

Propriedades hidráulicas de solos residuais na região serrana do Rio de Janeiro, RJ

Hanedi Ahmed Brahim

Estudante de pós-graduação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Brasil, hanediahmed@gmail.com

Marina Bellaver Corte

Professora, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Brasil, marina@puc-rio.br

Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Professor, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Brasil, vargas@puc-rio.br

RESUMO: A curva característica de água no solo é uma ferramenta essencial para a análise mecânica e hidráulica de solos não saturados, pois descreve a relação entre a saturação e o potencial matricial do solo. Esta pesquisa teve como objetivo utilizar as curvas de retenção e condutividade hidráulica, aliadas à caracterização do solo, para estudar as propriedades hidráulicas de dois taludes de solo residual dos bairros de Bingen e São Sebastião localizados em Petrópolis, região serrana do Rio de Janeiro. Foram realizados ensaios de sucção, como o HYPROP, WP4-C e o ensaio do papel filtro, com o objetivo de determinar a curva característica do solo. Por sua vez, os ensaios com permeâmetro de parede rígida (KSAT) e de parede flexível foram empregados para a medição da condutividade hidráulica saturada. Seis corpos de prova cilíndricos de amostra indeformada no total foram confeccionados, três corpos de prova de cada bairro, com diâmetro interno de 80 mm e altura de 50 mm, para os ensaios de HYPROP e KSAT, além de quinze amostras deformadas provenientes de cada bloco amostrado em cada bairro, com diâmetro interno de 4 mm e altura de 4 mm, destinadas ao ensaio WP4-C. Os resultados mostraram que a composição arenosa dos solos contribuiu para menor retenção de água e maior condutividade hidráulica, especialmente em estados próximos à saturação. O modelo de van Genuchten representou bem as curvas de retenção. As variações observadas entre os métodos aplicados, HYPROP, WP4-C, papel filtro, permeâmetro de parede flexível e rígida (KSAT), indicam que essas técnicas se complementam ao abranger diferentes faixas de sucção e capturar características estruturais distintas, especialmente em solos com heterogeneidade variável, como os das regiões de Bingen (mais heterogêneo) e São Sebastião (mais homogêneo) na Serra de Petrópolis.

PALAVRAS-CHAVE: Solo residual da formação da Serra do Mar, Curva de retenção, Curva Característica Solo-Água, Ensaios de laboratório.

ABSTRACT: The soil water characteristic curve is fundamental for analyzing unsaturated soils' hydraulic behavior. This study investigated the hydraulic properties of residual soils from Bingen and São Sebastião in Petrópolis, Brazil, using retention and hydraulic conductivity curves combined with soil characterization. Laboratory tests (HYPROP, WP4-C, filter paper, KSAT, and flexible-wall permeameter) measured saturated and unsaturated hydraulic conductivity. Results showed that the sandy texture led to lower water retention and higher conductivity near saturation. The van Genuchten model effectively described the retention curves. Differences among methods highlight their complementarity in capturing various suction ranges and soil structural variability, especially considering the higher heterogeneity in Bingen compared to São Sebastião.

KEYWORDS: Residual soil, Retention curve, Soil-Water Characteristic Curve, Laboratory testing.

1 INTRODUÇÃO

O solo residual é formado a partir do intemperismo das rochas-mãe, ou seja, pela desintegração e decomposição das rochas *in situ*, sem o transporte dos materiais gerados. Esse processo ocorre devido à ação

de agentes físicos, químicos e biológicos, que alteram a estrutura e a composição das rochas originais ao longo do tempo. De acordo com Budhu (2010), os solos residuais se formam diretamente no local onde as rochas originais se encontram, sem o transporte por agentes externos. Esses solos possuem uma composição mineral semelhante à da rocha-mãe e, devido à sua formação local, apresentam características hidráulicas peculiares, que podem influenciar diretamente a dinâmica da água no solo e suas características de drenagem.

