

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/736

## Análise do Comportamento de Fluxo Não Saturado dos Solos Residuais Maduros do Sul do Quadrilátero Ferrífero

Yesser Marin Rodriguez Hernandez

Doutorando, UFOP, Ouro Preto, Brasil, [yesser.hernandez@aluno.ufop.edu.br](mailto:yesser.hernandez@aluno.ufop.edu.br)

Luis de Almeida Prado Bacellar

Professor, UFOP, Ouro Preto, Brasil, [bacellar@ufop.edu.br](mailto:bacellar@ufop.edu.br)

Diogo Reis Stavaux-Baudson

Técnico, UFOP, Ouro Preto, Brasil, [diogo.baudson@ufop.edu.br](mailto:diogo.baudson@ufop.edu.br)

**RESUMO:** A condição de não saturação está presente na maior parte dos solos no planeta, afetando o comportamento dos diferentes tipos, dentre eles, os solos residuais, formados na mesma localidade da sua rocha matriz, sob os efeitos das condições climáticas locais. Os solos residuais maduros de regiões tropicais apresentam características físicas e mineralógicas únicas que afetam seu comportamento hídrico, que serão tratadas nesta pesquisa. Assim, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas do horizonte pedológico B (solo residual maduro) de cinco tipos de solos na região sul do Quadrilátero Ferrífero (MG), desenvolvidos em rochas diversas do embasamento cristalino, do Supergrupo Minas e do Supergrupo Rio das Velhas. Estas amostras foram submetidas a ensaios de caracterização física e mineralógica, de determinação das curvas de retenção em laboratório e de infiltração em campo sob diversas sucções com infiltrômetro de disco. A agregação das partículas minerais por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio propicia a formação de macroporos interagregados e microporos intra-agregados que explica a tendência bimodal nas curvas de retenção mesmo para solos derivados de litologias distintas. Os ensaios diretos com infiltrômetro de disco resultam em menores valores de condutividade hidráulica próximo à saturação, o que pode ser explicado pela grande variação de diâmetro de poros, característica nem sempre bem definida quando se faz o tradicional ajuste de curvas de retenção de água.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fluxo não saturado, solos residuais, solos tropicais, Quadrilátero Ferrífero.

**ABSTRACT:** The unsaturated condition is widespread across most soils, affecting the behavior of different types, including residual soils, formed in the same location as their parent rock, under the effects of local climatic conditions. Mature residual soils from tropical regions have unique physical and mineralogical characteristics that affect their hydraulic behavior, which will be addressed in this research. Thus, disturbed and undisturbed samples were collected from the pedological horizon B (mature residual soil) of five types of soil in the southern region of the Iron Quadrangle (MG), developed in different rocks from the crystalline basement, from the Minas Supergroup and the Rio das Velhas Supergroup. These samples were subjected to physical and mineralogical characterization tests, determination of soil-water retention curves in the laboratory, and infiltration in the field under different suctions with a disc infiltrometer. The aggregation of mineral particles by iron and aluminum oxides and hydroxides leads to the formation of intra-aggregate macropores and intra-aggregate micropores, which explains the bimodal trend in soil-water retention curves even for soils derived from different lithologies. Direct tests with disc infiltrometers result in lower hydraulic conductivity values close to saturation, which can be explained by the large variation in pore diameter, a characteristic that is not always well defined when traditional adjustment of water retention curves is used.

**KEYWORDS:** Unsaturated flow, residual soils, tropical soils, Iron Quadrangle.

## 1 INTRODUÇÃO

O estado não saturado dos solos é a condição mais comum e se encontra distribuída ao longo do planeta. Os solos das regiões localizadas entre os trópicos são conhecidos como solos tropicais. Esses apresentam um comportamento mecânico e propriedades físico-químicas diferenciadas da mecânica clássica dos solos, em virtude das suas condições de formação e evolução pedogenética (Carvalho et al., 2023). No caso dos solos residuais, formados a partir da rocha matriz sem sofrer transporte, devem as suas características aos processos do intemperismo e pedogênese locais.

