

Curva de Retenção de um Solo Coluvionar a partir da Técnica do Papel Filtro e de Porosimetria de Mercúrio

Pedro Alves de Carvalho Reis

Discente do Curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, carvalho.reis@unesp.br

Mariana Ferreira Benessiuti Motta

Professora Assistente Doutora, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, mariana.motta@unesp.br

Márcio Roberto Magalhães de Andrade

Pesquisador, CEMADEN, São José dos Campos, Brasil, marcio.andrade@cemaden.gov.br

Daniel Metodiev

Bolsista, CEMADEN, São José dos Campos, Brasil, daniel.metodiev@cemaden.gov.br

RESUMO: O ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio é uma técnica que permite a obtenção da representação quantitativa da microestrutura do solo através da sua porosidade interconectada. A partir da curva de distribuição dos poros, é possível prever a curva de retenção do material baseando-se nas leis de capilaridade. Ainda, a técnica do papel filtro consiste em um método simples, rápido e econômico de se medir a sucção do solo. Seu princípio se baseia na hipótese de que o papel filtro entra em equilíbrio de energia com o solo com certa umidade. Neste sentido, este estudo visa comparar as duas técnicas para obtenção da curva de retenção de umidade de um solo coluvionar localizado em uma área de risco da cidade de Santos-SP. A análise comparativa, a partir de amostras indeformadas, se deu tanto no formato das curvas obtidas quanto nos valores de entrada de ar e de sucção residual. Como os fluidos de intrusão são diferentes para cada técnica, tal estudo é de extrema importância já que a curva de retenção é fundamental nas análises de estabilidade da área estudada.

PALAVRAS-CHAVE: solos não saturados, curva de retenção de umidade, papel filtro, porosimetria de mercúrio, distribuição de poros.

ABSTRACT: The mercury injection porosimetry test (MIP) is a technique that allows the obtention of the quantitative representation of the soil's microstructure through its interconnected porosity. From the pore distribution curve, it is possible to predict the retention curve of the material, based on que capillary laws. Yet, the filter paper technique consists in a simple, fast and economic method to measure the soil's suction. Its principle is based on the hypothesis that the filter paper balances its energy with the energy of the soil in a certain moisture. In that sense, this study seeks to compare the two techniques to obtain the SWRC of a colluvial soil located in a rik-subject area in the city of Santos-SP. The comparative analysis, from undeformed samples, took place both in the format of the obtained curves and in the points of air entrance and residual suction. As the fluids of intrusion are different for each technique, such study is of extreme importance, given that the SWRC is fundamental in the stability analysis of the studied area.

KEYWORDS: unsaturated soils, soil-water retention curve, filter paper, mercury intrusion porosimetry, pore distribution.

1 INTRODUÇÃO

Num contexto global onde os eventos climáticos extremos ocorrem com cada vez mais frequência (IPCC, 2023), a compreensão do comportamento de solos não saturados se torna cada vez mais importante, já que movimentos de massa podem ser responsáveis por causar danos na esfera ambiental, econômica e social (Carvalho e Bernardinho, 2023). Com frequência esses acontecimentos estão diretamente relacionados com a ocorrência de eventos meteorológicos impulsionados pelas mudanças climáticas (Bustamante, 2010).

Uma vez que a presença de água na estrutura dos grãos influencia fortemente os índices físicos do solo, e, conseqüentemente, no seu comportamento geomecânico (Pinto, 2006), o estudo da relação água-solo é de extrema importância, principalmente no âmbito da geotecnia ambiental (Bicalho *et al.*, 2007). Uma das maneiras de se analisar esse comportamento é através da curva de retenção de umidade do solo, que relaciona a capacidade de um solo reter água com o seu teor de umidade (Nascimento *et al.*, 2010). Essa capacidade também pode ser denominada como potencial mátrico, e é relacionado com as forças capilares e de adsorção que atuam em solos não saturados (Vieira, 2006).

