

Caracterização Hidráulica de Dois Perfis de Solo Monitorados por Sensores de Umidade em Blumenau-SC

Jhonathan dos Santos Pacheco

Discente de Graduação, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá (FEG-UNESP), Guaratinguetá-SP, Brasil, jhonathan.santos@unesp.br

Mariana Ferreira Benessiuti Motta

Professora Doutora, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá (FEG-UNESP), Guaratinguetá-SP, Brasil, mariana.motta@unesp.br

Pedro Ivo Mioni Camarinha

Pesquisador, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), São José dos Campos-SP, Brasil, pedro.camarinha@cemaden.gov.br

Márcio Roberto Magalhães de Andrade

Pesquisador, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), São José dos Campos-SP, Brasil, marcio.andrade@cemaden.gov.br

Daniel Metodiev

Bolsista, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), São José dos Campos-SP, Brasil, daniel.metodiev@cemaden.gov.br

RESUMO: Caracterizar hidráulicamente solos tropicais é essencial para entender os mecanismos deflagradores de deslizamentos. Este trabalho avalia dois perfis de solos residuais monitorados por sensores do CEMADEN em Blumenau-SC: Zendron e Thabrulay. Amostras indeformadas dos horizontes B e C foram ensaiadas em campo, com permeâmetro de Guelph, e em laboratório, usando KSAT, HYPROP e WP4C, obtendo condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e curvas de retenção de água (SWRC). Os resultados indicam K_{sat} muito baixa em ambos os perfis (10^{-8} – 10^{-10} m/s), com leve aumento em profundidade. O horizonte B do Zendron, de textura silto-argilosa, reteve 35–45 % de umidade em sucções menores que 10 kPa, enquanto o Thabrulay, mais areno-siltoso, reteve 28–31%. A transição granulométrica entre horizontes gera descontinuidades hidráulicas que favorecem saturação localizada durante chuvas intensas, sobretudo no Zendron. Esses parâmetros refinam limiares críticos de umidade usados em sistemas de alerta e subsidiam modelagens de fluxo não saturado aplicadas à gestão de risco de encostas em áreas tropicais.

PALAVRAS-CHAVE: Blumenau, caracterização hidráulica, K_{sat} , SWRC, sensores de umidade, deslizamentos.

ABSTRACT: Soil hydraulic characterization is essential to understand the mechanisms that trigger landslides, especially in regions with a history of natural disasters such as Blumenau, Brazil. This study aimed to hydraulically characterize two soil profiles (Zendron and Thabrulay) monitored by soil moisture sensors of the National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (CEMADEN) in Blumenau. Saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) and soil water retention curves (SWRC) were determined through field tests with a Guelph permeameter and laboratory tests using the KSAT, HYPROP, and WP4C devices. The results revealed differences between the profiles: the Zendron soil, with a predominantly silty-clay texture, showed greater water retention capacity (35–45% moisture at low suctions in the B horizon), while the Thabrulay profile, with a predominantly sandy-silt texture, demonstrated lower retention capacity (28–31% under similar conditions). Both profiles exhibited very low saturated hydraulic conductivity, influenced by compact structure and mineralogical composition. Analysis of the B and C horizons revealed low hydraulic conductivity throughout both profiles. These results provide important technical insights for establishing critical moisture thresholds that can improve early warning systems against landslides in the region.



KEYWORDS: Blumenau; hydraulic characterization; saturated hydraulic conductivity (Ksat); soil water retention curve (SWRC); moisture sensors; landslides.