A relação existente entre um tipo de solo, a rocha matriz da qual é desenvolvido e os processos do intemperismo é de vital importância no estudo dos solos residuais. Segundo Carvalho e Gitirana Jr (2021), a não contextualização no tempo, espaço e das condições ambientais na interpretação do comportamento do solo, leva à adoção de simplificações e a um ineficiente planejamento e tomada de decisões.

Além do comportamento mecânico, os solos tropicais residuais maduros apresentam comportamento hidráulico diferenciado, condicionado, em grande parte, pelo estado não saturado em que são desenvolvidos. Esses comportamentos tornam de grande importância o estudo da variabilidade intrínseca, dependente da estrutura e composição deles, tornando-o de muito interesse na geotecnia.

Nesse contexto, a quantidade de estudos atualmente desenvolvidos na área, ressalta sua importância, devido a grande quantidade de incertezas encontradas. No entanto, os métodos estimativos do fluxo não saturado existentes na literatura, não se adequam completamente ao comportamento real dos solos tropicais. Isto, porque para fluxo não saturado, a condutividade hidráulica depende não só da estrutura e dimensão dos poros, mas também da quantidade de água presente neste meio e do histórico de saturação (Carvalho et al., 2023).

Assim, este trabalho foi desenvolvido visando analisar o comportamento hídrico não saturado de solos residuais maduros derivados de diversos litotipos na região sul do Quadrilátero Ferrífero (MG), objetivando comparar seu comportamento por dois métodos diferentes, o primeiro com medidas diretas de condutividade hidráulica próximas à zona de saturação por infiltrômetro de disco e o segundo com as tradicionais determinações de condutividade por meio de ajustes de curvas de retenção de água determinadas em laboratório. Os resultados são comparados com dados de caracterização física e mineralógica, aumentando esses dados à pequena base de dados existente na região.

## 2 MATERIAIS E METODOS

### 2.1 Área de Estudo e Coleta das Amostras

O estudo foi desenvolvido no estado de Minas Gerais (MG), em áreas localizadas na região sul do Quadrilátero Ferrífero (Door, 1969). Além da riqueza mineral, a região expõe uma sucessão de unidades litoestratigráficas que registram eventos de abrangência regional e global durante as eras Neoarqueanas e Paleoproterozoica (Endo et al., 2020). Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentados os supergrupos que conformam o Quadrilátero (Estrada Real, Minas, Rios das Velhas) e alguns complexos que embasam tais supergrupos (Bação, Mantiqueira, Santa Barbara, Santo Antônio do Pirapetinga) (Door, 1969; Hippertt, 1994).

Visando comparar as possíveis diferenças entre os solos residuais maduros formados a partir de diversas litologias, foram selecionados cinco locais de amostragem: gnaisses do embasamento cristalino do Complexo do Bação, distrito de Cachoeira do Campo (CC-01), município de Ouro Preto, do Complexo Mantiqueira, no distrito de Cachoeira do Brumado (CB-01), município de Mariana, e do complexo Santo Antônio do Pirapetinga, município de Ouro Branco (OB); quartzitos e metapelitos (xistos e filitos) do Supergrupo Minas, coletadas no município de Mariana (MA) e Ouro Preto (OP-01).

A amostragem seguiu as recomendações da NBR 9604:2016, com a abertura de trincheiras para retirar amostras indeformadas com dimensões aproximadas de 30x30x30 cm como apresentado na Figura 2. As amostras deformadas foram coletadas a partir do material escavado dos blocos. Também foram executados ensaios de infiltração não saturada *in situ* sob diversas sucções, com um infiltrômetro de tensão acoplado ao permeâmetro Guelph da marca Soil Moisture. Esse equipamento é usado principalmente para determinação *in*

situ da condutividade hidráulica sob baixas sucções ( $\approx -20\text{cm} \leq \psi \leq +2\text{cm}$ ) (Reynolds W. D., 2008). O dispositivo consiste essencialmente de um disco poroso, ( $D = 20\text{ cm}$ ), conectado ao reservatório do permeâmetro Guelph e a um sistema de Mariotte, constituído por um tubo de entrada de ar que regula as tensões aplicadas ao solo.

