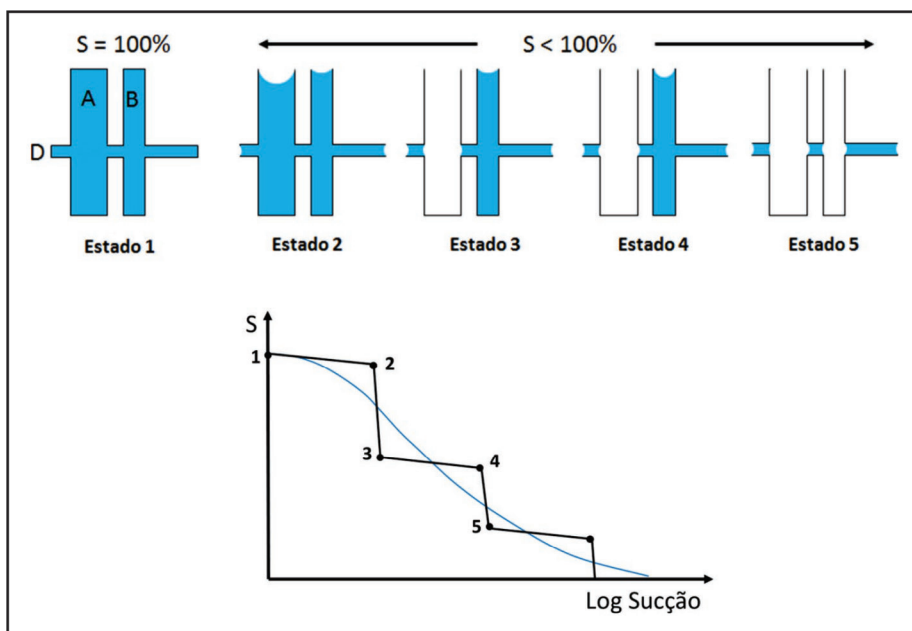


Figura 13 – Forma da curva de retenção e sua relação direta com o esvaziamento dos vazios (modificada de Laloui, 2010)

A Figura 14 apresenta curvas características de uma areia bem graduada e de outras areias produzidas a partir do peneiramento e da combinação de diferentes frações da areia original. Os dados apresentados na Figura 14 ilustram o papel da distribuição granulométrica na distribuição de tamanho de poros do solo e, conseqüentemente, na curva de retenção.

Materiais porosos, como os solos, possuem poros de diferentes dimensões. Dessa forma, a curva de retenção do material será um reflexo da distribuição de tamanho de poros. Considerando-se solos com estruturas relativamente simples, como areias, é comum a constatação de que a granulometria do material determina a distribuição de tamanho de poros e, conseqüentemente, sua curva de retenção.

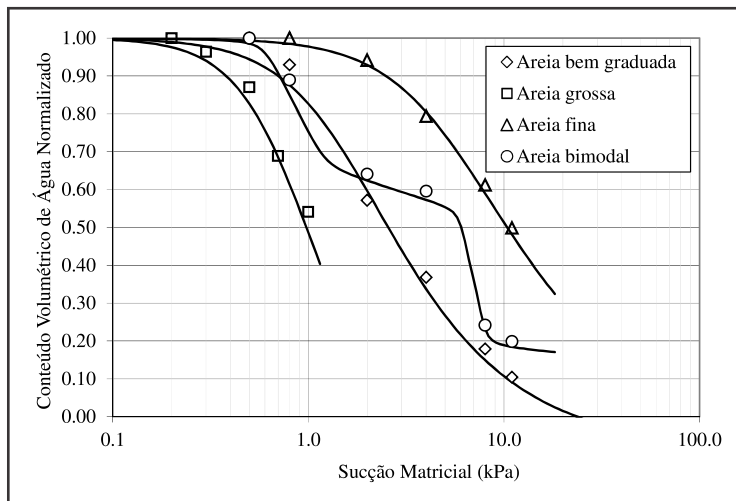


Figura 14 – Curvas de retenção de areias com diferentes granulometrias (Santos *et al.*, 2015)

Considerando-se os conceitos de capilaridade e observando-se os dados da Figura 14, pode-se afirmar, de forma geral, que:

- quanto mais uniforme a distribuição granulométrica de uma areia, mais íngreme é a curva de retenção, ou seja, menor o intervalo de sucções necessário para drenar a água dos poros;
- materiais com granulometria mais fina exigem maiores valores de sucção para serem drenados do que materiais relativamente mais granulares ;
- quando o solo é submetido a um aumento de sucção, os poros maiores são os primeiros a sofrer drenagem.