A obtenção da curva de retenção é possível por diferentes métodos, que buscam inferir o potencial mátrico do solo através de diferentes abordagens de ensaio, aparelhagem, amostragem e cálculo. Destes, três métodos se destacam por fazerem uso de instrumentações e recursos relativamente mais simples, e por serem amplamente utilizados. São eles: o da placa de sucção (ou funil de Haines), o da placa de pressão e o do papel filtro. O método do papel filtro acaba por ter ainda mais notoriedade, pois não encontra as mesmas dificuldades presentes nos demais ensaios, tais como: a limitação de espaço físico para realização, necessidade de boa precisão de leitura e determinação de resultados para o cálculo indireto da sucção, ou até mesmo necessidade de controle minucioso da temperatura do ambiente. Fatores esses que podem acabar por prejudicar os resultados obtidos com os métodos (Marinho *et al.*, 2023).

Considerando as problemáticas apresentadas pelos ensaios clássicos, o método do papel filtro se apresenta como uma solução relativamente mais simples e econômica (Motta, 2016), uma vez que se utiliza de materiais e aparelhos mais comuns, e demanda menos tempo de preparo e realização de ensaio; ao mesmo tempo que proporciona resultados com boa precisão - desde que o papel filtro seja manuseado corretamente e que se use uma calibração adequada (Lucas *et al.*, 2011). Alternativamente, também existe o método de porosimetria por mercúrio, que através da introdução de mercúrio nas amostras, permite o entendimento dos poros da estrutura de solo, e conseqüentemente a determinação de resultados para a curva de retenção relativamente próximos aos do método descrito anteriormente (Mendes e Marinho, 2020).

Visto que a sucção matricial pode ser determinada por diversos métodos - e que cada um deles apresenta determinadas vantagens e desvantagens, é possível encontrar na literatura, diversos trabalhos científicos que buscam estudar o comportamento desses métodos aplicando-os em diferentes tipos de solos e situações, assim como comparando os resultados de metodologias diferentes para uma mesma amostragem.

Melo Filho *et al.* (2015) estudaram a elaboração da curva de retenção com o método do psicrômetro em apoio ao ensaio da Câmara de Richards, e constataram que ambas abordagens apresentaram resultados semelhantes, com algumas variações. Porém, também foi notado que houve certa dificuldade para se definir qual seria o tamanho aceitável da amostra de pontos ensaiados. Lucas *et al.* (2011) também realizaram um estudo semelhante, comparando porém a técnica do papel filtro com a câmara de pressão de Richards em um latossolo vermelho. Foi constatado que o método do papel filtro apresentou resultados satisfatórios quando comparados com os da câmara de pressão, e que pode ser adotado como ensaio alternativo.

Mendes e Marinho (2020) estudaram o comportamento das curvas de retenção obtidas pelos métodos tradicionais (placa de pressão, placa de sucção e papel filtro), comparadas às curvas obtidas pela técnica de porosimetria de mercúrio (MIP). Eles atestaram que a técnica de porosimetria superestima a capacidade de retenção de água para sucções mais baixas. Foi concluído que apesar de apresentarem formatos semelhantes, as curvas obtidas pela porosimetria são geralmente deslocadas para a direita em relação às técnicas tradicionais, sugerindo tamanhos de poros menores. Tal fato está relacionado a mudança de volume induzida pela secagem prévia em estufa das amostras submetidas à injeção de mercúrio.

Assim sendo, o presente artigo tem como objetivo comparar os métodos do papel filtro e da porosimetria de mercúrio, analisando os resultados obtidos para uma mesma amostra de solo coletada em uma região de risco a deslizamentos no litoral sul do estado de São Paulo, na cidade de Santos, SP, Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solo

O solo utilizado nos ensaios foi coletado no Morro do José Menino, em Santos-SP - uma área de risco monitorada pelo CEMADEN. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas (a partir de um bloco indeformado extraído) à pouca distância de uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD), na camada mais superficial do perfil.

A partir dos ensaios de caracterização foi possível compreender que o solo estudado é uma areia argilosa, tanto pela classificação expressa pela ABNT e pelo SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos). Essas análises são evidenciadas pelos dados expostos na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1. Índices físicos do solo estudado.

Propriedade	w	e	n	S	Gs [g/cm ³]
Valor	20,8%	0,79	44%	70%	2,63
Propriedade	ρ_t [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	LL	LP	IP
Valor	1,77	1,47	38%	22%	16%

Tabela 2. Composição granulométrica do solo estudado.