Para isto, foram executados os testes de infiltração sob sucções de 20, 15, 10 e 3cm em ordem decrescente. Foi utilizada uma fina camada de areia para garantir a superfície de contato do equipamento com o solo. As leituras foram executadas cada 5 minutos nos primeiros 3 estágios e 2 minutos no último. Para análises dos resultados foi utilizado o método proposto por Reynolds e Elrick (1991), conforme expresso nas equações 1, 2 e 3.

$$k(\psi) = \bar{k}_{x,x+1} \exp(\bar{\alpha}_{x,x+1}\psi) \quad (1)$$

$$\bar{\alpha}_{x,x+1} = \frac{\ln(Q_x/Q_{x+1})}{(\psi_x - \psi_{x+1})} \quad (2)$$

$$\bar{k}_{x,x+1} = \frac{G_d \bar{\alpha}_{x,x+1} Q_x}{a(1+G_d \bar{\alpha}_{x,x+1} \pi a)(Q_x/Q_{x+1})^P} \quad (3)$$

Com:  $x = 1, 2, 3, \dots$ ;

$P = \psi_x / (\psi_x - \psi_{x+1})$ ;

$G_d$ : fator de forma com valor de 0.25;

$k(\psi)$ : Condutividade hidráulica para cada valor de sucção;

$\bar{k}_{x,x+1}$ : Condutividade hidráulica média entre os valores de sucção  $x$  e  $x+1$ ;

$\bar{\alpha}_{x,x+1}$ : Parâmetro da textura/estrutura do solo entre os valores de  $x$  e  $x+1$ ;

$\psi_x, \psi_{x+1}$ : Sucção dos estágios do ensaio de infiltração;

$Q_x, Q_{x+1}$ : Vazão de infiltração quase permanente;

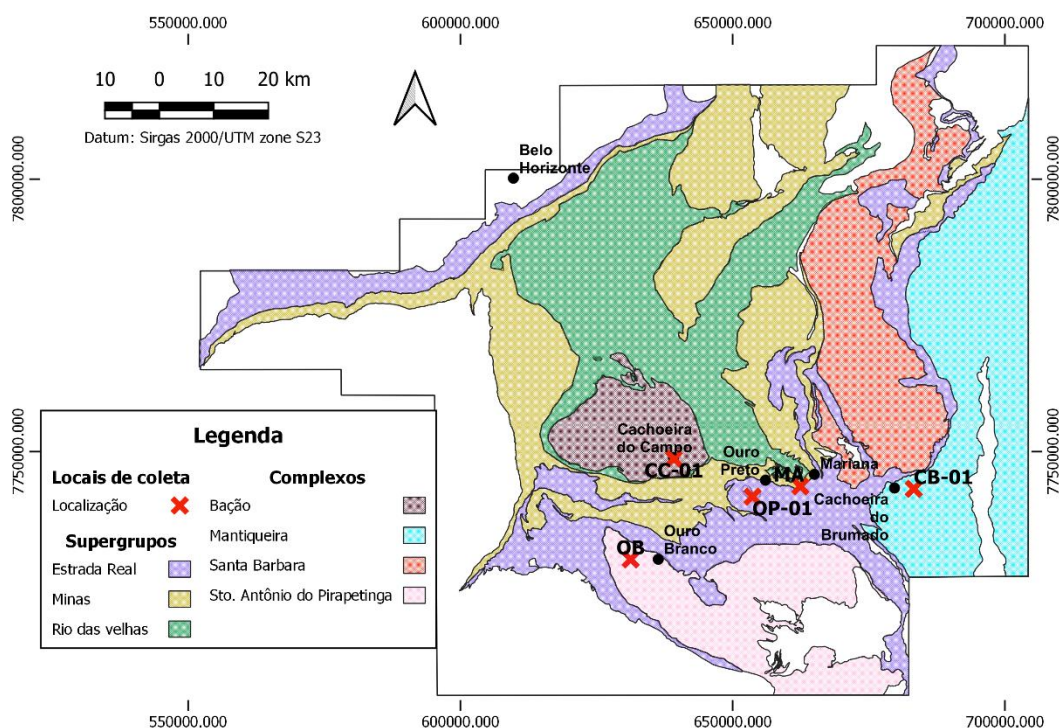


Figura 1. Localização de pontos de coleta de amostras de solo no mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Endo et al., 2020).