A areia bimodal da Figura 14 é particularmente interessante. Essa areia possui uma curva granulométrica que foi manipulada de forma a ser descontínua. Esses dados evidenciam o papel da distribuição granulométrica na capacidade de retenção do solo, justificando inclusive curvas de retenção com distribuições de tamanho de poros com diferentes famílias.

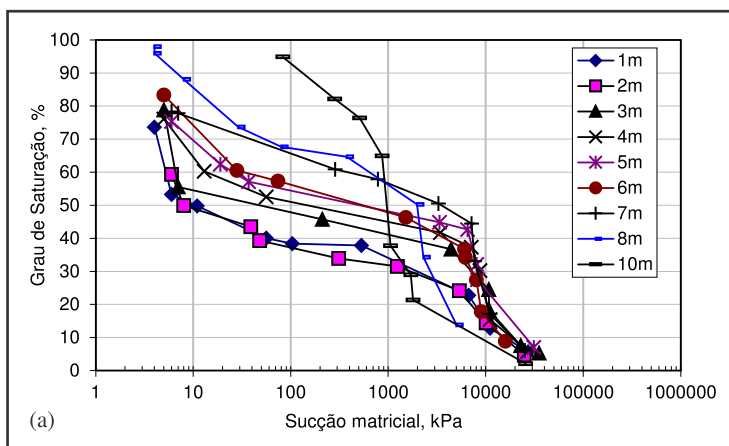
A relação entre a curva granulométrica e a de retenção é tão significativa, que podem ser encontrados na literatura modelos de previsão da curva de retenção a partir da granulometria. Nesse caso, pode-se citar, como exemplo, o modelo de Arya e Paris (1980). Como é de se esperar, o modelo de previsão tem desempenho relativamente bom para materiais granulares, mas não mantém um desempenho adequado para materiais argilosos, para os quais a distribuição de tamanho de poros não é facilmente avaliada a partir da granulometria. Além disso, materiais argilosos possuem outros mecanismos de retenção.

4.3 O papel do grau de intemperismo

O grau de intemperismo é um dos fatores mais importantes que determinam o formato da curva de retenção (Pereira *et al.*, 2005). Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) apresentam alguns dos diversos fatores relacionando retenção e água e grau de intemperismo no contexto de solos tropicais. Perfis de solos tropicais residuais, como os do Centro-Oeste brasileiro, apresentam variações nas propriedades hidráulicas com a profundidade que são explicadas, principalmente, pelo grau de intemperismo. Quanto mais raso o solo, mais próximo das ações de intemperismo e, portanto, mais alterado o solo residual. A evolução das características do solo se dá em termos de distribuição de tamanho de poros, influenciada pelo processo de lixiviação. Igualmente importante é o processo de evolução dos argilominerais, sendo comum, em perfis de Brasília-DF e Goiânia-GO, nas profundidades mais rasas, altos teores de gibsita e, em maiores profundidades, maiores quantidade de caulinita e, por vezes, argilominerais de maior plasticidade.

A Figura 15 apresenta curvas de retenção obtidas pela técnica do papel filtro. No caso da Figura 15(a), as curvas características obtidas apresentam valores de entrada de ar reduzidos para as profundidades mais rasas, mas que vão crescendo conforme o solo se torna mais profundo. Tem-se, nesse caso, a condição típica do solo de Brasília, formado por macroporos metaestáveis, conferindo, ao solo, um comportamento colapsível. A Figura 15(a) evidencia o caráter bimodal das curvas de retenção de certos materiais altamente intemperizados, que reflete a estrutura de poros bimodal, com macro e microporos. O solo a 10 m de profundidade é um material com relativamente baixo grau de alteração, tendo elevado valor de entrada de ar, já que possui maior fração de argila e ausência de macroporos.

Situação semelhante é observada para o solo de Goiânia-GO, conforme apresentado na Figura 15(b). No caso dos dois materiais apresentados na Figura 15(b), têm-se amostras rasas, de 1 a 2 metros de profundidade, de forma que não é tão óbvia qualquer diferença em termos de exposição dos diferentes materiais ao intemperismo. No entanto, a diferença de rocha mãe expõe esse como sendo mais um fator que pode determinar as características hidráulicas de um solo tropical residual.