Essas particularidades dos solos residuais, como sua origem *in situ* e a influência da rocha-mãe, impactam diretamente seu comportamento hidráulico, especialmente em condições de não saturação. A compreensão desses processos é fundamental em regiões suscetíveis a instabilidades, onde a dinâmica da água no solo pode comprometer sua resistência. Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), a análise do comportamento de solos não saturados requer o entendimento da interação entre sucção, umidade e tensões efetivas.

1.1 Fundamentação teórica

Os solos não saturados possuem vazios parcialmente preenchidos por água e ar, o que torna o movimento da água mais complexo do que em solos saturados, onde todos os poros contêm apenas água e o fluxo pode ser descrito pela Lei de Darcy. Nesses casos, a condutividade hidráulica varia com o teor de umidade, sendo controlada, principalmente, pela sucção matricial, que influencia diretamente a retenção de água e o estado de tensões efetivas no solo.

Fredlund & Rahardjo (1993) destacam a necessidade de tratar a sucção como uma variável independente para compreender a resistência e deformabilidade de solos não saturados. Essa abordagem foi confirmada por Khalili *et al.* (2004), que demonstraram experimentalmente sua influência na tensão efetiva.

A Curva Característica Solo-Água (CCSA), que relaciona sucção e grau de saturação, é uma ferramenta fundamental para descrever o comportamento hidráulico desses solos. Modelos como os de Brooks & Corey (1964) e van Genuchten (1980) são amplamente utilizados na modelagem da condutividade hidráulica não saturada.

Neste estudo, foram avaliados solos residuais dos bairros Bingen e São Sebastião, no município de Petrópolis - RJ, que apresentam diferentes composições granulométricas e histórico de instabilidade, sendo que, durante eventos de chuva intensa, o aumento da saturação reduz a sucção, comprometendo a resistência do solo e favorecendo deslizamentos (Vanapalli *et al.*, 1996).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este item apresenta a base teórica da pesquisa, destacando conceitos, equipamentos e métodos utilizados para estudar o fluxo de água em solos não saturados. O fluxo ocorre com a presença simultânea de água e ar nos poros, sendo controlado pela sucção matricial e condutividade hidráulica, que varia com o teor de umidade (Hillel, 1971).

A Lei de Buckingham-Darcy, incorporando o potencial matricial, e a equação de Richards, que une continuidade e fluxo, são fundamentais para descrever o comportamento hidráulico nesses solos (Jong Van Lier, 2020). Modelos como os de Mualem (1976), Fredlund & Xing (1994) e van Genuchten-Mualem são amplamente usados para representar a condutividade hidráulica em função da umidade.

A Curva Característica Solo-Água (CCSA) relaciona o teor de umidade ao potencial matricial, sendo essencial para entender o comportamento hidráulico. A histerese hídrica e a variação da sucção, influenciada pelo tamanho dos poros, são aspectos chave (Besso, s.d.; Bezerra *et al.*, 2012). Pioneiros como Livingston (1906), Shull (1916) e Gardner (1937) estabeleceram os fundamentos dos métodos atuais, como o do papel filtro (Soares, 2008).

Os métodos de sucção dividem-se em métodos de controle de pressão (placas de pressão, centrífugas) e métodos de medição direta (psicrômetros, tensiômetros) (Aitchison, 1965 *apud* Oliveira, 2024). As equações de van Genuchten (1980) e van Genuchten-Mualem são referências para modelagem da CCSA.

Neste estudo, a CCSA será obtida por três métodos: HYPROP (para baixa sucção próxima à saturação), papel filtro (para faixas intermediárias) e WP4-C (para sucção elevada), garantindo cobertura contínua e precisa da faixa de sucção dos solos investigados.

2.1 Ensaio HYPROP

O equipamento HYPROP é amplamente utilizado em estudos agrícolas, especialmente em áreas de

manejo da irrigação e ciências do solo, para a obtenção de curvas de retenção de água por meio do método de evaporação simplificado, originalmente desenvolvido por Schindler em 1980 (Schindler *apud* Menezes, 2018). O sistema opera com tensiômetros acoplados a transdutores de pressão, permitindo medições contínuas e precisas do potencial matricial em faixas de baixa sucção, geralmente até 80 kPa ($\approx 2,91$ pF) (Klute & Gardner, 1962).