Figura 2. Local de coleta de amostra deformada (bloco) e indeformada, ilustrando a execução do ensaio de infiltração de disco.

## 2.2 Ensaios laboratoriais e de campo.

Após a coleta, as amostras foram transportadas e armazenadas no Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada (CTGA) da UFOP, até a realização dos ensaios de laboratório. A campanha experimental contemplou ensaios de caracterização física, condutividade hidráulica (carga variável), sucção mátrica pela umidade (método do papel filtro) e difração de raios x das amostras. Os ensaios de caracterização física foram realizados conforme os procedimentos descritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): análise granulométrica conjunta (NBR 7181:2016); a massa específica real dos grãos (NBR 6458:2016); os limites de consistência (NBR 7180:2016 e 6459:2017); massa específica aparente (pelo método da balança hidrostática, NBR 16867:2020); condutividade hidráulica saturada, executado com carga variável (NBR 14545:2021).

Para determinação da composição mineralógica das amostras, foi utilizado um difratômetro da marca Bruker, equipado com tubo de cobre ( $\text{CuK}\alpha$ ) e com as amostras preparadas na forma de pó, a partir do material passante na peneira de 75  $\mu\text{m}$ .

O ensaio de sucção mátrica pela umidade, foi realizado na trajetória de secagem do solo, seguindo os procedimentos descritos na norma D5298-16 ASTM (2016). Esses processos foram exemplificados por Hernandez (2020), utilizando 3 papéis filtro (tipo Whatman nº 42) entre duas amostras de solo indeformado, por um total de 15 dias, obtendo-se um total de 10 pontos para cada amostra de solo. O ajuste dos modelos da curva de retenção foi executado através da ferramenta desenvolvida pelo Seki (2007). Devido à tendência apresentada pelos resultados dos pontos do ensaio, ajustou-se a curva pelo modelo bimodal do Durner (1994). Após esse ajuste, foi possível estimar a função de condutividade hidráulica com o modelo proposto por Priesack e Durner (2006).

Obteve-se, assim, dados representativos do comportamento do fluxo não saturado, tanto por um método direto (infiltrômetro de sucção), como por um método indireto (Priesack e Durner, 2006). Cada método possui diferentes princípios, no caso do infiltrômetro de sucção, a condutividade hidráulica quase saturada obtida é teoricamente tridimensional, a partir da frente de umedecimento descendente para cada sucção, sob o disco poroso. Por outro lado, o método indireto de Priesack e Durner (2006) baseia-se na curva de retenção e propriedades hidráulicas do solo para obtenção da função da condutividade hidráulica.

## 3 RESULTADOS

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios dos principais parâmetros obtidos com os ensaios da caracterização física. É possível notar que em razão da amostragem ter sido realizada no horizonte pedológico B do solo, as frações argila se mostraram predominantes, o que é típico de solos residuais maduros, caracteristicamente bem desenvolvidos (Lacerda, 2010). A análise granulométrica compreendeu as etapas de peneiramento e sedimentação, com e sem o uso de defloculante. Na Figura 3 são apresentados os resultados dessas etapas, mostrando que a presença do defloculante (hexametáfosfato de sódio) provocou uma diferença significativa no diâmetro das partículas e, conseqüentemente, nas curvas obtidas. Segundo De Brito Galvão e

Schulze (1996), essa diferença pode ser atribuída às condições ambientais que esses solos estão sujeitos, resultando em uma maior capacidade de cimentação e agregação das partículas.

Tabela 1. Resumo dos índices físicos e hidráulicos dos solos estudados.

Amostra	IP	Arg. (%)	Silte (%)	Areia (%)	Ped. (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\eta$	e	K (m/s)
CB-01	20	38	16	45	1	2,624	1.711	0,448	0,814	4,67e-5
OB	26	43	31	24	2	2,739	1.697	0,5139	1,057	1,02e-5
OP-01	18	58	29	12	1	2,84	1.432	0,6023	1,514	1,52e-5
MA	17	36	22	40	2	2,846	1.739	0,4683	0,881	1,61e-4
CC-01	20	44	15	41	0	2,579	1.643	0,4795	0,921	4,25e-5

Sendo: IP = índice de plasticidade; Arg. = argila; Ped. = pedregulho;  $\rho_s$  = massa específica dos grãos;  $\rho$  = massa específica aparente;  $\eta$  = porosidade; e = índice de vazios; K = condutividade hidráulica.