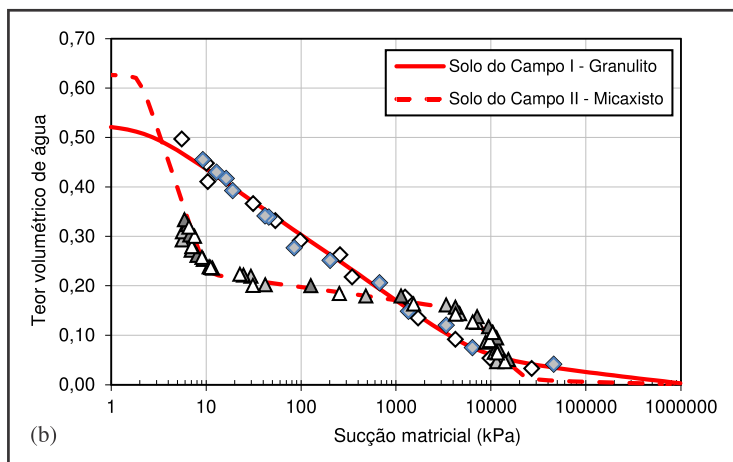
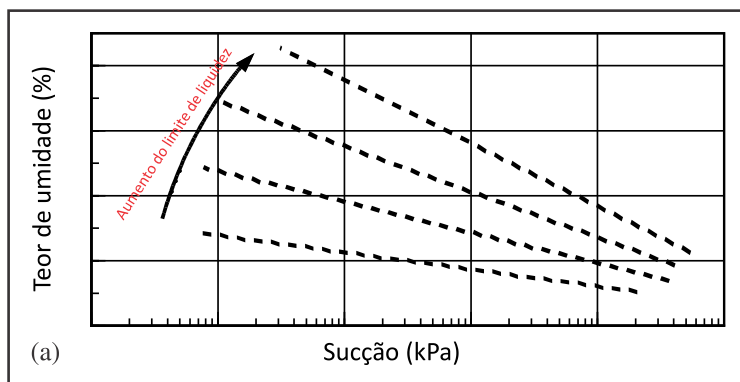


Figura 15 – Curva de retenção de solos do Centro-Oeste brasileiro com diferentes graus de intemperização: a) perfil típico de Brasília-DF (dados de Camapum de Carvalho, 2005); b) dois solos de Goiânia-GO (dados de Carvalho, 2013)

4.4 Outros fatores: história de tensões, condição de compactação, mineralogia

A curva de retenção pode ser influenciada por fatores adicionais, conforme ilustrado na Figura 16. A mineralogia do solo influencia sua capacidade de absorver a água. Materiais muito plásticos passam a ter um novo processo, concorrendo com o fenômeno de capilaridade: a adsorção de água na camada dupla por força de natureza eletroquímica. No caso de solos plásticos, as sucções podem atingir valores elevados mesmo para teores de umidade altos. Em solos plásticos, pode-se fazer uma comparação com a variação de índice de vazios em função da pressão efetiva de campo em solos saturados apresentados por Skempton (1970).



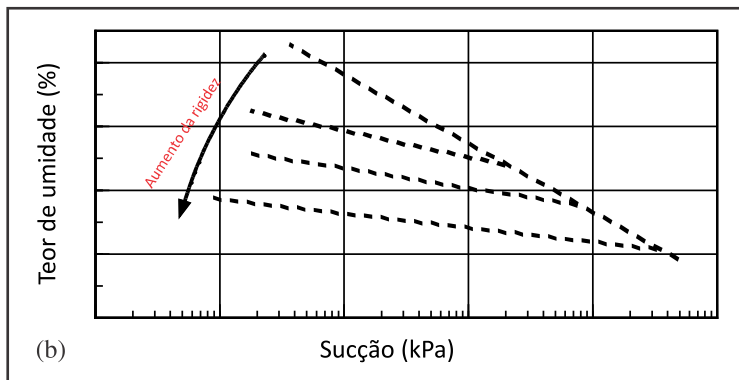


Figura 16 – Fatores adicionais que interferem no formato da curva de retenção: a) papel do limite de liquidez do solo; e b) papel da rigidez do solo (Marinho, 2005)