A principal vantagem do método está na capacidade de registrar com alta resolução a variação do potencial hídrico em condições próximas à saturação, o que o torna particularmente adequado o que o torna particularmente adequado para solos arenosos, que tipicamente apresentam elevada porosidade e baixa coesão entre as partículas.

Na engenharia geotécnica, entretanto, seu uso ainda é restrito, especialmente em solos compactados ou argilosos, que frequentemente apresentam maiores valores de sucção. Nesses casos, métodos alternativos, como psicrômetros, câmaras de pressão e o ensaio do papel filtro, são preferidos por cobrirem faixas mais amplas de sucção e por apresentarem maior compatibilidade com os requisitos específicos da caracterização geotécnica (Fredlund & Rahardjo, 1993).

2.2 Ensaio WP4-C

O WP4-C (*Water Potential Meter*) é um psicrômetro de termopar baseado na tecnologia do ponto de orvalho (*dewpoint potential meter*) desenvolvido para medir o potencial hídrico, ou sucção, em solos não saturados. O princípio de funcionamento baseia-se na relação entre a pressão de vapor da água e a temperatura do ponto de orvalho, conforme descrito pela equação de Kelvin. Essa abordagem permite determinar, com alta precisão, o potencial mátrico do solo, especialmente em faixas de sucção elevadas, típicas de materiais com baixo teor de umidade (Decagon Devices, 2010).

A capacidade do WP4-C de medir altos valores de sucção o torna particularmente adequado para a caracterização de solos em condições secas, sendo amplamente utilizado na modelagem de curvas característica solo-água (CCSA). Os dados obtidos com esse equipamento são frequentemente empregados em conjunto com modelos analíticos, como o de van Genuchten (1980), que descreve o comportamento hidráulico dos solos em uma ampla faixa de sucção, geralmente de 0 a 106 kPa (≈ 0 a 3,03 pF) (Lu & Likos, 2004).

Além disso, a literatura destaca que a microestrutura do solo exerce forte influência sobre a curva de retenção de água, especialmente em regimes de alta sucção. Fredlund e Xing (1994) observaram que, nessas condições, a diferença entre a sucção total e a sucção matricial tende a se reduzir, dado que a água remanescente se encontra retida majoritariamente em microporos.

2.3 Ensaio de papel filtro

A seleção adequada do papel filtro (Whatman Nº 42 ou Schleicher & Schell Nº 589) e sua calibração são essenciais para resultados precisos, conforme ASTM 5298-16 (2016) e Marinho (1994, 2005). O método apresenta duas abordagens: (1) sucção matricial (contato direto solo-papel, permitindo transferência de água e solutos) e (2) sucção total (com barreira para fluxo apenas de vapor). A calibração requer cuidados específicos, sendo recomendado o uso de papel filtro seco ao ar, o que contribui para minimizar distorções relacionadas à histerese. Os tempos de equalização variam de cerca de 7 dias, para sucções superiores a 1000 kPa ($\approx 4,01$ pF), até mais de 30 dias em casos de sucções inferiores a 100 kPa ($\approx 3,01$ pF), dependendo das características do solo e das condições ambientais.

A interpretação dos dados utiliza as equações de Chandler *et al.* (1992) para conversão umidade-sucção com avaliação estatística baseada no R^2 (Coeficiente de Determinação) e AIC (Critério de Informação de Akaike), prevenindo *overfitting*. O método permite gerar curvas de retenção tanto para processos de secagem quanto umedecimento, embora sua principal limitação seja o longo tempo necessário para equalização, especialmente em baixas sucções.

2.4 Ensaio de permeâmetro de parede rígida e carga constante (KSAT)

O permeâmetro de parede rígida é um dispositivo utilizado para determinar a condutividade hidráulica de solos saturados. Ele funciona aplicando uma pressão constante ou um gradiente de pressão no solo, forçando a água a se mover através dele, enquanto mede o fluxo de água que passa por uma amostra de solo em condições controladas.

O equipamento é composto por uma célula com uma parede rígida, onde o solo é colocado, e o fluxo de

água é monitorado em função do tempo. Este método permite obter uma estimativa precisa da permeabilidade do solo, considerando a uniformidade do material e a constância da pressão aplicada durante o experimento.

