



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



Ligya Lima Vianna

**Análise do comportamento hidráulico não saturado em cobertura alcalina
aplicada ao controle de drenagem ácida de rocha**

Ouro Preto

2026

LIGYA LIMA VIANNA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO NÃO SATURADO EM
COBERTURA ALCALINA APLICADA AO CONTROLE DE DRENAGEM ÁCIDA DE
ROCHA**

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenharia Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 06/03/2026

Área de concentração: Geotecnia ambiental

Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite – UFOP

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V617a Vianna, Ligya Lima.

Análise do comportamento hidráulico não saturado em cobertura alcalina aplicada ao controle de drenagem ácida de rocha. [manuscrito] / Ligya Lima Vianna. - 2026.

54 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Geotecnia. 2. Impacto ambiental - Minas e mineração. 3. Drenagem ácida de minas. I. Leite, Adilson do Lago. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13:622.5

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ligya Lima Vianna

Análise do comportamento hidráulico não saturado em cobertura alcalina aplicada ao controle de drenagem ácida de rocha

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título do Grau de Engenheiro Civil

Aprovada em 06 de março de 2026

Membros da banca

Professor Doutor Adilson do Lago Leite - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Professor Doutor Felipe de Campos Loch (Universidade Federal de Ouro Preto)
Engenheiro Hyasinthe Evrad Simike Boulou (Universidade Federal de Ouro Preto)

Adilson do Lago Leite, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Adilson do Lago Leite, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/03/2026, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1072834** e o código CRC **F8378B13**.

*Dedico este trabalho ao meu melhor amigo João (in
memoriam), que me guiou até esse momento.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, por ser minha base e meu porto seguro ao longo de toda a graduação. Obrigada por cada palavra de incentivo, por cada gesto de apoio e por nunca medirem esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao meu namorado, Matheus, agradeço pela parceria, pela paciência nos momentos de maior dedicação ao curso e por estar ao meu lado em todos os momentos, oferecendo apoio, compreensão e motivação constante.

Aos meus amigos, que compartilharam comigo os desafios, as conquistas e os aprendizados ao longo desses anos, deixo minha gratidão pela amizade, pelo companheirismo e por tornarem essa caminhada mais leve e significativa.

À República Diferença, agradeço por ter sido mais que uma moradia: um verdadeiro lar durante a graduação.

Ao DECIV, pelo ensino de excelência e pela formação técnica e humana proporcionada ao longo do curso, contribuindo de maneira decisiva para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao meu orientador, Professor Adilson, expresso minha gratidão pela orientação e pelos ensinamentos compartilhados. À sua equipe de pesquisa, agradeço pela colaboração e apoio durante este estudo.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha formação, tornando possível a conclusão desta importante etapa da minha trajetória.

RESUMO

A drenagem ácida de rocha (DAR), resultante da oxidação de minerais sulfetados em contato com água e oxigênio, constitui relevante problema ambiental em áreas de mineração, demandando soluções que reduzam a infiltração hídrica e limitem o ingresso de oxigênio. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo simular numericamente o comportamento hidráulico não saturado de uma cobertura alcalina aplicada ao controle da DAR, por meio do software SEEP/W. Foram utilizados dados geotécnicos de materiais semelhantes aos previstos para um lisímetro experimental, incluindo análise granulométrica, determinação de índices físicos e estimativa das curvas características solo-água pelo software RETC. A modelagem foi conduzida em regime transiente, com aplicação de condições de contorno atmosféricas baseadas em dados meteorológicos regionais e cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith. Os resultados indicaram que o fluxo ocorre predominantemente na direção vertical e sob condição não saturada, com manutenção de poropressões negativas ao longo do perfil e elevados graus de saturação nas camadas inferiores. Observou-se predominância de infiltração em relação ao escoamento superficial e controle progressivo da percolação com a profundidade. Conclui-se que a cobertura alcalina apresenta desempenho hidráulico compatível com a função de barreira parcial, contribuindo para a redução da infiltração e, conseqüentemente, para a mitigação da geração de drenagem ácida, considerando as limitações inerentes à escala do modelo adotado.

Palavras-chaves: Drenagem ácida de rocha, Cobertura alcalina, Fluxo não saturado.

ABSTRACT

Acid rock drainage (ARD), resulting from the oxidation of sulfide minerals in contact with water and oxygen, constitutes a significant environmental problem in mining areas, requiring solutions that reduce water infiltration and limit oxygen ingress. In this context, the objective of this study was to numerically simulate the unsaturated hydraulic behavior of an alkaline cover applied to ARD control using the SEEP/W software. Geotechnical data from materials similar to those proposed for an experimental lysimeter were used, including grain size analysis, determination of physical indices, and estimation of soil-water characteristic curves through the RETC software. The modeling was carried out under transient conditions, with atmospheric boundary conditions based on regional meteorological data and evapotranspiration calculated using the Penman–Monteith method. The results indicated that flow occurs predominantly in the vertical direction and under unsaturated conditions, with negative pore-water pressures maintained throughout the profile and high degrees of saturation in the lower layers. Infiltration was observed to predominate over surface runoff, with progressive control of percolation with depth. It is concluded that the alkaline cover presents hydraulic performance consistent with a partial barrier function, contributing to the reduction of infiltration and, consequently, to the mitigation of acid drainage generation, considering the limitations inherent to the adopted modeling scale.