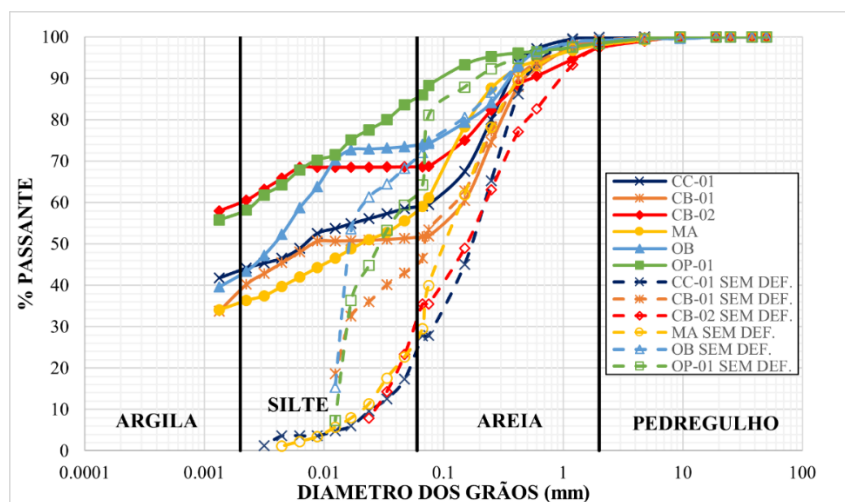


Figura 3. Análise granulométrica dos solos com e sem defloculante.

Os valores dos índices de plasticidade (IP) variaram entre 17% e 26%, considerados de média a alta plasticidade, e coerentes com a fração fina apresentada pelas amostras. A massa específica dos grãos ( $\rho_s$ ), variou entre de 2,579 – 2,846, é geralmente relacionado com o material de origem e seu intemperismo, podendo ser representado como um valor médio dos diferentes minerais que os constituem.

A porosidade ( $\eta$ ) tem relação direta com o fluxo, sendo um atributo físico importante na compreensão de parâmetros como a condutividade hidráulica (K) e a capacidade de retenção hídrica. Devido às condições pedogenéticas de formação desses solos, verifica-se uma elevada porosidade em uma estrutura granular típica. Por isso, mesmo exibindo elevados teores de argila, o grau de agregação (floculação) encontrado e os altos valores de porosidade facilitam o fluxo de água e justificam os valores de permeabilidade média encontrados, na faixa daqueles esperados para areias limpas (Lu e Likos, 2004).

Na Figura 4 são apresentados os difratogramas de dois dos solos investigados. Conforme esperado, detectou-se a presença de minerais típicos de solos tropicais, como óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (gibbsita e goethita), argilominerais (caulinita e ilita), quartzo e outros minerais menos frequentes previamente identificados em estudos de solos tropicais (Figueiredo et al., 2006; Carvalho e Gitirana Jr, 2021). Ressalta-se a presença tanto de minerais primários (quartzo e moscovita), como também, minerais secundários (caulinita, gibbsita e goethita) em sua constituição, permitindo inferir que elas se encontram em diferentes estágios de desenvolvimento pedológico.

Os resultados dos ensaios da sucção mátrica pela umidade utilizando papel filtro estão representados pelas curvas de retenção de água da Figura 5. É possível notar que a totalidade deles apresentam comportamento bimodal, com o método de ajuste proposto por Durner (1994). Este tipo de curvas de retenção é típica dos solos tropicais bem desenvolvidos, como mostrado anteriormente por outros autores (Futai, 2002; Hernandez, 2020; Carvalho e Gitirana Jr, 2021; Baudson, 2023).

Observa-se que os valores do primeiro ponto de entrada de ar encontram-se nas proximidades do valor de 1 kPa, e que o teor de umidade volumétrica saturada varia de 0,4 – 0,6 e que atinge sucções superiores a 10.000 kPa para valores de umidade inferiores a 0,1.