A amostra analisada tende a apresentar uma menor expansividade em comparação àquela testada em um permeâmetro de parede flexível. No entanto, essa abordagem apresenta como limitações o fato de não haver garantia de saturação completa da amostra, uma vez que o processo ocorre de forma passiva, sem aplicação de contrapressão, além disso, há ausência de controle sobre as pressões atuantes no corpo de prova e risco de ocorrência de fluxo lateral pelas paredes do tubo do permeâmetro (Diemer, 2010).

2.5 Ensaio de permeâmetro de parede flexível e carga constante

O permeâmetro de parede flexível é utilizado para determinar a condutividade hidráulica de amostras de solo em laboratório, sendo particularmente adequado para solos de baixa permeabilidade. O ensaio é conduzido em uma câmara pressurizada, onde o corpo de prova, envolto por uma membrana impermeável, é submetido a uma tensão confinante. A saturação da amostra é verificada por meio do parâmetro B de Skempton ($B \geq 0,95$), indicando saturação adequada. Após essa etapa, aplica-se um gradiente hidráulico para a medição da vazão, e a condutividade hidráulica é determinada com base na Lei de Darcy. O método permite controle preciso das pressões e reduz o tempo necessário de saturação em comparação ao permeâmetro de parede rígida (Jesus *et al.*, 2013).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi conduzido em etapas que incluíram a caracterização física dos solos e a realização de ensaios de retenção e de condutividade hidráulica, utilizando os equipamentos HYPROP, WP4-C, papel filtro e permeâmetros de parede flexível e rígida (KSAT). Os testes foram realizados nos laboratórios da PUC-Rio e da CPRM-SGB.

Para o detalhamento completo dos procedimentos experimentais, consultar Brahim (2025).

3.1 Caracterização

Foram coletadas amostras indeformadas de solo em dois bairros de Petrópolis/RJ, Bingen (22°30'43.89"S, 43°12'34.14"O) e São Sebastião (22°32'12.15"S, 43°11'34.18"O), ambos localizados na Região das Escarpas e reversos da Serra do Mar. Em Bingen, o solo é residual homogêneo, composto por argila arenosa a siltosa com presença de solo orgânico. Em São Sebastião, o perfil apresenta transição entre solo residual e rocha alterada, com veios de rocha em processo de intemperismo.

A coleta foi realizada em áreas monitoradas por PCDs do CEMADEN, selecionadas por registrarem escorregamentos nos eventos de chuva de fevereiro e março de 2022, apresentarem dados de pluviometria e umidade *in situ*, e por possuírem perfis rasos ($< 3,5$ m), característicos de escorregamentos translacionais. Para os ensaios, foram extraídos blocos indeformados com preservação da estrutura natural do solo.

Dois blocos foram extraídos:

- Bloco 1 (Bingen): Coletado em 14/02/2023, entre 0,4 m e 0,95 m de profundidade, em solo residual alaranjado abaixo de 50 cm de solo orgânico. Dimensões: 25x25x25 cm. Não houve presença de nível d'água.
- Bloco 2 (São Sebastião): Coletado em 15/02/2023, entre 0,7 m e 1 m de profundidade, na base de um talude, próximo a um estacionamento. O material corresponde a solo em transição para rocha alterada. Dimensões: 35x30 cm.

3.2 Ensaio HYPROP 2

As amostras foram preparadas com o objetivo de replicar fielmente as condições do solo em campo, considerando fatores físicos e eletroquímicos que influenciam a curva característica do solo. Os blocos de solo, oriundos de Petrópolis, foram armazenados em câmara úmida no laboratório de geotecnia da PUC-Rio.

Foram preparadas duas categorias de amostras: uma para os ensaios HYPROP e KSAT (que utilizam o mesmo anel volumétrico de 80 mm x 50 mm), e outra para o WP4-C (descrita em capítulo posterior). Seis amostras indeformadas foram moldadas por cravação: três do bairro Bingen (solo avermelhado) e três de São Sebastião (solo marrom), ambos com textura franco-arenosa.