Keywords: Acid rock drainage, Alkaline cover, Unsaturated flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema das propriedades de materiais e processos ligados a previsão da DAR.....	4
Figura 2 - Curvas características típicas de solos argilosos e arenosos.	6
Figura 3 - Histerese das curvas características do solo nas etapas de umedecimento e secagem.....	7
Figura 4 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.	12
Figura 5 - Esquema simplificado do lisímetro em mm.....	13
Figura 6 - Modelo no SEEP/W.	15
Figura 7 - Curva granulométrica do Solo 1.....	17
Figura 8 - Curva granulométrica do Solo 2.....	18
Figura 9 - Curva característica da areia.	20
Figura 10 - Curva característica do solo 1.....	21
Figura 11 - Curva característica do solo 2.....	21
Figura 12 - Precipitação da estação Ouro branco.	22
Figura 13 - Temperatura do ar da estação Ouro Branco.....	23
Figura 14 - Umidade relativa da estação Ouro Branco.	23
Figura 15 - Velocidade do vento da estação Ouro Branco.....	24
Figura 16 - Balanço hídrico do lisímetro com gráficos acumulados.	25
Figura 17 - Grau de saturação no último dia de análise.....	26
Figura 18 - Poropressão no último dia de análise.	28

Figura 19 - Infiltração na cobertura e no solo ácido.	29
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros dos solos.....	18
Tabela 2 - Teor de umidade volumétrico (θ_w).....	19
Tabela 3 - Parâmetros da curva característica.....	20
Tabela 4 – Poropressão inicial de cada material.....	22

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Objetivo	2
1.1.1. Objetivos específicos	2
2. Revisão da literatura	3
2.1. Drenagem ácida de rocha (DAR)	3
2.2. Coberturas alcalinas	3
2.3. Fluxo não saturado	4
2.3.1. Curva característica	5
2.3.2. Condutividade hidráulica não-saturada ($k\psi$)	7
3. Metodologia.....	12
3.1. Propriedade dos materiais	13
3.2. Curva característica do RETC	14
3.3. Modelo computacional	14
4. Resultados e Discussões	17
4.1. Ensaio de caracterização dos materiais.....	17
4.2. Curva característica	20
4.3. Análise no SEEP/W	22
4.3.1. Dados de entrada	22
4.3.2. Resultados da análise numérica	25
5. Conclusão	30
REFERENCIAS.....	32
Anexo I – Relatório da análise no SEEP/W.....	35

1. INTRODUÇÃO

A exploração de bens minerais e escavações diversas em rochas sulfetadas pode gerar drenagem ácida de rocha (DAR), também chamada de drenagem ácida de mina (DAM). A oxidação de minerais sulfetados, principalmente pirita, gera ácido sulfúrico e mobiliza metais, que pode contaminar cursos d'água e solos adjacentes (Salomons, 1995).

Esse processo ocorre quando minerais sulfetados entram em contato com água e oxigênio, desencadeando reações geoquímicas que resultam na formação de soluções ácidas e na liberação de elementos potencialmente tóxicos. A persistência dessas reações pode causar impactos ambientais significativos, afetando a qualidade da água superficial e subterrânea, além de comprometer ecossistemas aquáticos e terrestres.

Uma estratégia comum para controlar a DAR é a aplicação de coberturas secas alcalinas, que reduzem a percolação de água e oxigênio, fatores necessários à geração ácida, e aumentam a alcalinidade do sistema quando da infiltração de água, também reduzindo a geração ácida (Souza et al., 2003). Essas coberturas atuam como barreiras físicas e geoquímicas, limitando o acesso dos reagentes necessários às reações de oxidação e promovendo condições mais favoráveis à neutralização da acidez gerada. Entretanto, a eficiência dessas coberturas depende diretamente das propriedades hidráulicas dos materiais utilizados, em especial da condutividade hidráulica não-saturada e da difusão de oxigênio gasoso.

Em materiais utilizados como cobertura, a condição de não saturação é predominante, uma vez que a presença de ar nos vazios influencia diretamente os processos de fluxo e transporte de gases. Nessas condições, a condutividade hidráulica do solo varia em função do teor de umidade e da sucção matricial, o que torna o comportamento hidráulico mais complexo em comparação com meios totalmente saturados. Dessa forma, compreender o fluxo de água em meios porosos não saturados é fundamental para avaliar o desempenho hidráulico das coberturas e sua capacidade de limitar a infiltração de água.

Nesse contexto, um lisímetro de campo foi construído e instalado no município de Ouro Preto MG, de modo a simular o fluxo de água e oxigênio em cobertura constituída por uma mistura compactada de solo laterítico e cal hidratada. Para o dimensionamento dessa cobertura se faz necessário um estudo de fluxo em meio poroso não saturado e infiltração d'água.

1.1. OBJETIVO

Simular numericamente a infiltração em meio poroso não saturado em uma cobertura por meio do programa computacional SEEP/W (pacote Geostudio). Para isso foram obtidos dados para materiais semelhantes e condições climáticas semelhantes aos do lisímetro mencionado no item anterior.

1.1.1. Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos pode-se elencar:

- Identificar os fatores críticos que afetam a condutividade hidráulica não saturada (k_{ψ}) em coberturas alcalinas;
- Coletar na literatura dados sobre características geotécnicas de materiais semelhantes ao do material a ser aplicado no lisímetro, particularmente a curva característica (retenção de água) e a condutividade hidráulica saturada;
- Coletar na literatura dados climáticos de estações meteorológicas de Ouro Preto MG e cercanias, os quais seriam aplicáveis às simulações de evapotranspiração no software SEEP/W;
- Elaborar simulações numéricas no software SEEP/W considerando o dimensionamento de uma barreira alcalina.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. DRENAGEM ÁCIDA DE ROCHA (DAR)

Os minerais sulfetados, ao entrar em contato com oxigênio e água, sofrem oxidação, consequentemente se forma a drenagem ácida da rocha. Por conseguinte, o MEND Program (2009), recomendou que, ao movimentar solos ou rochas fosse feita a avaliação de sua presença e considerável potencial de geração ácida.

A escavação e o transporte são aspectos críticos nas operações de mineração e construção. O primeiro envolve movimentação massiva de terras e rejeitos para a construção de cavas, pilhas, barragens e instalações subterrâneas. O movimento de solos e rochas também é relevante para a construção civil, sendo que escavações e aterramentos são feitos para se construir barragens, estradas, túneis e outros.