1 INTRODUÇÃO

Blumenau, localizada no estado de Santa Catarina (SC), é uma região marcada por relevo acidentado e alta pluviosidade, fatores que contribuem para frequentes deslizamentos de terra. Um evento severo ocorreu em novembro de 2008 no Vale do Itajaí, evidenciando a vulnerabilidade local a desastres naturais. Os solos tropicais residuais da região, resultantes do intenso intemperismo químico das rochas, possuem alta heterogeneidade estrutural e mineralógica. Essas características influenciam diretamente parâmetros hidráulicos como a curva de retenção de água no solo (SWRC, Soil Water Retention Curve) e a condutividade hidráulica saturada (Ksat), fundamentais para modelar processos de infiltração e prever condições críticas de saturação do solo. Estudos têm destacado que as propriedades dos solos tropicais diferem significativamente daquelas de solos temperados, exigindo ajustes em modelos tradicionais de estabilidade de encostas e fluxo hídrico para refletir as condições tropicais (Tomasella & Hodnett, 2004; Santos et al., 2018; Mello et al., 2019; Zhang et al., 2022).

No contexto geotécnico, a saturação progressiva dos solos superficiais induzida por chuvas intensas leva à redução da resistência ao cisalhamento e pode desencadear rupturas e deslizamentos. Em regiões montanhosas úmidas, a infiltração durante tempestades reduz a sucção matricial nos solos não saturados, diminuindo sua estabilidade (Fredlund & Rahardjo, 1993; Sitarenios et al., 2021). Para compreender melhor esses processos, é necessário caracterizar as propriedades hidráulicas dos solos in situ e em laboratório. Métodos de campo, como o permeâmetro de Guelph, permitem medir a Ksat diretamente no solo sob condições controladas (Reynolds & Elrick, 1985). Em laboratório, equipamentos modernos – por exemplo, o KSAT (para medir Ksat em amostras indeformadas), o sistema HYPROP (para obtenção da SWRC via método de evaporação) e o WP4C (para medir potenciais matriciais em altas sucções) – possibilitam análises precisas do comportamento hidráulico do solo em diferentes faixas de umidade. Tais técnicas integradas fornecem dados para correlacionar medições contínuas de campo (como as de sensores de umidade e pluviômetros das Plataformas de Coleta de Dados geotécnicas do CEMADEN) com parâmetros obtidos em laboratório, aprimorando a compreensão dos mecanismos de instabilidade em encostas tropicais.

Diante desse contexto, este trabalho realiza uma caracterização hidráulica integrada de dois perfis de solo tropical em Blumenau-SC monitorados por sensores do CEMADEN (perfis denominados Zendron e Thabrulay). O objetivo é caracterizar hidraulicamente os solos monitorados nos perfis Zendron e Thabrulay, correlacionando parâmetros de campo e de laboratório.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Os perfis estudados localizam-se em duas encostas da cidade de Blumenau-SC que contam com monitoramento geotécnico do CEMADEN. O perfil Zendron situa-se no bairro Garcia e está associado à Formação Rio do Sul (unidade geológica NP3ijgr), composta predominantemente por siltitos e arenitos finos. Essa origem explica a textura silto-argilosa observada nos horizontes superiores do perfil Zendron. Por sua vez, o perfil Thabrulay, localizado no bairro Fortaleza Alta, está inserido no Complexo Luis Alves (unidade A4PP2la), constituído por gnaisses granulíticos (Figura 1). Consequentemente, o solo Thabrulay apresenta textura mais arenosa, embora com presença de fração siltica, especialmente no horizonte C. Ambos os perfis representam solos residuais tropicais típicos da região, com variações granulométricas marcantes com a profundidade que influenciam seu comportamento hidráulico.