A saturação foi realizada por capilaridade, com os anéis parcialmente imersos em água desaerada, respeitando o posicionamento do lado biselado e o uso de tampas plásticas e lençóis filtros, por um período mínimo de 24 horas ou até o afloramento de água no topo. Nesse processo, o fluxo de água ocorre de forma ascendente, garantindo a saturação gradual da amostra por meio da ação capilar.

Já para o preparo do ensaio, a unidade sensora e os tensiômetros do HYPROP foram previamente saturados com água desaerada utilizando uma bomba a vácuo por 24 horas, assegurando a ausência de bolhas de ar. Essa etapa é crucial para garantir leituras precisas de umidade e sucção. Após a saturação, o sistema foi verificado quanto à resposta dos sensores e tensiômetros.

Na montagem do ensaio, a amostra é perfurada com minitrado manual, os furos são preenchidos com água desaerada e a unidade sensora é cuidadosamente acoplada. O sistema é então conectado à balança de precisão e ao *software* HYPROP, que realiza leituras contínuas de temperatura, massa e pressão de sucção ao longo do tempo.

3.3 Ensaio WP4-C

As amostras para o ensaio WP4C foram secas ao ar, peneiradas (fração < 2 mm) e armazenadas em recipientes plásticos. Cada cápsula do equipamento foi preenchida até a metade com solo, conforme o manual, garantindo precisão nas leituras. As amostras foram homogeneizadas com a fração de água pré-definida e mantidas em recipiente fechado por 24 horas para atingir o equilíbrio interno de umidade.

A calibração do WP4C foi realizada com solução de ácido cítrico 0,01 Mol, preparada no Departamento de Química da PUC-Rio, conforme o manual do equipamento, assegurando a confiabilidade das medições do potencial matricial.

O procedimento de ensaio consistiu na inserção das cápsulas no equipamento, leitura automática em aproximadamente 5 minutos, pesagem imediata, e posterior secagem em estufa a 110 °C por 24 horas para determinação da umidade. A umidade gravimétrica foi obtida pela diferença de massas (úmida e seca) em relação à massa seca, e convertida em umidade volumétrica por meio da densidade do solo.

Esses dados foram inseridos no *software* HYPROP para refinar a curva de retenção de água no solo, fornecendo maior precisão na caracterização hidráulica do material.

3.4 Ensaio de papel filtro

O ensaio de papel filtro foi conduzido com amostra de solo em estado representativo, apenas destorroada. O objetivo é avaliar a permeabilidade do solo com base na taxa de infiltração da água.

O aparato experimental incluiu papel filtro, funil, frasco de vidro, balança e água destilada. A amostra foi posicionada sobre o papel filtro no interior do recipiente, e a água foi adicionada gradualmente. Durante o ensaio, registrou-se o volume de água percolada e o tempo necessário, possibilitando a estimativa da taxa de infiltração.

Com base nesses dados, foi possível avaliar o desempenho do solo em termos de permeabilidade: quanto maior a taxa de passagem da água, maior a condutividade hidráulica do material.

3.5 Ensaio de permeâmetro de parede rígida e carga constante (KSAT)

A determinação da condutividade hidráulica saturada foi realizada com o permeâmetro de parede rígida KSAT, do grupo METER, utilizando a configuração de carga constante, ideal para solos com permeabilidade média a baixa, como os argilosos e siltosos. O equipamento aplica diretamente a Lei de Darcy e a equação da continuidade, realizando medições automáticas do coeficiente de condutividade (K) a partir da variação do nível de água em um tubo de vidro graduado.

O preparo das amostras seguiu o mesmo procedimento adotado para o ensaio HYPROP, descrito anteriormente. Para a montagem do ensaio, foi utilizado o *software* KSAT VIEW na opção *CONSTANT HEAD*, realizando a calibração inicial do nível de água e o acoplamento das placas porosas (laranja na base e azul no topo) à amostra. Após o encaixe do conjunto no equipamento, a medição foi iniciada de forma automatizada, com registro contínuo dos dados pelo sistema.