Qualquer uma dessas atividades pode expor minerais sulfetados e gerar DAR, desde que não seja devidamente identificado e controlado. Além disso, variações no nível do lençol freático e mudanças no fluxo de água subterrânea podem contribuir com a oxidação de material sulfetado (MEND Program, 2009).

2.2. COBERTURAS ALCALINAS

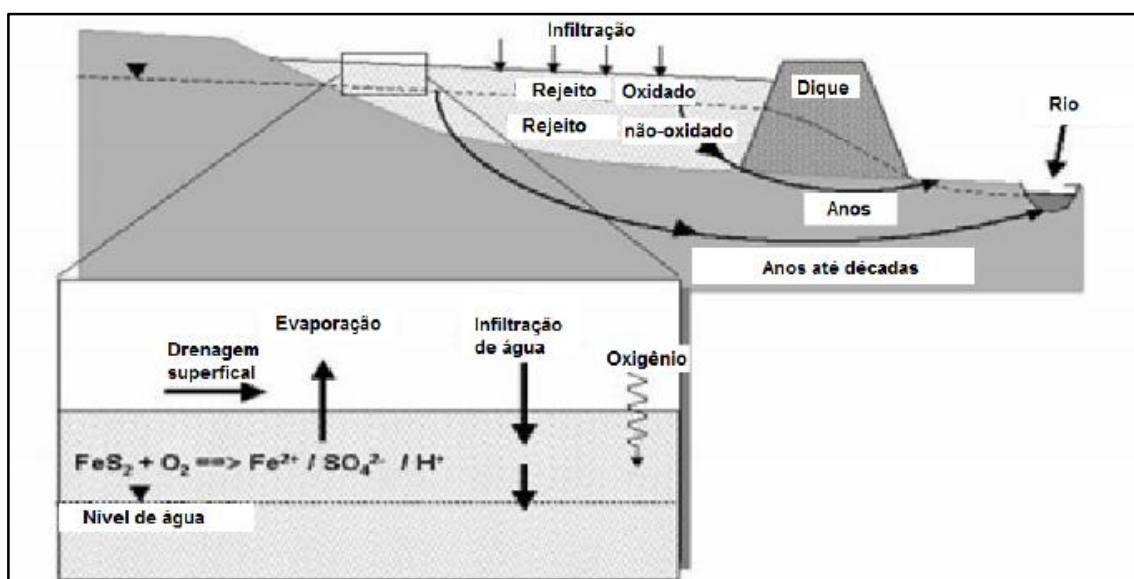
A cobertura seca é um método de construção de barreiras com materiais em condições não saturadas e técnicas usuais na geotecnia (Bussi re et al., 2004; Adu-Wusu & Yanful, 2006; Soares et al., 2009). A sua finalidade principal é reduzir o fluxo de água e de oxigênio da atmosfera em direção ao material gerador de acidez, e, portanto, a formação de drenagem ácida de rocha.

Inicialmente o termo “coberturas secas” era utilizado em contraste com “coberturas úmidas” para hidráulica de barragens e estruturas de terra em sistemas hidráulicos inundados e fechados (Koerner & Daniel, 1997). Entretanto, além de uma certa   o de barreira, a desempenhar, mais aspectos devem ser considerados como: método de construção; resistência   erosão; aptidão para sustent  o da veget  o; entre outros.

Atualmente, as coberturas secas são largamente empregadas para prevenir e controlar a DAR. Elas são construídas sobre depósitos de materiais reativos, tal como barragens de rejeito e pilhas de estéril, de modo a controlar a entrada de oxigênio e a água, reduzindo a oxidação dos sulfetos. A durabilidade deste sistema está relacionada com a aptidão para resistir à erosão e, em alguns casos, possibilitar o crescimento da vegetação (Borma e Soares, 2002).

A Figura 1 representa o esquema de uma barragem de rejeito reativo e os processos de oxidação de sulfeto de ferro e geração ácida. A necessidade de cobertura seca protetiva nos resíduos não saturados acima do nível d'água é destacada.

Figura 1 - Esquema das propriedades de materiais e processos ligados a previsão da DAR.



Fonte: MEND Program (2009).

Ademais, tais coberturas podem ter uma ação reativa, liberando alcalinidade em auxílio do tratamento dos rejeitos. Se devidamente empregado, esse método pode controlar a geração da DAR antes mesmo que ela se inicie (Souza et al., 2003).

2.3. FLUXO NÃO SATURADO

Os solos não saturados são compostos por partículas sólidas, água e ar, em proporções volumétricas variáveis. Por esse motivo, se os problemas de fluxo em

meios não saturados forem abordados utilizando teorias clássicas da Mecânica dos Solos, que consideram o solo somente em condição saturada, os resultados obtidos podem não ser adequados (Lee e Wray, 1995).

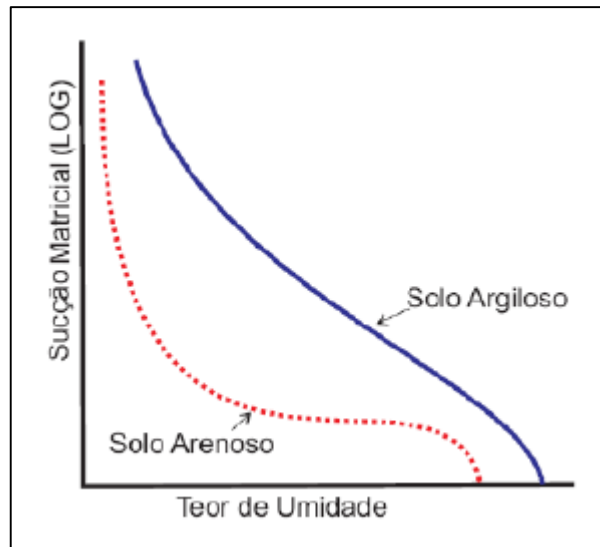
2.3.1. Curva característica

A curva característica solo-água, também chamada de “curva de retenção solo-água” é um diagrama cartesiano que estabelece a relação entre a quantidade de água presente nos poros do solo e a sucção.