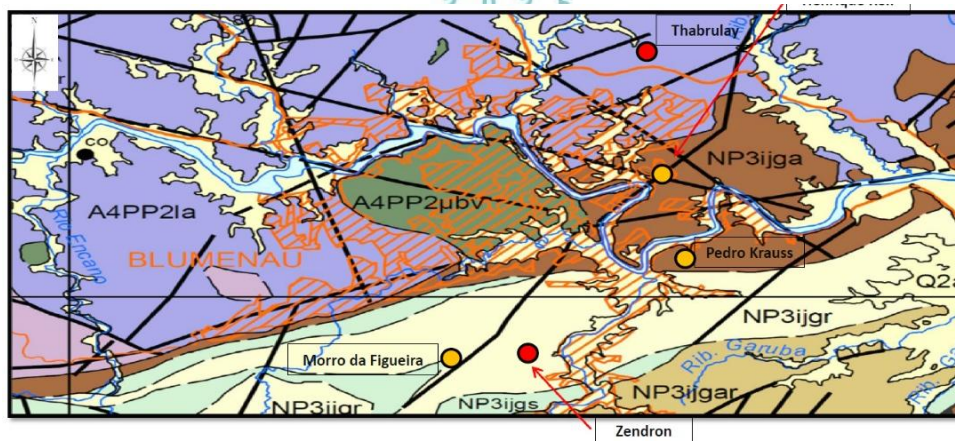


Figura 1. Mapa Geológico da região de Blumenau – SC.

2.2 Amostragem de solo

Foram selecionados para estudo os horizontes B e C de cada perfil, por serem camadas mineralógicas representativas e correspondentes às profundidades dos sensores de umidade instalados. A coleta de amostras indeformadas foi realizada com anéis metálicos de diâmetro padrão cravados manualmente nos horizontes B e C de cada local. Esse procedimento seguiu protocolos normatizados (ABNT NBR 6457/2016) para garantir a preservação da estrutura original e a representatividade das amostras em relação às condições *in situ* (Silva, 2024).

Tais amostras indeformadas foram utilizadas nos ensaios de laboratório, para a determinação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e da curva de retenção de umidade (SWRC), descritos no item a seguir.

O perfil PCD-Thabrulay inicia-se, do nível do terreno até 2,0 m, com uma areia argilosa de baixa plasticidade e densidade relativa dos grãos (G_s) de 2,71 g/cm³, interpretada como horizonte B. De 2,0 m a 2,8 m, ocorre a zona de transição, caracterizada como horizonte C, composta por uma areia siltosa e densidade relativa dos grãos de 2,56 g/cm³. Entre 2,8 m e 3,3 m aparece um saprolito areno-siltoso cinza-escuro, menos intemperizado e de maior compactidade.

No perfil PCD-Zendron predominam, de 0,0 m a 1,3 m, um solo silte argiloso, com densidade relativa dos grãos de 2,58 g/cm³, constituindo o horizonte B. De 1,3 m a 2,7 m segue-se uma fração silte-arenosa com G_s em torno de 2,62 g/cm³ e gradativo aumento de areia fina, definindo o horizonte C. Entre 2,7 m e 3,2 m aflora um saprolito siltoso compacto.

2.3 Ensaios de laboratório (K_{sat} e SWRC)

No laboratório, as amostras indeformadas de cada horizonte foram ensaiadas quanto à condutividade saturada e à retenção de água. A K_{sat} de laboratório foi medida com o equipamento KSAT (METER Group), utilizando o método de carga variável (falling head): aplica-se inicialmente uma carga de água sobre a amostra e monitora-se a taxa de queda do nível ao longo do tempo, obtendo a condutividade saturada após calibração conforme especificações do fabricante (METER Group Inc., 2021).

Em seguida, na mesma amostra, foi realizada a obtenção da curva de retenção de água no solo (SWRC) utilizando o sistema HYPROP. Esse ensaio de evaporação consiste em saturar a amostra e, posteriormente, monitorar a perda de massa por secagem enquanto dois tensiômetros embutidos medem a sucção matricial em diferentes profundidades da amostra. O resultado é a relação umidade–sucção durante o processo de secagem, cobrindo a faixa de baixas a médias sucções (tipicamente 0 a ~100 kPa).

Para estender a SWRC até sucções mais elevadas (até cerca de 10⁴ kPa), foram realizadas medidas complementares de potencial matricial com o WP4C, um psicrômetro de ponto de orvalho, em amostras do solo seco. Assim, combinando os dados de HYPROP e WP4C, obteve-se a curva de retenção completa de cada horizonte.