3.6 Ensaio de permeâmetro de parede flexível e carga constante

O ensaio com permeâmetro de parede flexível foi aplicado para determinar a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), utilizando um sistema que permite simular com maior fidelidade as condições do solo em campo, devido à ausência de interferência de paredes rígidas.

A amostra foi moldada em formato cilíndrico (36 mm de diâmetro e 72 mm de altura) e inicialmente saturada por capilaridade. Em seguida, já no sistema montado, aplicou-se tensão de confinamento de 50 kPa, e contrapressão, com controle do grau de saturação por meio do parâmetro B de Skempton. A condição de fluxo foi estabelecida com aplicação de pressão constante na parte superior da amostra.

Durante o ensaio, mediu-se a quantidade de água que atravessava o solo ao longo do tempo. As dimensões da amostra foram mantidas constantes, e o volume de água escoado foi registrado com auxílio de um Medidor de Variação de Volume. A partir desses dados, foi possível calcular a condutividade hidráulica do solo, com base na variação de volume, tempo de ensaio e gradiente hidráulico aplicado, conforme os procedimentos da norma ASTM D5084-16a.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A combinação dos equipamentos HYPROP e WP4-C permitiu ampliar a faixa de análise das curvas de retenção de água, cobrindo desde baixas sucções (0 a 3 pF \approx 0 a 98 kPa) até altas sucções (até pF 6 \approx 98000 kPa). O HYPROP foi eficaz em menores tensões, enquanto o WP4-C complementou a análise em condições mais secas. A integração dos dados, com conversão adequada entre umidades, resultou em curvas contínuas e representativas do comportamento hídrico dos solos (Figuras 1.a e 1.b). O modelo de van Genuchten apresentou bom ajuste. No entanto, os dados do WP4-C excederam o ponto de murcha permanente (pF 4,2), indicando a necessidade de realizar ensaios com amostras mais úmidas para melhor capturar essa transição.

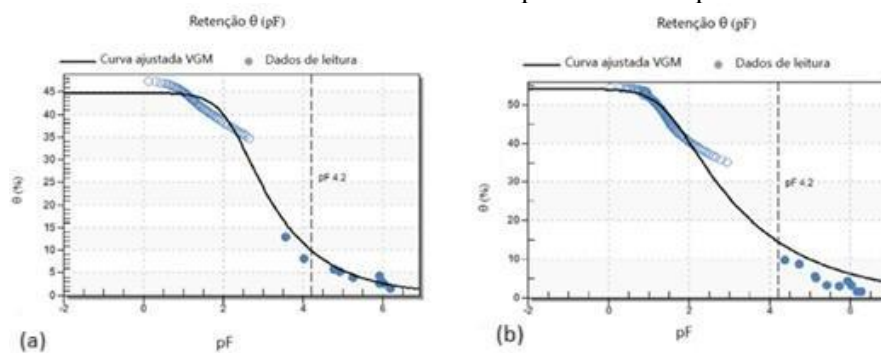


Figura 1. Curvas de retenção: (a) S. Sebastião – (b) Bingen obtidas no HYPROP e WP4-C.

O ensaio de papel filtro permitiu avaliar o comportamento hídrico nas fases de umedecimento e secagem. Em São Sebastião, o modelo Brooks & Corey foi mais preciso no umedecimento ($R^2 = 0,9416$), enquanto van Genuchten teve melhor desempenho na secagem ($R^2 = 0,9818$). Em Bingen, Brooks & Corey se destacou no umedecimento ($R^2 = 0,9369$) e Fredlund & Xing na secagem ($R^2 = 0,9273$), segundo os critérios AIC e R^2 .

As curvas de condutividade hidráulica não saturada foram obtidas a partir dos ensaios de evaporação realizados com o equipamento HYPROP, que estima essa propriedade com base no ajuste do modelo de van Genuchten aos dados experimentais de potencial matricial e teor de água. O comportamento observado foi típico de solos arenosos, apresentando alta condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e uma queda acentuada da condutividade conforme a sucção aumenta. A amostra do bairro São Sebastião apresentou um valor de K_{sat} estimado em $2,37 \times 10^{-3}$ cm/s, enquanto a do bairro Bingen foi de $7,0 \times 10^{-4}$ cm/s, indicando diferenças significativas na permeabilidade entre os solos analisados.