A quantidade de água no solo é comumente expressa pelo teor de umidade volumétrico (θ), definido como o volume de água pelo volume total do solo, também calculado como o produto da porosidade pelo grau de saturação ($\theta = n \times S_r$) (Gerscovick, 2001). Além disso, o teor de umidade volumétrico saturado (θ_s) corresponde ao valor da porosidade (n) quando o solo atinge 100% de saturação. Por sua vez, a sucção é definida como a poropressão do ar (u_{ar}) subtraída da poropressão da água (u_w). Conforme Fredlund e Xing (1994), a sucção total (ψ) pode ser aproximada à sucção mátrica (ψ_m) quando os valores excedem 1500 kPa.

A Figura 2 apresenta curvas características típicas da areia e argila. O solo argiloso apresenta um teor de água relativamente maior, isto é, uma capacidade maior de reter água para um mesmo valor de sucção. Por outro lado, para um mesmo teor de umidade a sucção é maior em solos argilosos.

Figura 2 - Curvas características típicas de solos argilosos e arenosos.

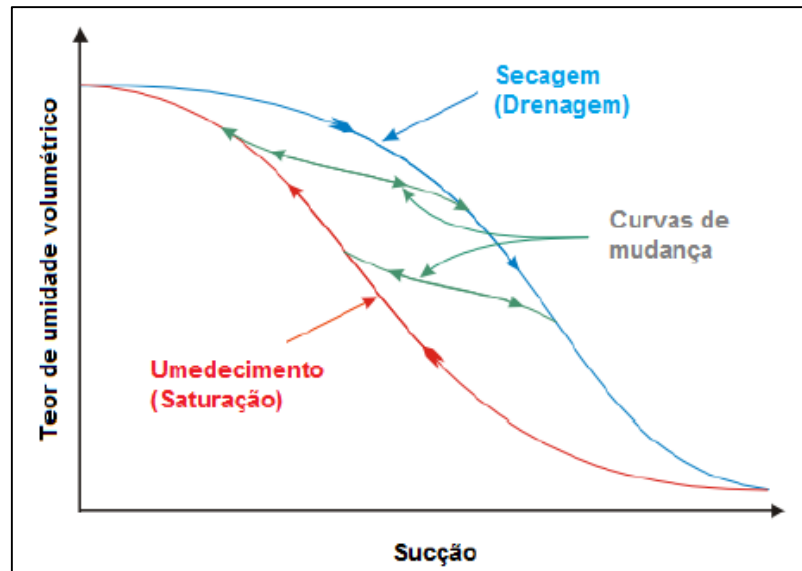


Fonte: Hillel (1971).

Destaca-se que as curvas características apresentam histerese se construídas por meio de secagem ou umedecimento. A secagem promove maiores valores de retenção de água em relação ao umedecimento. Hillel (1971) cita os fatores que provocam a histerese: as formas geométricas individuais dos poros, os ângulos de contato entre a água e a superfície mineral e o raio do menisco durante os processos de secagem e umedecimento. Além disso, a quantidade de ar ocluso nos poros e os fenômenos de expansão e contração do material intensificam a histerese.

As características das curvas podem ser representadas de forma genérica, conforme ilustrado a Figura 3. De acordo com Marinho e Pereira (1998), essas curvas são influenciadas pela história de tensões a que o solo foi submetido, uma vez que isso afeta a porosidade do material. As curvas de retenção de água apresentam comportamento histerético, ou seja, as curvas de secagem são distintas das curvas de umedecimento.

Figura 3 - Histerese das curvas características do solo nas etapas de umedecimento e secagem.



Fonte: O'Kane et al., (2002).

2.3.2. Condutividade hidráulica não-saturada (k_{ψ})

Como os poros dos solos em condição não saturada são ocupados simultaneamente por ar e água, a condutividade hidráulica nessas condições é inferior à condutividade em solos saturados. Segundo Mateus (1994), três fatores principais explicam essa redução:

- A presença de ar nos poros diminui a área disponível para o fluxo de água;
- À medida que a sucção aumenta, os poros maiores drenam primeiro, reduzindo a conectividade da fase líquida e diminuindo a condutividade hidráulica;
- O fluxo ocorre na fase de vapor, pois a fase líquida se torna descontínua devido à presença de ar. O fluxo ocorre predominantemente na fase líquida através de filmes de água adsorvida e meniscos capilares, enquanto o transporte na fase vapor pode ocorrer em condições de elevada sucção.

Devido a esses fatores, a determinação experimental da condutividade hidráulica em solos não saturados é bastante complexa, o que levou ao desenvolvimento de teorias baseadas em relações entre os parâmetros de condutividade hidráulica saturada e a curva de retenção de água do solo (Fredlund et

al., 1994) para a estimativa de k_ψ . Esses parâmetros dependem da distribuição e do tamanho dos poros.

Incluso na pesquisa em questão, o software Geostudio, em seu módulo SEEP/w, utiliza os métodos de Fredlund, Xing e Huang e também Van Genuchten para estimativa de k_ψ , de modo que esses métodos serão abaixo descritos.

2.3.2.1. Método de Fredlund, Xing e Huang

A condutividade hidráulica em condição não saturada é uma função da condutividade hidráulica em condição saturada e de sua integração ao longo de toda a curva de retenção de água do solo. As poropressões negativas calculadas por esse método se situam na faixa de 0 a 10% kPa, o que permite eliminar a necessidade de determinar o teor de umidade residual, normalmente exigido em outros métodos. De acordo com Fredlund et al. (1994), esse método é especialmente recomendado para solos arenosos e pode ser descrito pelas equações (1), (2) e (3).

$$k_\psi = k_s \left(\frac{\frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e_n^y) - \theta(\psi)}{(e_n^{yi})} \theta'(e_n^{yi})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e_n^y) - \theta_s}{(e_n^{yi})} \theta'(e_n^{yi})}} \right) \quad (1)$$

Sendo:

k_ψ : condutividade hidráulica não saturada;

k_s : condutividade hidráulica saturada obtida em laboratório;

θ : teor de umidade volumétrico;

y : variável de integração representada pelo logaritmo da sucção;

j : menor sucção descrita na função final;

N : maior sucção descrita na função final;

ψ : sucção correspondente;

e_n : número natural (2,71828);

s : inclinação da linha tangente à função que passa através do ponto de inflexão;

θ' : primeira derivada da equação (2).