2.4 Ensaios de campo

A condutividade hidráulica saturada em campo foi determinada por meio de ensaios com o permeâmetro de Guelph. Em cada perfil, foram realizados ensaios em diferentes profundidades (próximas às dos sensores) aplicando-se cargas hidráulicas constantes de 5 cm e 10 cm de altura de água. Após atingir regime permanente de infiltração, a vazão foi registrada e utilizada para calcular a condutividade hidráulica saturada de campo (Kfs) segundo a fórmula utilizada para o cálculo da Ksat com o permeâmetro de Guelph, no método de carga constante, conforme equação 1.

$$Kfs = \frac{C \cdot Q}{\pi \cdot H^2} \quad (1)$$

onde:

Kfs: condutividade hidráulica saturada de campo (cm/s),

C: fator de forma (adimensional),

Q: taxa de fluxo estacionário (cm³/s),

H: altura da água no poço (cm).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Condutividade hidráulica saturada (Ksat)

Os solos dos perfis Thabrulay e Zendron apresentaram valores de condutividade hidráulica saturada extremamente baixos, típicos de solos lateríticos compactos e cimentados por óxidos. Em ambos os perfis, a Ksat medida situa-se na ordem de 10⁻⁸ a 10⁻¹⁰ m/s. No perfil Thabrulay, os ensaios de laboratório indicaram Ksat variando de aproximadamente 3×10⁻⁸ a 6×10⁻⁸ m/s (aumentando ligeiramente nos horizontes mais profundos).

Já os ensaios in situ no Thabrulay revelaram valores ainda menores, da ordem de 10⁻⁹ a 10⁻¹² m/s ao longo do perfil, evidenciando uma permeabilidade muito baixa também em campo. No perfil Zendron, os resultados de Ksat em laboratório ficaram em torno de 10⁻¹⁰ m/s nas camadas superficiais, aumentando para cerca de 10⁻⁹ m/s nos horizontes mais inferiores. Os ensaios de campo no Zendron mostraram valores iniciais de 4×10⁻¹⁰ m/s próximos à superfície, elevando-se até 10⁻⁹ m/s nas maiores profundidades. Observa-se, portanto, que ambos os solos possuem permeabilidade saturada classificável como muito baixa, com pouca diferença de magnitude entre os dois perfis (ordens de 10⁻⁸ a 10⁻¹⁰) (Figura 2).