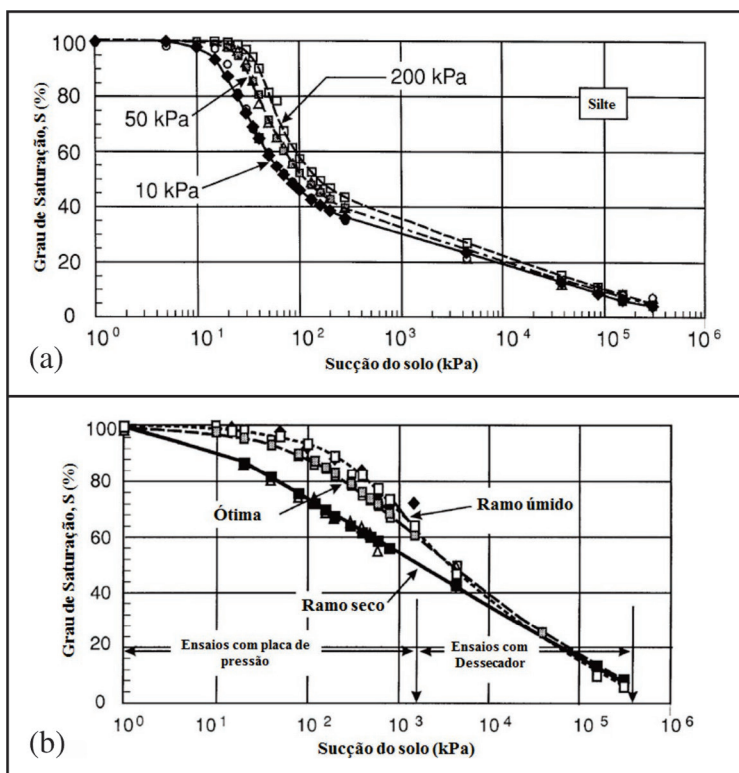


Figura 17 – Fatores adicionais que interferem no formato da curva de retenção: a) papel da pressão de consolidação (modificado de Huang, 1994); e b) papel da condição de compactação (modificado de Vanapalli, 1994)

Conforme apresentado na Figura 17(a), a consolidação do solo também pode alterar sua curva de retenção. Quanto mais compressível o solo, maior o efeito da redução de volume na sua curva de retenção. O efeito da consolidação é a redução do tamanho dos poros e, conseqüentemente, do aumento dos valores de sucção necessários para drenar a água do solo.

Finalmente, a condição de compactação é outro fator que interfere na curva de retenção de um material. A Figura 17(b) apresenta dados para um solo do Canadá, onde se observa o papel das diferentes distribuições de tamanhos de poros produzidas pelas diferentes condições de compactação.

5. MODELOS DE AJUSTE PARA CURVAS DE RETENÇÃO

A Tabela 1 apresenta algumas equações propostas na literatura para representar a curva de retenção. A curva de retenção é, tradicionalmente, representada utilizando-se equações de ajuste pré-definidas e dados obtidos experimentalmente. A representação da curva de retenção utilizando-se uma função contínua é necessária para análises numéricas envolvendo o fluxo de água e na previsão de diversas propriedades de solos não saturados.

Tabela 1 – Equações de ajuste para a curva de retenção

Autor	Equação	Parâmetros
Gardner (1956)	$\Theta_n = \frac{1}{(1 + a_g \psi^{n_g})}$	a_g, n_g
Brooks e Corey (1964)	$\Theta_n = \begin{cases} 1 & \psi \leq \psi_b \\ \left(\frac{\psi}{\psi_b} \right)^{-\lambda_{bc}} & \psi > \psi_b \end{cases}$	ψ_b, λ_{bc}
Brutsaert (1966)	$\Theta_n = \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{\psi_b} \right)^{n_b}}$	a_b, n_b
van Genuchten (1980)	$\Theta_n = \frac{1}{(1 + (a_{vg} \psi)^{n_{vg}})^{m_{vg}}}$	a_{vg}, n_{vg}, m_{vg}
McKee e Bumb (1984)	$\Theta_n = \begin{cases} 1 & \psi \leq \psi_b \\ \exp\left(\frac{(a_{m1} - \psi)}{a_{m1}} \right) & \psi > \psi_b \end{cases}$	a_{m1}, n_{m1}, ψ_b
McKee e Bumb (1987)	$\Theta_n = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{(a_{m2} - \psi)}{a_{m2}} \right)}$	a_{m2}, n_{m2}

	$w = \frac{C(\psi)w_s}{\left[\ln \left(e + \left(\frac{\psi}{a_{fx}} \right)^{n_{fx}} \right) \right]} m_{fx}$	
Fredlund e Xing (1994)	$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{\psi_r^6}{\psi} \right)}$	$a_{fx}, n_{fx}, m_{fx}, \psi_r$
Gitirana Jr. e Fredlund (2004) – unimodal	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_b \psi_{res}}} \right)_d} + S_2$	$\psi_b, \psi_{res}, S_{res}, a$

Os modelos de ajuste mais antigos, como os propostos por Brooks e Corey (1964) e van Genuchten (1980), tinham como pretensão o ajuste da curva de retenção até o valor de umidade residual. Assim, a maioria dos modelos apresentados na Tabela 1 emprega a seguinte variável:

$$\Theta_n = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (\text{Eq. 22})$$

em que: Θ_n é o teor de umidade normalizado; θ_{sat} é o teor de umidade do material saturado; e θ_{res} é o teor de umidade volumétrico residual.