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2)$$

Sendo:

a : valor de entrada de ar do solo;

θ_s : teor de umidade saturado;

n, m : parâmetros de ajuste à curva de sucção x teor de umidade volumétrico;

$C(\psi)$: correção da função definida como mostrado na equação (3).

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{C_r} \right)}{\ln(1 + 1000000/C_r)} \quad (3)$$

Sendo:

C_r : constante da matriz de sucção que corresponde ao valor do teor de umidade volumétrico residual (valor usual de 1500 kPa).

Para aplicar o método de Fredlund et al. (1994), é necessário se conhecer os valores de a , n e m . O software SEEP/W realiza esses cálculos automaticamente, onde são determinados por meio de um algoritmo de ajuste aplicado à curva característica solo-água correspondente.

2.3.2.2. Método de Van Genuchten (1980)

A equação (4) estima a condutividade hidráulica não saturada de um solo em função da sucção mátrica pelo método citado.

$$k_{\psi} = k_s \frac{\left[1 - \left(a_p \psi^{(n_y-1)}\right) \left(1 + \left(a_p \psi\right)^{n_y}\right)^{-m}\right]^2}{\left[1 + \left(a_p \psi\right)^{n_y}\right]^{m/2}} \quad (4)$$

Sendo:

a_p , n_y e m : parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo.

Já a curva de retenção de água no solo é ajustada pela seguinte equação:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s + \theta_r)}{[1 + (a^h)^n]^m} \quad (5)$$

Sendo:

θ : teor de umidade volumétrico;

θ_r : teor de umidade residual;

θ_s : teor de umidade saturado;

h, n e m : t: parâmetros de ajuste à curva de sucção x teor de umidade volumétrico.

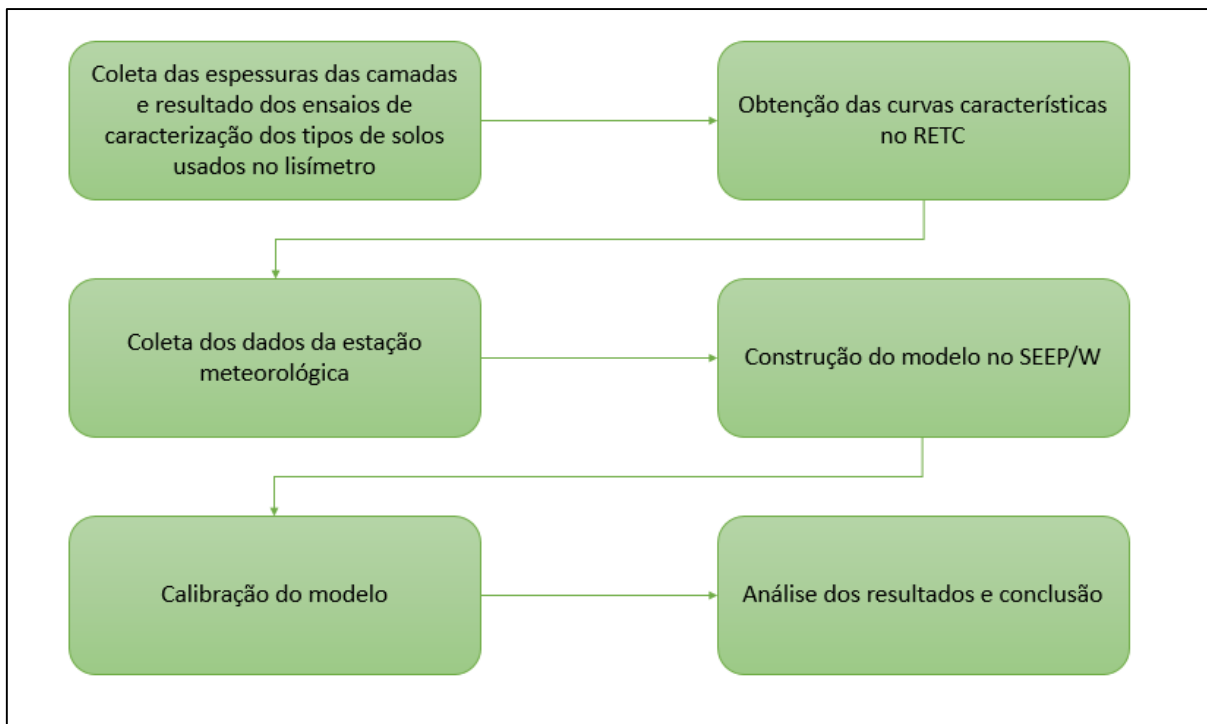
Na curva característica solo-água, um ponto P, equidistante entre o teor de umidade volumétrico nas condições saturada e residual, é utilizado para determinar os parâmetros a_p , n e m . O parâmetro a_p representa o ponto central da curva, e o parâmetro n controla a inclinação da função ao redor desse ponto. Quando a parte inclinada da curva começa a se estabilizar em um patamar mais baixo, esse trecho é influenciado pelo parâmetro m . De acordo com Pedra (2010), se os parâmetros de

ajuste específicos para um determinado material não forem conhecidos, é possível encontrá-los na literatura.

3. METODOLOGIA

A Figura 4 apresenta um fluxograma do desenvolvimento do trabalho.

Figura 4 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor (2026).

Basicamente foram realizadas simulações numéricas com o objetivo de quantificar a infiltração de água na cobertura de um lisímetro de campo instrumentado utilizando-se dados da literatura de materiais semelhantes aos coletados para esse lisímetro.