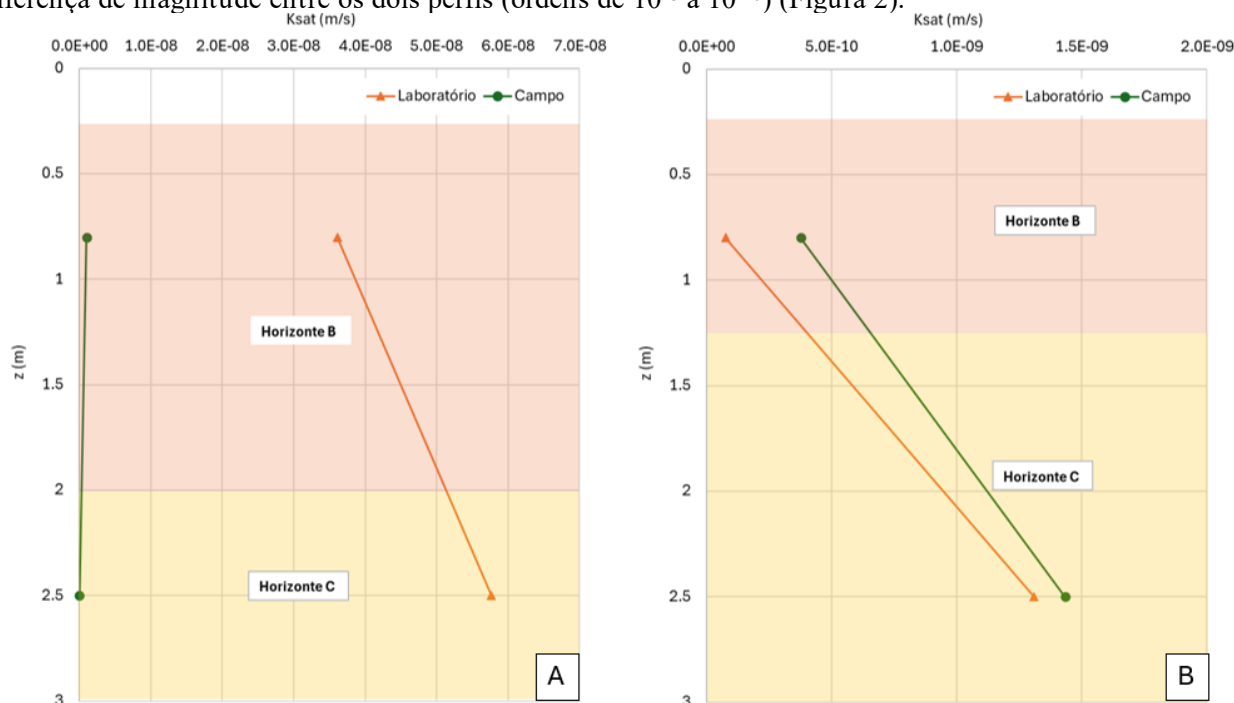


Figura 2. Perfis de condutividade hidráulica saturada (Ksat) dos solos. A) Thabrulay e B) Zendron.

As tendências de aumento de K_{sat} com a profundidade podem estar relacionadas à redução do grau de intemperismo e da estrutura macroporosa nas camadas mais profundas. As discrepâncias entre resultados de laboratório e campo – especialmente no perfil Thabrulay, onde os valores *in situ* foram menores – podem ser atribuídas à heterogeneidade do solo *in situ* e à existência de caminhos preferenciais de fluxo ou bolsões menos permeáveis que influenciam a infiltração (Reynolds & Elrick, 1990). De modo geral, a estrutura densa com microagregados cimentados por óxidos de ferro e alumínio limita a conectividade dos poros e explica os baixos valores de K_{sat} observados. Esses resultados estão de acordo com medições em outros solos tropicais de Santa Catarina, que indicam permeabilidades saturadas da ordem de 10^{-9} a 10^{-11} m/s em perfis lateríticos compactos (Fernandes et al., 1999; Leão & Silva, 2004; CPRM, 2011).

3.2 Curvas de retenção de água (SWRC)

Os ensaios de retenção de água nos dois perfis evidenciaram comportamentos contrastantes entre os horizontes de textura mais fina (silto-argilosa) e os de textura mais grossa (areno-siltosa). De maneira geral, os horizontes B de ambos os perfis apresentaram maior capacidade de retenção de umidade em baixas sucções em comparação aos respectivos horizontes C, devido ao maior teor de fração fina (silte+argila) nas camadas superiores. Essa tendência foi mais pronunciada no perfil Zendron (Figura 3).

O horizonte B do Zendron exibiu umidades volumétricas iniciais elevadas, em torno de 35–45% para sucções próximas de 1 kPa, valor muito superior ao observado no perfil Thabrulay. Já o horizonte B do Thabrulay (Figura 4) apresentou teor de umidade inicial entre 28% e 31% nas mesmas condições de baixa sucção. Essa diferença significativa reflete a distinta composição textural: o solo Zendron (silte argiloso) contém uma proporção maior de microporos capazes de reter água, ao passo que o solo Thabrulay (mais arenoso) possui predominância de macroporos que drenam facilmente. Consequentemente, as curvas de retenção do Zendron B mostraram inclinações mais suaves (queda mais gradual da umidade com o aumento da sucção), enquanto as do Thabrulay B apresentaram declínio mais acentuado – indicando liberação mais rápida da água retida conforme o solo seca.

Nos horizontes C, ambos de textura silto-arenosa, a capacidade de retenção foi menor. O horizonte C de Thabrulay (Figura 4B) iniciou as curvas de retenção com umidade em torno de 24–27% a sucção baixa, ligeiramente inferior ao horizonte B correspondente, coerente com seu menor conteúdo de finos.