Partícula	Composição
Pedregulho	4,97%
Areia Grossa	19,09%
Areia Média	13,29%
Areia Fina	24,14%
Silte	3,14%
Argila	35,37%

2.2 Método do Papel Filtro

O método do papel filtro consiste em inferir a capacidade de sucção do solo através de uma curva de calibração de umidade. Em contato, o solo (úmido) e o papel entram em equilíbrio de energia e se considera que apresentam a mesma sucção. Com a calibração do papel filtro é possível, portanto, determinar a sucção matricial do solo através da umidade aferida no papel filtro (Bicalho *et al.*, 2007).

Todo o procedimento de ensaio foi baseado nas diretrizes previstas na norma D5298-03 (ASTM, 2010). Com o auxílio de cilindros biselados, foram coletadas dez amostras indeformadas do bloco preservado em estado natural. Após a determinação da umidade e dos demais índices físicos de cada anel, foi estipulado um valor de umidade para cada amostra, com o objetivo de se obter valores de sucção para diferentes situações de saturação do solo.

Optou-se por determinar a curva de retenção pela trajetória de secagem, onde os anéis foram inicialmente saturados por capilaridade por três dias, conforme mostrado na Figura 1. Ao final desse período, foram submetidos à secagem em temperatura ambiente até que atingissem a massa determinada para cada teor de umidade estabelecido.



Figura 1. Amostras durante o período de saturação.

Atingindo-se o peso determinado, as amostras foram colocadas em contato com o papel filtro pelo topo e pela base dos anéis, de forma que toda a superfície do papel estivesse em contato com toda a área de solo, isoladas do ambiente em camadas alternadas de plástico filme e papel alumínio e identificadas. O papel filtro utilizado foi o modelo Whatman N°42.

Após sete dias, as umidades de cada papel filtro foram obtidas a partir da proposta de Chandler *et al.* (1992), que determina duas equações (equação 1 e 2), para diferentes valores de umidade.

$$W_{pf} \leq 47\% \rightarrow \Psi = 10^{[4,84 - 0,0622 \times W_{pf}]} \quad (1)$$

$$W_{pf} > 47 \rightarrow \Psi = 10^{[6,05 - 2,48 \times \log(W_{pf})]} \quad (2)$$

Onde W_{pf} é a umidade do papel filtro e Ψ é a sucção matricial.

A partir dos pontos experimentais, utilizou-se o software “SWRC *Fit*” para o ajuste da curva de retenção de água no solo. A curva de retenção pode ter o comportamento uni ou bimodal e através do software é possível testar vários ajustes e verificar qual o comportamento característico do solo ensaiado.

2.3 Método da Porosimetria por Mercúrio

A caracterização dos poros do solo estudado foi realizada por meio da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP). Esta técnica permite avaliar os diferentes diâmetros dos poros e sua distribuição no material analisado. Para tanto foi utilizado o equipamento Poresizer 9320 da Micromeritics Instrument Corporation, capaz de inspecionar poros de até 6×10^{-6} mm de diâmetro a uma pressão aplicada de 212 MPa.

Segundo Romero e Simms (2008), na técnica MIP uma pressão absoluta P é aplicada a um líquido não molhante (mercúrio) para entrar nos poros vazios. Para cada etapa de aplicação de pressão foi determinado o volume de mercúrio injetado nos poros da amostra.

Como a porosimetria é baseada nas leis de capilaridade que regem a intrusão de um fluido, é possível correlacionar os resultados da MIP com os resultados da curva de retenção de água no solo (SWRC) (Motta, 2016; Mendes e Marinho, 2020; Delcourt *et al.*, 2022; Gomes *et al.*, 2023). O fenômeno de dessorção de água que ocorre na curva de secagem SWRC pode estar associado à expulsão de ar dos poros por injeção de mercúrio. Neste contexto, os resultados obtidos pelos testes MIP foram comparados com o ajuste obtido no software SWRC *Fit*, visando a aplicabilidade de tal técnica na estimativa desta importante propriedade do solo não saturado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do ensaio de porosimetria, foi possível obter a curva de distribuição dos poros, conforme observado na Figura 2. Baseado no que foi adotado por Motta (2016), Delcourt *et al.* (2022) e Gomes *et al.* (2023), os microporos estão relacionados à fração argila ($\varphi < 0,2\mu\text{m}$), os mesoporos à fração silte ($0,2 < \varphi < 6\mu\text{m}$) e os macroporos à fração areia ($\varphi > 6\mu\text{m}$). Assim, ao quantificar a curva obtida de cada amostra, pode-se observar que o solo coluvionar estudado apresenta uma grande incidência de microporos e, secundariamente, de macroporos. A caracterização exata da estrutura dos poros do solo coluvionar está explicitada na Tabela 3.