O software SEEP/W, aplicado na pesquisa, é constituinte do pacto Geostudio e possui reconhecida aplicação mundial para aplicações geotécnicas, incluindo o estudo do fluxo não saturado (antigo módulo VADOSE). Para estimativa da condutividade hidráulica não saturada (k_{ψ}) ele incorpora as equações de Fredlund, Xing e Huang (item 2.3.2.1) e Van Genuchten (item 2.3.2.2).

Como ainda não se poderia ter a curva característica do material da cobertura antes da montagem do lisímetro, ela foi gerada pelo programa computacional RETC 6.02 (2009), desenvolvido pela equipe de pesquisa do professor Van Genuchten. Esse

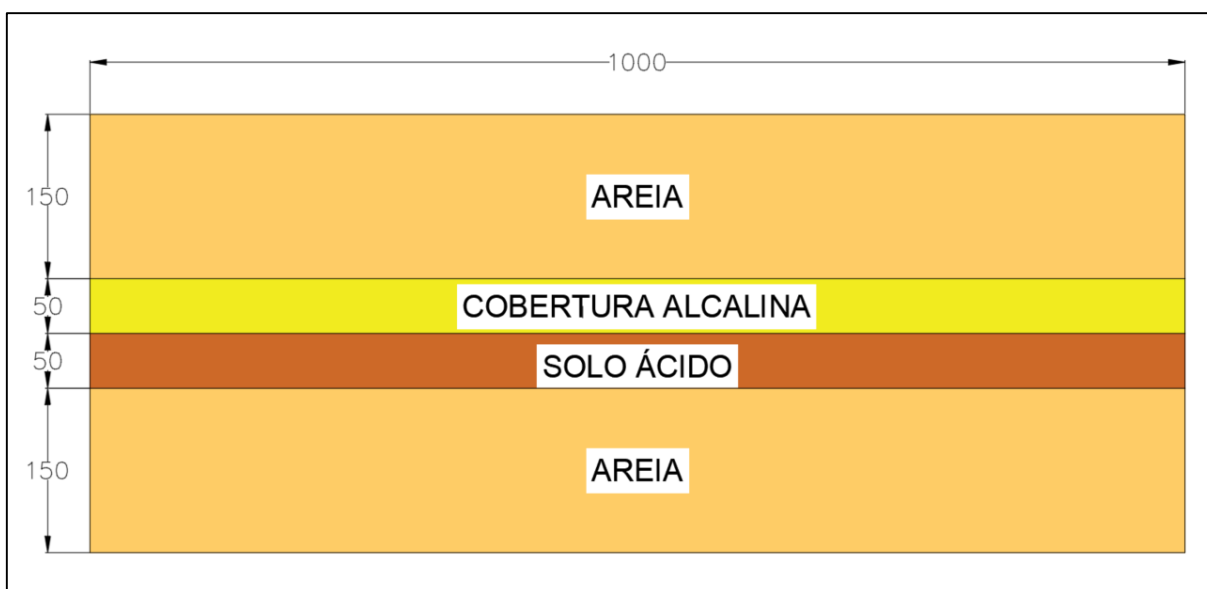
programa usa os dados granulométricos dos materiais para uma estimativa da curva característica, incluindo os dados da equação de Van Genuchten.

Neste programa computacional, os cálculos são obtidos considerando a interação dos materiais com a atmosfera. Os dados de pluviosidade, velocidade do vento, umidade, temperatura e radiação global são consideradas como condição de contorno atmosférica pelo software. Foram aplicados dados climáticos provenientes de uma estação meteorológica localizada próximo ao município de Ouro Branco MG, a cerca de 30 km de Ouro Preto MG, onde seria instalado o lisímetro.

3.1. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

Para a caracterização dos materiais utilizados no preenchimento do lisímetro, foi realizado ensaio de análise granulométrica, seguindo a NBR 7181. Os solos foram separados em duas categorias distintas: o Solo 1, caracterizado como natural e de natureza ácida, e o Solo 2, que passou por um processo de mistura com cal para atuar como camada de cobertura alcalina. Além desses dois solos foi utilizada uma areia grossa no topo e abaixo da cobertura. Um esquema do lisímetro se encontra na Figura 5, abaixo.

Figura 5 - Esquema simplificado do lisímetro em mm.



Fonte: Autor (2026)

3.2. CURVA CARACTERÍSTICA DO RETC

Para definição da curva de retenção foi utilizado o software RETC na sua versão 6.02 que foi criado pela equipe de pesquisa do professor Van Genuchten na Universidade da Califórnia, Riverside EUA.

Para utilizar esse software basta inserir o tipo de solo classificado pelo triângulo textural USDA que ele retorna os parâmetros de θ_r , θ_s , α , n e K_s assim como a própria curva de retenção plotada.