Já a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) foi estimada por dois métodos: KSAT, com média de três medições por amostra, e permeâmetro de carga constante, com valor único. Em Bingen, o KSAT indicou valores mais baixos, possivelmente pela heterogeneidade do solo, enquanto o permeâmetro apresentou condutividade mais alta, compatível com a textura arenosa (Tabela 1).

Tabela 1. Comparativo de coeficientes de condutividade hidráulica saturada.

Ensaio	K_{sat} (cm/s) Bingen	K_{sat} (cm/s) São Sebastião
Permeâmetro de parede rígida (KSAT)	$1,96 \times 10^{-7}$	$5,53 \times 10^{-8}$
Permeâmetro de parede flexível	$1,05 \times 10^{-4}$	$5,25 \times 10^{-7}$

Em São Sebastião, ambos os métodos indicaram condutividades mais baixas. As diferenças refletem as características dos ensaios: o KSAT, com amostras rigidamente confinadas, pode subestimar a influência de macroporos; já o permeâmetro, ao permitir deformações, tende a representar melhor a estrutura de solos mais heterogêneos.

Os coeficientes de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) obtidos nos ensaios refletem, em parte, as condições estruturais das amostras analisadas. Apesar de os solos de Bingen e São Sebastião apresentarem textura franco-arenosa e boa graduação, com tendência a maior condutividade hidráulica, os valores baixos obtidos pelo método KSAT (na ordem de 10^{-7} a 10^{-8} cm/s) podem indicar compactação, colapsos estruturais durante a amostragem ou baixa representatividade da macroestrutura do solo, reduzindo a presença de macroporos funcionais (Klute, 1986; Fredlund & Rahardjo, 1993).

Por outro lado, o permeâmetro de parede flexível apresentou valores de K_{sat} mais elevados no solo de Bingen ($1,05 \times 10^{-4}$ cm/s), refletindo sua maior capacidade de capturar os efeitos da estrutura do solo, como a continuidade dos macroporos e o grau de preservação da amostra.

No entanto, no solo de São Sebastião, mesmo com a aplicação do mesmo método, os valores foram significativamente menores ($5,25 \times 10^{-7}$ cm/s), o que pode estar relacionado a uma estrutura mais compactada, maior fração de finos obstruindo os poros intergranulares ou à presença de processos de cimentação parcial, características recorrentes em solos residuais. Esses fatores reduzem a conectividade porosa, limitando o fluxo de água, mesmo em solos com granulometria arenosa.

Assim, o permeâmetro de parede flexível, ao envolver a amostra com membrana e permitir controle preciso das pressões, mostra-se mais capaz de captar essas variações estruturais e fornecer uma avaliação mais representativa da condutividade hidráulica em escala de campo (ASTM D5084-16a).

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que os diferentes métodos aplicados para avaliar a retenção e a condutividade hidráulica forneceram informações complementares, permitindo uma caracterização mais abrangente do comportamento hídrico dos solos estudados. A associação entre os ensaios HYPROP e WP4-C ampliou a faixa de análise das curvas de retenção, evidenciando que os solos com maior fração arenosa apresentaram menor retenção de água e maior condutividade hidráulica, condizente com o modelo de van Genuchten.

O WP4-C, no entanto, mostrou limitações em amostras com teores de umidade elevados, sugerindo a necessidade de novos testes ou ajustes metodológicos para essas condições.