Apesar de as equações apresentadas na Tabela 1 procurarem seguir com rigor as variáveis de armazenamento de água originalmente adotadas pelos autores, as diversas equações encontradas na literatura podem ser utilizadas com adaptações, permitindo o uso de outras variáveis. Um exemplo comum é o emprego da Equação de van Genuchten (1980) em termos de grau de saturação:

$$S = \frac{1}{(1 + (a_{vg} \psi)^{n_{vg}})^{n_{vg}}} \quad (\text{Eq. 23})$$

Dentre as equações apresentadas na Tabela 1, apenas as propostas por Fredlund e Xing (1994) e por Gitirana Jr. e Fredlund (2004) respeitam a sucção máxima teórica de 10^6 kPa. A Equação de Gitirana Jr. e Fredlund (2004) se diferencia das demais, pois seus parâmetros são propriedades bem definidas dos solos não saturados, facilitando o tratamento estatístico de curvas de retenção.

De forma geral, quanto maior o número de parâmetros, maior a capacidade de ajuste da equação, sob o custo do aumento da complexidade da função. A Equação de van Genuchten (1980), por exemplo, destaca-se em relação a equações propostas anteriormente, pois, ao incluir um parâmetro adicional, tem-se um aumento significativo na flexibilidade

do seu formato. A curva de van Genuchten (1980) é relativamente popular, pois permite a utilização em conjunto com um método analítico de previsão de permeabilidade não saturada, proposto pelo mesmo autor.

A família de equações propostas por Gitirana Jr. e Fredlund (2004) inclui uma equação para o ajuste de curvas bimodais, com dois valores de entrada de ar e dois pontos residuais. Apesar de sua inerente complexidade, a flexibilidade da equação proposta a torna adequada para muito tipos de materiais.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A curva de retenção é uma das propriedades mais fundamentais e, ao mesmo tempo, mais complexas de solos não saturados. A quantidade de fatores que controlam a curva de retenção torna desafiadora a interpretação e o emprego da propriedade. Felizmente, tais fatores, quando bem conhecidos, tornam aquela informação, inicialmente complexa, em uma propriedade que oferece um grande volume de informações a respeito do comportamento do solo.

A curva de retenção é empregada na previsão de outras propriedades de solos não saturados, como a função de permeabilidade e até mesmo a resistência ao cisalhamento. Os campos de aplicação da curva de retenção continuarão a crescer à medida que ocorram avanços na modelagem do comportamento de solos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, R.D.; GITIRANA JR., G.F.N. & VANAPALLI, S.K. (2020). Advances in the modeling of the soil–water characteristic curve using pore-scale analysis, *Computers and Geotechnics*. 127: 103766.
- ARYA, L.M. & PARIS, J.F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 1023-1030.
- BARBOUR, S.L. (1998). Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: A historical perspective, *Canadian Geotechnical Journal*. 35(5): 873-894.
- BROOKS, R.H. & COREY, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media, *Colorado State University Hydrology Paper*, (3): 8-37.
- BRUTSAERT, W. (1967). Some methods of calculating unsaturated permeability, *Transactions of ASABE*, 10: 400-404.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2005). Relato: Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados. V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos, SP. 597-616.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA JR., G.F.N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils, *Soils and Rocks*. 44(3): e2021068121.

CARVALHO, E.T.L. (2013). Avaliação geotécnica de poços de infiltração de água pluviais. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília. 284 p.

EDLEFSEN, N.E. & ANDERSON, A.B.C. (1943). Thermodynamics of soil moisture, *Hilgardia*, 15: 31-298.

FREDLUND, D.G. (2002). Use of the soil-water characteristic curve in the implementation of unsaturated soil mechanics, *Third International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brazil*, v. III, pp. 887-902.

FREDLUND, D.G. (2006). Unsaturated soil mechanics in engineering practice, *The 2005 Terzaghi Lecture: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 132(3): 286-321.