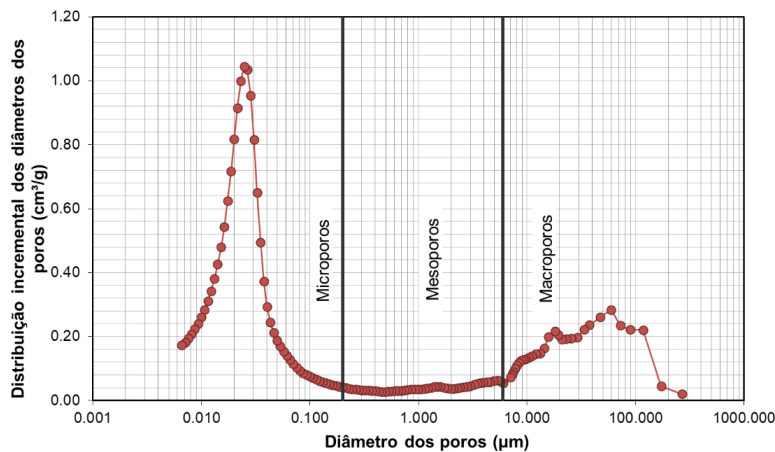


Figura 2. Gráfico da distribuição incremental dos diâmetros dos poros.

Tabela 3. Distribuição dos poros no solo estudado.

Classe	Tamanho	Composição
Microporos	$\varphi < 0,2\text{mm}$	59,55%
Mesoporos	$0,2\text{mm} < \varphi < 6\text{mm}$	7,09%
Macroporos	$\varphi > 6\text{mm}$	33,36%

Na Tabela 4, é comparado o valor para o índice físico de porosidade total do solo obtido pelo método de porosimetria e pelo cálculo inicial durante a caracterização da amostra, pelos índices físicos. É possível perceber que o resultado calculado indica uma porosidade maior, mesmo que o mercúrio tenha boa capacidade de penetração nos poros do solo. Tal fato, também observado em Motta (2016), Delcourt *et al.* (2022) e Gomes *et al.* (2023), pode ser justificado pela presença de poros isolados e/ou oclusos não alcançados pela técnica de intrusão de mercúrio.

Tabela 4. Valores obtidos para a porosidade.

MIP	Índice
37,29%	44,15%

Para o método do papel filtro, os resultados foram calibrados pelo SWRC *Fit* pelo ajuste bimodal de Van Genuchten, o que proporcionou a curva de retenção demonstrada na Figura 3. O ajuste Dual VG foi escolhido entre os demais fornecidos pelo software, pois foi o que apresentou um melhor ajuste para os pontos experimentais obtidos.

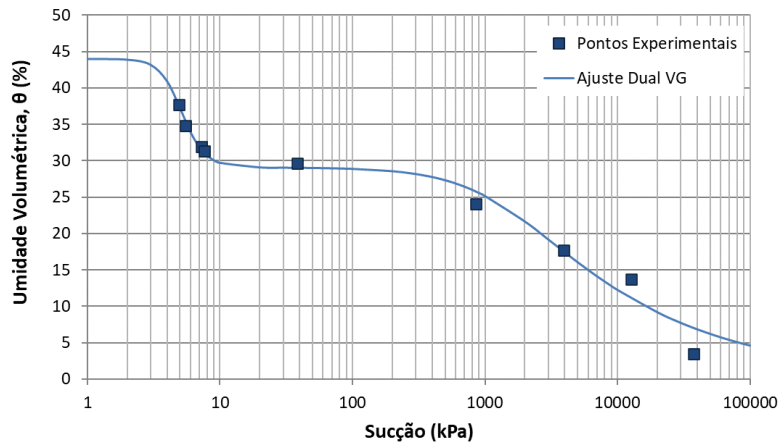


Figura 3. Curva de retenção bimodal ajustada pela proposta Dual Van Genuchten, considerando pontos experimentais obtidos pela técnica do papel filtro.