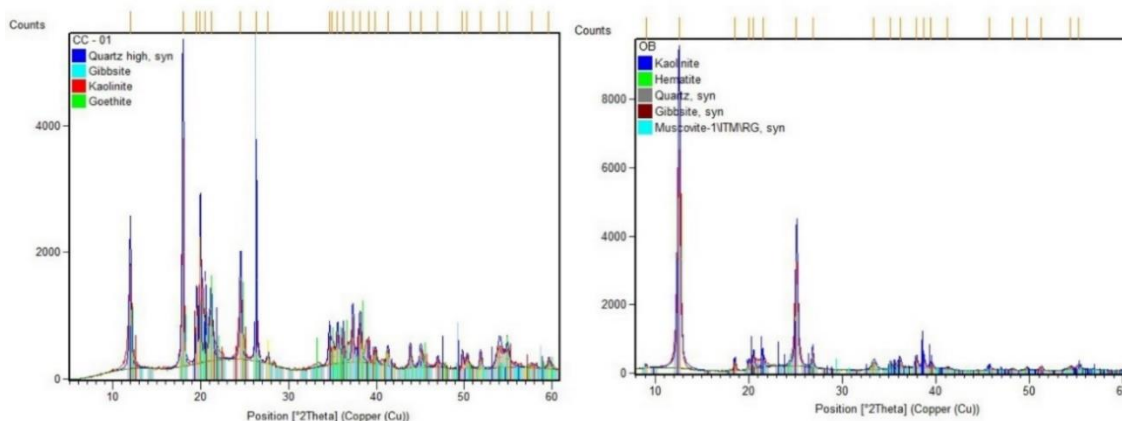


Figura 4. Exemplo de resultados do ensaio de difração de raios X para amostras CC01 e OB.

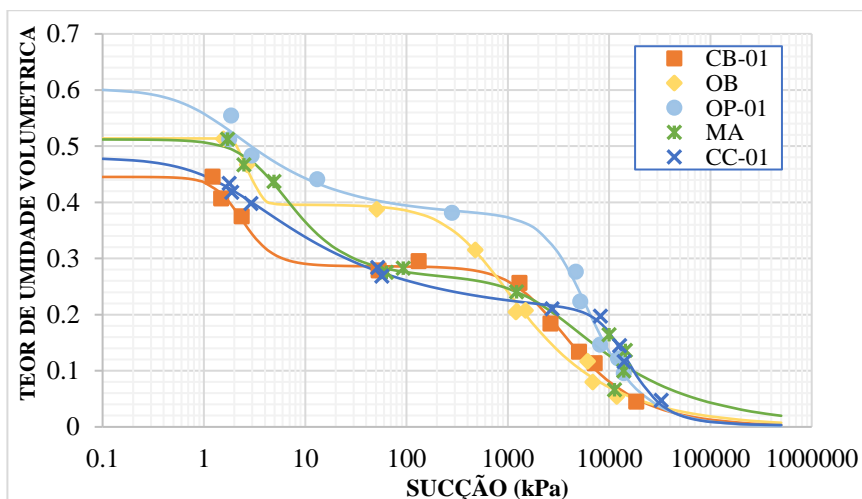


Figura 5. Resultados curva de retenção de água para os solos estudados.

Este comportamento decorre principalmente da ação do intemperismo químico e lixiviação intensa, evidenciado pelos resultados dos ensaios de caracterização física e análise mineralógica. Segundo Lopes (2006), este tipo de distribuição é caracterizado pela presença de dois valores de entrada de ar, o primeiro associado aos macroporos (poros maiores interagregados) e o segundo, aos microporos (poros intra-agregados).

Esses resultados mostram que embora exista uma variabilidade nos valores de sucção de solos provenientes de diferentes litologias, há uma nítida tendência para manter-se um comportamento bimodal, dos horizontes mais superficiais de solos tropicais.

Na Figura 6 estão representados os valores pontuais de condutividade hidráulica não saturada obtidos em campo com o infiltrômetro de disco, além da totalidade dos valores da função de condutividade hidráulica estimada a partir da curva de retenção obtida em laboratório (Figura 5).