FREDLUND, D.G. & MORGENSTERN, N.R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(GT5): 447-466.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, New York. 517p.

FREDLUND, D.G. & XING, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 521-532.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. & FREDLUND, M. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Practice*, Wiley, New York. 926p.

GARDNER, W.R. (1956). Representation of soil aggregate size distribution by a logarithmic-normal distribution, *Soil Science Society of America Proceedings*, 20: 151-153.

GITIRANA, JR., G.F.N. & FREDLUND, D.G. (2004). Soil-water characteristic curve equation with independent parameters, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 130(2): 209-212.

GITIRANA, JR., G.F.N. & FREDLUND, D.G. (2016). Statistical assessment of hydraulic properties of unsaturated soils, *Soils and Rocks*, 39(1): 81-95.

GOMES, A.C.; GITIRANA JR., G.F.N. & LAURO VARGAS, C.A. (2015). Curva Característica Solo-Água para um Solo Natural na Cidade de Goiânia: Comparação entre Diferentes Metodologias de Ensaio. *VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Fortaleza - CE.

HUANG, S.Y. (1994). Evaluation and laboratory measurement of the coefficient of permeability in deformable, unsaturated soils. Tese de Doutorado, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá. 317p.

LALOUI, L. (2010). Mechanics of Unsaturated Geomaterials. John Wiley & Sons, New York. 381p.

MARINHO, F.A.M. & PINTO, C.S. (2002). Investigating the water retention in iron ore. 3rd International Conference on Unsaturated Soils, 3: 1143-1146.

MARINHO, F.A.M. & CHANDLER, R. (1993). Aspects of the behavior of clays on drying” - Unsaturated Soils - Geotechnical Special Publication n. 39 - ASCE - Ed. por S.L. Houston & W.K. Wray. Dallas, October pp. 77-90.

MARINHO, F.A.M. (1994). Shrinkage behavior of some plastic clays. Doctoral Thesis, Imperial College, University of London, London. 216p.

MARINHO, F.A.M. & GOMES, J.S. (2012). The effect of contact on the filter paper method for measuring soil suction. Geotechnical Testing Journal, 35(1): 172-181.

MARINHO, F.A.M. (2005). Nature of the soil-water characteristic curves for plastic soils In Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131: 654-661.

MCKEE, C.R. & BUMB, A.C. (1984). The importance of unsaturated flow parameters in designing a hazardous waste site, in Hazardous Waste and Environmental Emergencies: Hazardous Materials Control Research Institute National Conference, Houston, TX, Silver Spring, MD, pp. 50-58.

MCKEE, C.R. & BUMB, A.C. (1987). Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas, Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation, 2(4): 599-608.

OLIVEIRA, O.M. & MARINHO, F.A.M. (2007). Simulação de Chuva em Coluna de Solo Residual Compactado. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Salvador, v. 1. 291-297.

PEREIRA, J.H.; FREDLUND, D.G.; CORDÃO NETO, M.P. & GITIRANA JR., G.F.N. (2005). Hydraulic Behavior of Collapsible Compacted Gneiss Soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(10): 1264-1273.

PEROTTI, D.A.; GITIRANA, JR., G.F.N.; MENDES, T.A. & FREDLUND, M.D. (2022). Numerical analysis of cover systems for mining waste in tropical regions, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 36: 1-20.

SANTOS, R.O.G.; SANTOS, T.L.; GITIRANA JR., G.F.N. & SILVA, P.A.D. (2015). Estudo Comparativo de Curvas Características de Areias Obtidas por Métodos de Previsão e Medição Direta. VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Fortaleza - CE.

SKEMPTON, A.W. (1970). The consolidation of clays by gravitational compaction. Quarterly Journal of the Geological Society, London, 125: 373-411.

VAN GENUCHTEN, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. Soil Science Society of America Journal, 44(5): 892-898.

VANAPALLI, S.K. (1994). Simple test procedures and their interpretation in evaluating the shear strength of unsaturated soils. Tese de doutorado, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

VANAPALLI, S.K.; PUFAHL, D.E. & FREDLUND, D.G. (1999). The effect of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. Geotechnique, 49(2), 143-159.

WANG, Y.H. & FREDLUND, D.G. (2003). Towards a better understanding of the role of the contractile skin, Second Asian Conference on Unsaturated Soils, UNSAT-ASIA, Osaka, pp. 419-424.

YOUNG, F.R. (1989). Cavitation. McGraw-Hill, New York, 418 p.