Expressando uma curva de retenção (Figura 4) a partir dos dados da porosimetria de mercúrio, é possível comparar os resultados dos dois ensaios e fazer algumas observações. As duas curvas apresentam um comportamento bimodal similar, com a primeira inflexão ocorrendo entre 3 e 8 kPa de sucção, e a segunda inflexão ocorrendo aproximadamente entre 1000 e 10000 kPa. Esse traçado evidencia o que foi observado na Figura 2: o solo estudado apresenta duas famílias principais de poros.

Há uma presença de macroporos - representada na primeira inflexão - onde grandes teores de umidade resultam em um baixo potencial mátrico, seguida por uma menor quantidade de mesoporos - representando um “patamar” onde pequenas variações na saturação do solo resultam em grande ganho de sucção. Por fim, há a presença dos microporos, que por conta de seu tamanho reduzido, conseguem apresentar maiores valores de sucção para menores níveis de umidade.

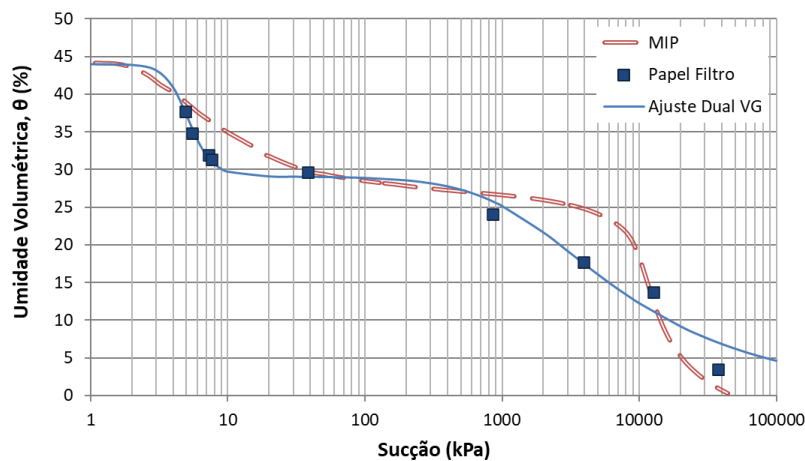


Figura 4. Comparação das curvas de retenção pelos dois métodos estudados.

Apesar da satisfatória proximidade, a curva referente a porosimetria tende a apresentar valores ligeiramente maiores de sucção nos arredores das inflexões. Variação semelhante foi observada por Mendes e Marinho (2020), e foi atribuída à secagem prévia e a consequente possibilidade de alteração na estrutura dos grãos na técnica MIP. Além disso, outros fatores mencionados pelos autores também podem ser considerados neste estudo, tais como: saturação prévia das amostras submetidas ao ensaio com papel filtro e aplicação de vácuo previamente à técnica da porosimetria.

Por fim, na Tabela 5 estão explicitados os valores de sucção que delimitam o intervalo onde ocorrem as inflexões em ambas as curvas. Novamente, apesar da proximidade (em ordem de grandeza), existem

ligeiras variações entre os dois métodos. Motta (2016) obteve o mesmo comportamento para o solo coluvionar de Tinguá, onde as maiores diferenças são verificadas na zona de microporos.

Tabela 5. Valores de sucção para os dois métodos

Sucção	Dual VG	MIP
ψ_{ar1} (kPa)	3,5	2
ψ_{r1} (kPa)	8	25
ψ_{ar2} (kPa)	680	7.000
ψ_{r2} (kPa)	25.000	20.000

4 CONCLUSÃO

Esse presente trabalho teve como propósito estudar e comparar dois métodos de obtenção da curva de retenção de umidade de um solo coluvionar: papel filtro, pelo método tradicional, e estimado pela porosimetria de mercúrio.