Os resultados laboratoriais confirmam que a curva de condutividade hidráulica não saturada de solos residuais maduros, mesmo que derivados de litologias distintas, apresenta dois patamares bem marcantes, definidos pela predominância de macroporos interagregados e microporos intra-agregados (De Brito Galvao e Schulze, 1996). Contudo, quando se compara tais valores com aqueles obtidos com sucções de até 2 kPa com infiltrômetro de tensão, evidencia-se que estes apresentaram valores de condutividade aproximadamente uma ordem de magnitude menor (Figura 6). O patamar inicial abaixo do valor de entrada de ar não ficou tão bem

definido no ensaio com infiltrômetro, o que pode ser explicado pela maior distribuição de poros de variadas dimensões na classe dos macroporos, que causa decréscimo mais significativo da condutividade não saturada próximo à saturação (Jarvis e Messing, 1995). Portanto, segundo estes autores, o emprego de condutividade saturada para ajuste de curvas de retenção medidas em laboratório pode não ser a melhor opção, por superestimar a condutividade próxima à saturação.

Contudo, qualquer interpretação deve ser feita com ressalvas, pois os dois métodos empregados têm solução baseada em distintas hipóteses e condições de contorno. Mesmo assim, estudos prévios indicam que o infiltrômetro de disco pode trazer resultados mais fidedignos da curva de condutividade hidráulica não saturada, assunto que merece ainda pesquisas mais aprofundadas.

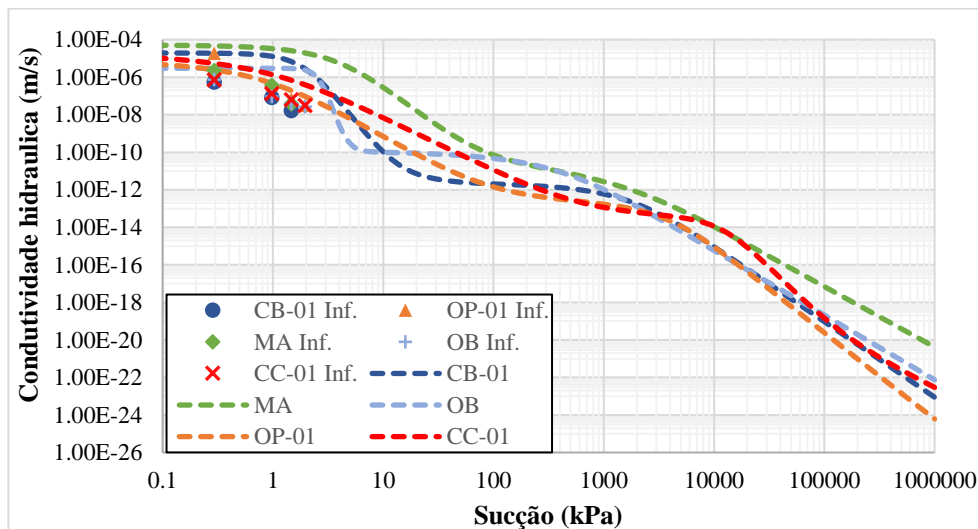


Figura 6. Valores de condutividade hidráulica não saturada obtidos em campo com ensaio com infiltrômetro de sucção (sufixo Inf.) e de condutividade hidráulica não saturada determinada indiretamente em laboratório (linhas tracejadas).

## 4 CONCLUSÕES

A caracterização física e mineralógica constitui uma ferramenta indispensável no estudo dos solos residuais tropicais, devido ao comportamento diferenciado destes, influenciado pela evolução pedogenética. Nos solos residuais maduros estudados foi possível encontrar semelhanças entre eles, mesmo quando evoluídos a partir de litologias diferentes, dentro do Quadrilátero Ferrífero.

De fato, os solos evidenciaram curvas de retenção com padrão bimodal, com macroporos interagregados e microporos intra agregados. Os resultados obtidos com infiltrômetro de disco mostram menores valores de condutividade hidráulica e maior variabilidade dos valores com a sucção, o que pode ser reflexo da maior variabilidade da dimensão de macroporos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao NUGEO e CTGA, pelo apoio na coleta de amostras em campo e análises em laboratório, à FAPEMIG (Projeto APQ\_01613-22), ao CNPq (processo 313840/2021-0), à CAPES (código de financiamento 001), ao REAGEO/CNPq e a UFOP pelo apoio financeiro no desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM. D5298-16 (2016) Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. *ASTM International*, P. 1–6.