O horizonte C de Zendron (Figura 3B) apresentou umidade inicial em torno de 24%, valor semelhante ao Thabrulay C, evidenciando que na porção inferior do perfil Zendron (já de textura silto-arenosa) a retenção se reduz drasticamente em relação à camada acima. As SWRC dos horizontes C mostraram curvas com declives mais acentuados do que as dos horizontes B, indicando menor intervalo de sucção para que o solo perca a maior parte da água disponível – comportamento típico de solos arenosos com poucos microporos.

Os dados do WP4C indicaram que, em sucção de 1.500 kPa, os teores de umidade caíram para valores baixos: cerca de 10–20% nos horizontes B e menores que 10% nos horizontes C. Esses resultados demonstram que, sob sucções muito altas, a água remanescente nos solos é mínima, sobretudo nos materiais mais arenosos.

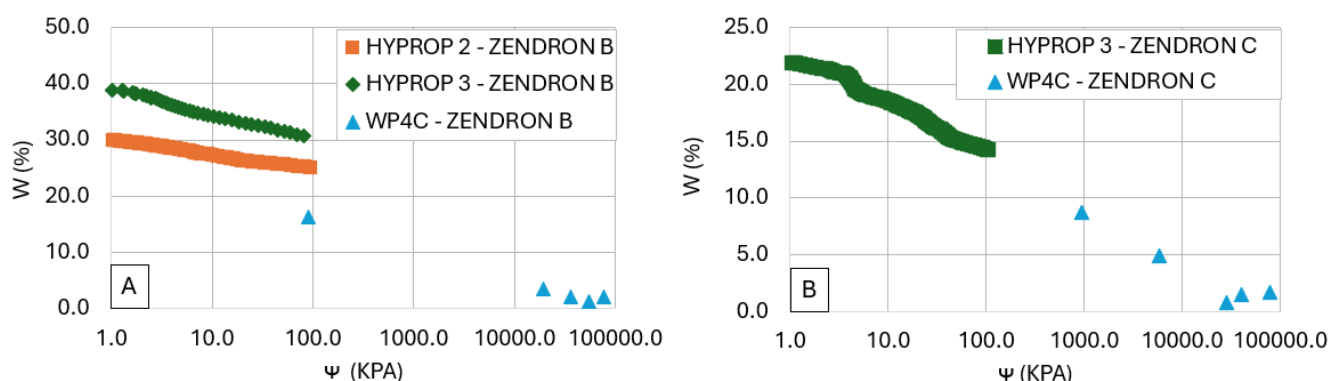


Figura 3. Curvas de retenção dos horizontes do perfil de Zendron, obtida por diferentes métodos. A) Horizonte B. B) Horizonte C.