A partir dos resultados obtidos e das análises feitas, foi possível concluir que tanto o método do papel filtro, quanto o método da porosimetria de mercúrio são testes eficazes para a quantificação do potencial matricial dos solos. Ambas as curvas apresentaram formatos semelhantes, porém, a variação na preparação das amostras pode interferir no resultado, causando variação dos valores nos pontos de inflexão das curvas.

Como esse ainda é um estudo introdutório, as discussões aqui levantadas serão exploradas mais a fundo em futuros trabalhos. É possível repetir a técnica do papel filtro para a trajetória de umedecimento e avaliar o efeito da histerese desta técnica comparada à curva obtida pela MIP. Ainda, pode-se analisar outras técnicas de obtenção da curva de retenção, e também verificar o efeito do intemperismo do solo na utilização da MIP para a estimativa da curva de retenção. Assim, será possível produzir uma análise mais conclusiva sobre a aplicabilidade da porosimetria de mercúrio para estudos de curva de retenção do solo. O entendimento destas técnicas podem auxiliar os estudos associados às áreas de risco monitoradas pelo CEMADEN.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), com a concessão do Projeto de Pesquisa Regular, processo nº 2023/04461-4. Também agradecem ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) pela parceria nesta pesquisa, e em conjunto ao Projeto REDEGEO pelo apoio, através da Carta Convite MCTI/FINEP/FNDCT 01/2016, Instrumento contratual código N° 0.1.16.0068.00.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2016) Solo - *Determinação do Limite de Liquidez*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2016) NBR 7180: *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2016) NBR 7181: *Solo – Análise Granulométrica*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2016) NBR 6508: *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*.

ASTM International (2010). ASTM D5298-03: *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*.

- Bicalho, K., Gomes Correia A., Ferreira, S. (2007) Filter paper method of soil suction measurement. *Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13.
- Bustamante, T. (2010) *Impactos da chuva na ocorrência de deslizamento de terra e inundações no estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Carvalho, E., Bernardinho, D. (2023) *Mudanças climáticas, eventos climáticos extremos e movimentos de massa no Brasil: Uma revisão sistemática*. In: Andrade, J. *Desafios globais, soluções locais: Avanços em Ciências Agrárias e Ambientais*. Disponível em: <<http://editoraliceri.com.br/index.php/ojs/article/view/333>>. Acesso em: 03 abr. 2024.
- 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*.
- Delcourt, R.T., De Campos, T.M.P., Antunes, F.S. (2022). Interrelationship among weathering degree, pore distribution and water retention in an unsaturated gneissic residual soil. *Engineering Geology*, 299.
- Filho, J., Sacramento J., Conceição B. (2015) Curva de retenção de água elaborada pelo método do psicrômetro para uso na determinação do índice “s” de qualidade física do solo. *Revista Engenharia Agrícola*.
- Gomes, F., Motta, M., Bernardes, G., Soares, P. (2023) Influence of coconut fiber on the microstructural, mechanical and hydraulic behavior of unsaturated compacted soil. *Soils & Rocks*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2023) *CLIMATE CHANGE 2023 - Synthesis Report*. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Acesso em: 04 abr. 2024.
- Lucas, J. (2011) *Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná / UNIOESTE.
- Pinto, C. S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*, 3ª ed., Oficina de Textos, São Paulo.
- Marinho, F., Soto, M., Gitirana Junior, G. (2023) *Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção*. In: Carvalho, J. et al. (2023) *Solos não saturados no contexto geotécnico*. Disponível em: <<https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/978-65-992098-3-3>>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- Mendes, R., Marinho, F. (2020) Soil water retention curves for residual soils using traditional methods and MIP. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38.
- Motta, M. (2016) *Caracterização Físico-Hídrico-Estrutural e Efeito do Aumento da Pressão do Ar na Resistência de Solos Tropicais Não Saturados*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio.
- Nascimento, P. S., Bassoi, L. H., Paz, V. P., Vaz, C. M., Naime, J. M., Manieri J. M. (2010) Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo. *Revista Irriga*.
- Romero, E., Simms, P.H. (2008). Microstructure investigation in unsaturated soils: a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26.
- Vieira, M. (2006) *Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária / UPF.