- Baudson, D. R. S. (2023) *Análise Geotécnica da Erodibilidade do Rejeito Proveniente do Rompimento da Barragem de Fundão: Um Estudo de Caso na Bacia do Rio Gualaxo do Norte*. Dissertação de Mestrado, Ouro Preto: UFOP.
- De Brito Galvao, T. C.; Schulze, D. G. (1996) Mineralogical Properties of a Collapsible Lateritic Soil From Minas Gerais, Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, V. 60, P. 1969–1978.
- Carvalho, J. C. De; Gitirana Jr, G. De F. N. (2021) Unsaturated Soils in the Context of Tropical Soils. *Soils and Rocks*, V. 44, N. 3, P. 1–25. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos.
- Carvalho, J. C. De; Gitirana Junior, G. De F. N.; Machado, S. L.; Et Al. (2023) *Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico 2ª Edição*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Door, J. V. N. (1969) *Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brazil*.
- Durner, W. (1994) Hydraulic Conductivity Estimation for Soils with Heterogeneous Pore Structure. *Water Resources Research*, V. 30, N. 2, P. 211–223.
- Endo, I.; Machado, R.; Galbiatti, H. F.; Et Al. (2020) *Estratigrafia e Evolução Estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais in Quadrilátero Ferrífero: Avanços do Conhecimento nos Últimos 50 Anos*. Belo Horizonte: 3i Editora.
- Figueiredo, M. Do A.; Fabris, J. D.; Varajão, A. F. D. C.; Et Al. (2006) Óxidos de Ferro de Solos Formados Sobre Gnaisses do Complexo Baçã, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, V. 41, N. 2, P. 313–321.
- Futai, M. M. (2002) *Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Solos Tropicais Não-Saturados: Aplicação a um Caso de Voçorocamento*. Tese (Doutorado), Universidade Federal Do Rio De Janeiro.
- Hernandez, Y. M. R. (2020) *Influência da Sazonalidade Climática na Estabilidade de Taludes em Voçorocas no Complexo Metamórfico do Baçã*. nov. Dissertação De Mestrado, Ouro Preto: UFOP. Disponível em: <[www.ufop.br](http://www.ufop.br)>.
- Hippertt, J. F. (1994) Structures Indicative of Helicoidal Flow in a Migmatitic Diapir (Baçã Complex, Southeastern Brazil) By J.F. Hippertt: Comment. *Tectonophysics*, V. 234, N. 3, P. 169–196.
- Jarvis, N. J.; Messing, I. (1995) Near-saturated Hydraulic Conductivity in Soils of Contrasting Texture Measured by Tension Infiltrimeters. *Soil Science Society of America*, V. 59, P. 27–34.
- Lacerda, W. A. (2010) Shear Strength of Soils Derived from the Weathering of Granite and Gneiss in Brazil. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, V. 23, N. 1, P. 167–182.
- Lopes, M. B. L. (2006) *Influência da Sucção na Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual de Filito de Belo Horizonte, Mg*, 11. ago. Rio De Janeiro, Brazil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Lu, N.; Likos, W. J. (2004) *Unsaturated Soil Mechanics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Priesack, E.; Durner, W. (2006) Closed-Form Expression for the Multi-Modal Unsaturated Conductivity Function. *Vadose Zone Journal*, V. 5, N. 1, P. 121–124. Wiley.
- Reynolds W. D. (2008) Unsaturated Hydraulic Properties: Field Tension Infiltrimeter. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Second Edition Ed., P.1107–1128.
- Reynolds, W. D.; Elrick, D. E. (2008) Determination of Hydraulic Conductivity Using a Tension Infiltrimeter. *Soil Science Society of America Journal*, V. 55, N. 3, P. 633–639.
- Seki, K. (2007) Swrc Fit - A Nonlinear Fitting Program with a Water Retention Curve for Soils Having Unimodal and Bimodal Pore Structure. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, V. 4, N. 1, P. 407–437.