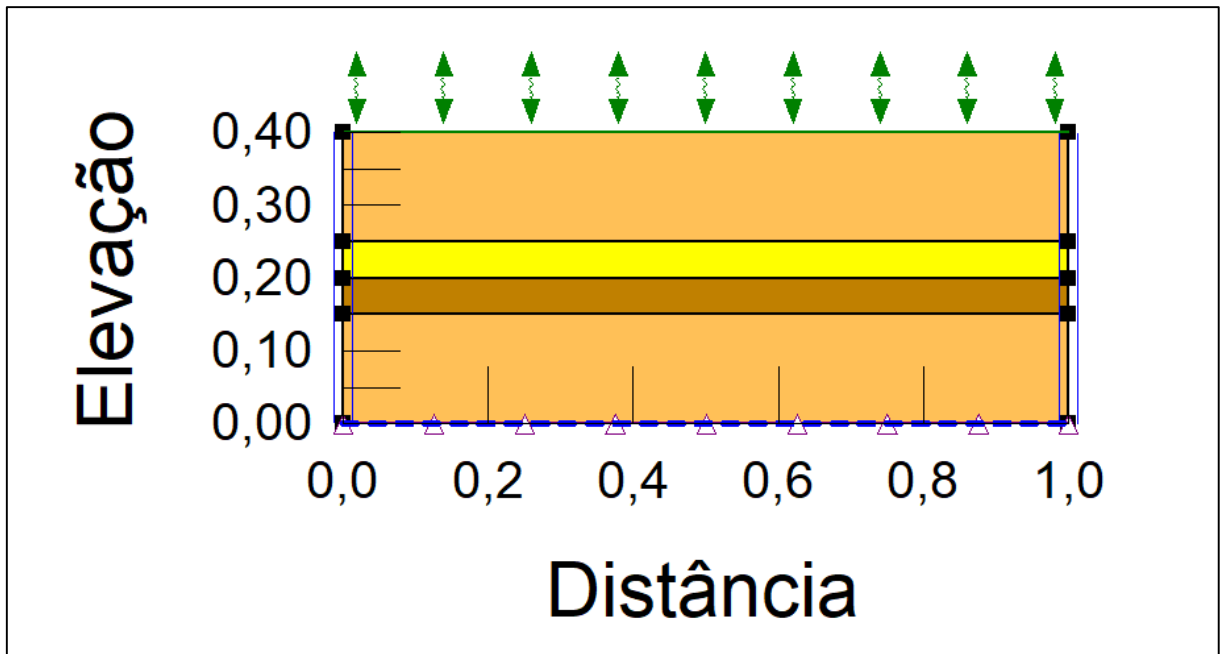
3.3. MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional é a reprodução de um lisímetro construído no laboratório da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Suas dimensões e materiais foram usados como referência. Como o geotêxtil é inerte e tem dimensões mínimas, ele não foi considerado na modelagem no geostudio.

O modelo do lisímetro no SEEP/W é apresentado na Figura 6 e suas camadas foram definidas da seguinte forma, do inferior para o superior:

1. Areia grossa com 15 cm;
2. Geotêxtil altamente drenante de dimensões desprezíveis;
3. Solo ácido com 5 cm;
4. Geotêxtil altamente drenante de dimensões desprezíveis;
5. Cobertura alcalina com 5 cm;
6. Areia grossa com 15 cm.

Figura 6 - Modelo no SEEP/W.



Fonte: Autor (2025).

A modelagem numérica foi conduzida em regime transiente, considerando que as condições climáticas atuantes não podem ser representadas por uma referência hidráulica fixa, típica de análises em regime permanente.

No software SEEP/W, a condição climática é simulada como fluxo dependente do tempo, caracterizando o fluxo atmosférico. Essa condição permite controlar os processos de infiltração decorrente da precipitação, bem como a evaporação e a evapotranspiração, sem, no entanto, fixar a carga hidráulica no contorno, o que confere maior representatividade física ao modelo.

Condições de contorno

As condições de contorno foram definidas a partir do lisímetro já existente. Como ele está limitado nas laterais por um material impermeável plástico, as paredes do modelo foram consideradas da mesma forma. Já a parte inferior, que possui um dreno, foi considerado um contorno de drenagem plena.

Na parte superior a condição de contorno utilizada foi a de interação solo-clima. Seus valores foram obtidos usando a estação meteorológica de Ouro Branco/MG. Ela

mediu os dados de pluviosidade, velocidade do vento, umidade e temperatura entre os anos 2018 e 2021.

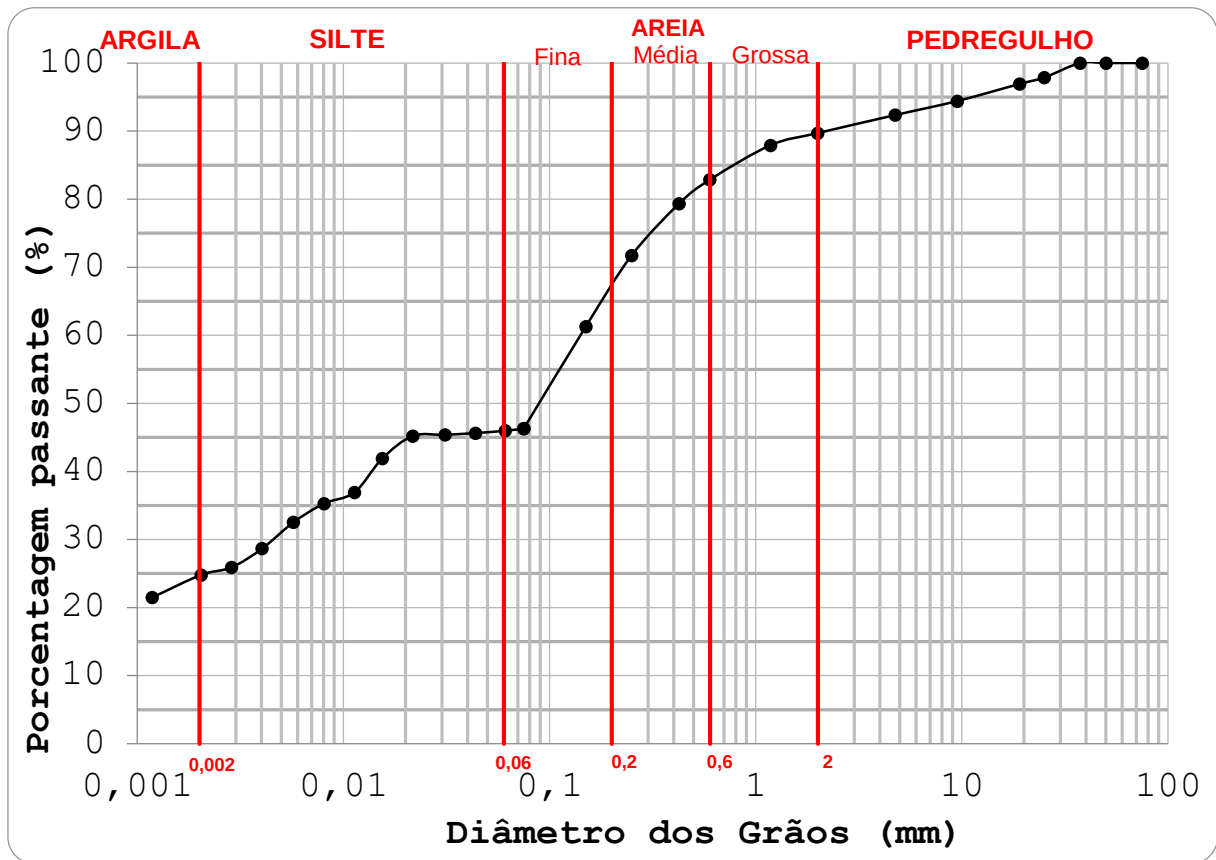
No SEEP/W, os cálculos são obtidos considerando a interação dos materiais com a atmosfera. Os dados de pluviosidade, velocidade do vento, umidade, temperatura e radiação global e albedo são consideradas como condição de contorno atmosférica pelo software.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