Em relação à condutividade hidráulica saturada, observaram-se diferenças significativas entre os métodos. No solo de Bingen, o permeâmetro de parede flexível captou melhor a estrutura preservada e a presença de macroporos, resultando em valores mais elevados de K_{sat} quando comparado ao permeâmetro de parede rígida. Já no solo de São Sebastião, mesmo com textura semelhante, a condutividade foi menor nos dois métodos, possivelmente devido a uma estrutura mais compactada ou à presença de finos, sugerindo uma estrutura porosa menos eficiente para o fluxo de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International (2016). ASTM D5084-16a: *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*.
- ASTM International (2016). ASTM D5298-16: *Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper*.
- Besso, Carlos. *Avaliação do efeito da histerese e da resistência à tração na função de umidade em solos não-saturados*. Relatório (Departamento de Engenharia Civil) - Universidade PUC-Rio, Rio de Janeiro, [s.d.].
- Bezerra, J. F. R., Guerra, A. J. T., Rodrigues, S. C. (2012) Relações entre potencial matricial no solo e cobertura vegetal em uma estação experimental, Uberlândia-MG. *Sociedade & Natureza*, v. 24, p. 103-113.
- Brahim, Hanedi Ahmed. (2025) *Propriedades hidráulicas de solos residuais na região serrana do Rio de Janeiro, RJ*. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
- Brooks, R.H. & Corey, A.T. (1964). Hydraulic Properties of Porous Media. Colorado State University, Hydrology papers, (3): 1-27.
- Budhu, M. (2010) *Soil mechanics and foundations*. John Wiley and Sons.



- Chandler, R. J., Crilly, M. S., Montgomery-Smith, G. (1992) A low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, v. 92, n. 2, p. 82–89.
- Decagon Devices. *WP4C Dewpoint Potential Meter Operator's Manual*. Pullman, WA: Decagon Devices, 2010. Disponível em: <https://manuals.metergroup.com/wp4c/>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- Diemer, Francielle *et al.* (2010) Estudo da permeabilidade do solo da região de Ijuí-RS percolando água e óleo diesel. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n. 16, p. 29-41.
- Fredlund, D.G., & Rahardjo, H. (1993) *Soil mechanics for unsaturated soils*. Wiley, New York.
- Fredlund, D.G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 521–532.
- Gardner, R. (1937). A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. *Soil Science*, 43(4), 277–284. <https://doi.org/10.1097/00010694-193704000-00004>
- Hillel, D. (1971) *Soil and water: physical principles and processes*. New York: Academic Press.
- Jesus, L.S. de, Fernandes, J.B., Giacheti, H.L. (2013) Investigação da condutividade hidráulica dos solos de uma área de aterro de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de campo e laboratório. *Ciência & Engenharia*, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 21-28, jan./jun.
- Jong van Lier, Quirin de. (2020) . *Física do solo baseada em processos*. Disponível em: http://www.cena.usp.br/publicacoes/fisica_solo_baseada_processos.pdf. Acesso em: 25 set. 2024.
- Khalili, N., Khabbaz, M.H., Gens, A. (2004). Effective stress in unsaturated soils: review with new evidence. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(6), 557–567.
- Klute, A. (Ed.). (1986) *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1188 p.
- Livingston, Burton Edward. (1906) *The relation of desert plants to soil moisture and evaporation*. Washington: Carnegie Institution of Washington. Publication, n. 50.
- Lu, N., Likos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. Disponível em: https://www.academia.edu/7475106/Unsaturated_Soil_Mechanics . Acesso em: 29 de jun. de 2024.
- Marinho, F.A.M. (1994). *Shrinkage behavior of some plastic soils*. PhD thesis, Imperial College, University of London.
- Marinho, F.A.M. (2005). *Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados*. Tese de Livre Docência pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. 300p.
- Menezes, Luísa Carla de Alencar. (2018) *Estudo da influência da água da chuva na plataforma ferroviária*. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia.
- Oliveira, V.F.M. de. (2024) *Desenvolvimento de medidor de sucção utilizando técnicas de impressão 3D: um estudo de viabilidade*. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Shull, Charles Albert. (1916) Measurement of the surfaces forces in soils. *The Botanical Gazette*, v. LXII, n. 1, p. 1-31.
- Soares, Ecidinéia Pinto. (2008) *Caracterizações geotécnica e mineralógica de um filito dolomítico do Quadrilátero Ferrífero com vistas ao estudo de estabilidade de taludes incorporando a sucção*. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., Clifton, A.W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379–392.
- Van Genuchten, M.TH. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Society of America Journal*, 44, 892 – 898.