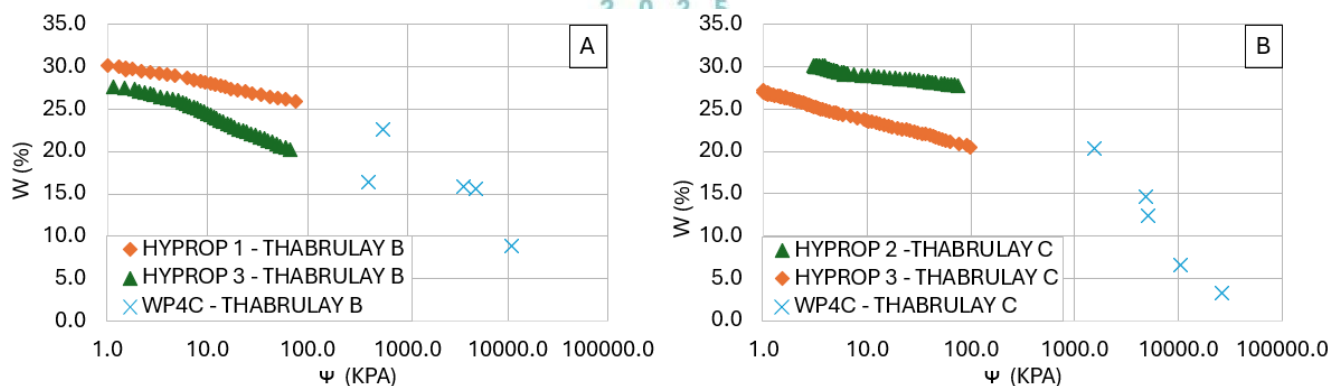


Figura 4. Curvas de retenção dos horizontes do perfil de Thabrulay, obtida por diferentes métodos. A) Horizonte B. B) Horizonte C.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou o comportamento hidráulico de dois horizontes de solo monitorados pelo CEMADEN na cidade de Blumenau-SC. Os resultados mostram permeabilidades extremamente baixas e comportamentos de retenção distintos nos dois perfis analisados. O Zendron demonstrou maior armazenamento de água nas camadas superficiais, enquanto o Thabrulay drenou com maior rapidez. A combinação de alta retenção e baixa Ksat no Zendron sinaliza maior propensão à formação de zonas saturadas próximas à superfície sob chuvas prolongadas.

De um modo geral, observou-se que entre os horizontes, em ambos os perfis, o horizonte B possui maior capacidade de retenção de água em comparação ao horizonte C, devido ao maior conteúdo de finos (argila) nos horizontes superiores. Essa tendência foi mais evidente no perfil Zendron, onde a textura silte-argilosa do horizonte B conferiu uma capacidade de retenção significativamente superior à textura silte-arenosa do horizonte C.

Os parâmetros obtidos aprimoram a calibração de modelos de fluxo não saturado e fundamentam a revisão de limiares críticos de umidade em sistemas de alerta regionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projeto do CNPq n.º 446142/2023-9 e CEMADEN pelo apoio e colaboração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457:16: Solo – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2016.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Carta Geológica SG.22-Z-B: Folha Joinville. Escala 1:250 000. Brasília: CPRM, 2011.
- Fernandes, N. F.; Curi, N.; Ferreira, M. M. Propriedades físicas e estabilidade de agregados de solos em diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 3, p. 497-506, 1999.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: Wiley-Interscience, 1993.
- Leão, T. P.; Silva, A. P. A simplified Excel® algorithm for estimating the least limiting water range of soils using nonlinear regression. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 61, n. 6, p. 649-654, 2004.
- Meter Group INC. KSAT User Manual: Laboratory Measurement of Saturated Hydraulic Conductivity (Ksat). Pullman, 2021.
- Mello, C. R.; Viola, M. R.; Silva, A. M.; Pruski, F. F.; Norton, L. D. Multivariate models for estimating soil erodibility in tropical soils. *Catena*, v. 79, n. 3, p. 174-181, 2019.
- Reynolds, W. D.; Elrick, D. E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity using the Guelph Permeameter. *Soil Science Society of America Journal*, v. 49, n. 2, p. 210-218, 1985.



- Reynolds, W. D.; Elrick, D. E. Pondered infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 54, n. 5, p. 1233-1241, 1990.
- Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumbreas, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araújo Filho, J. C.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. (eds.). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – 5. ed. revisada e ampliada. Brasília: Embrapa Solos/Embrapa Informação Tecnológica/Embrapa Produção Agropecuária e Florestal, 2022.
- Silva, A. S. Caracterização Física e Hidráulica dos Perfis Monitorados pelo CEMADEN em Blumenau-SC – Relatório de Iniciação Científica, UNESP, 2024.
- Sitarenus, P.; Casini, F.; Askarinejad, A.; SPRINGMAN, S. Hydro-mechanical analysis of a surficial landslide triggered by artificial rainfall: the Ruedlingen field experiment. Géotechnique, London, v. 71, n. 2, p. 96-109, 2021.
- Tomasella, J.; Hodnett, M. G. Pedotransfer functions for tropical soils. In: PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. (org.). Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 415-429.
- Zhang, Y.; Xu, Q.; LI, H.; et al. Tropical soil water retention properties in the context of unsaturated soil mechanics. Soil Dynamics Journal, 2022.