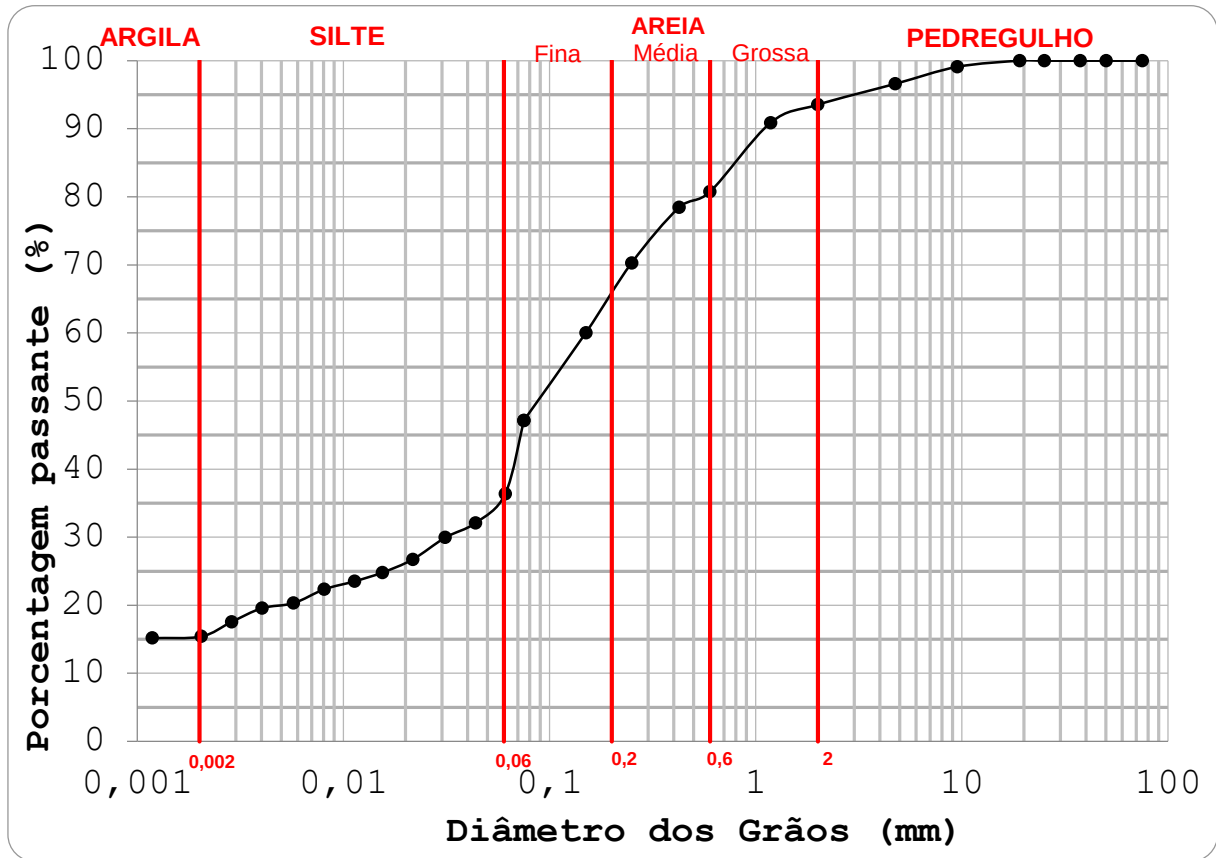
Os ensaios de caracterização física permitiram determinar a distribuição granulométrica e os principais índices físicos dos solos (massa específica, índice de vazios inicial e umidade média) utilizados no lisímetro. O Solo 1 apresentou a distribuição granulométrica mostrada na Figura 7 e o solo 2 na Figura 8.

Figura 7 - Curva granulométrica do Solo 1.



Fonte: Adaptado de Boulou, s.d.

Figura 8 - Curva granulométrica do Solo 2.



Fonte: Adaptado de Boulou, s.d.

Para obter a curva característica dos solos foi preciso classificá-los de acordo com o triângulo textural do *United States Department of Agriculture* (USDA) (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993). Dessa forma, o Solo 1 (ácido) foi classificado como areia franca (*sandy loam*) e o Solo 2 (cobertura) como areia argilosa franca (*sandy clay loam*). Os valores para a massa específica, índice de vazios inicial e umidade média são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros dos solos.

Parâmetros dos solos	Solo 1	Solo 2
Massa específica (g/cm ³)	1,51	2,17
Índice de vazios inicial	0,85	0,39
Umidade média (%)	20,15	11,90

Fonte: Adaptado Boulou, s.d.

Como não foram realizados ensaios de caracterização da areia utilizada na parte superior e inferior do lisímetro, adotou-se massa específica dos grãos igual a

2,65 g/cm³, umidade natural média de 4% e índice de vazios representativo de 0,55, valores compatíveis com as faixas apresentadas na literatura clássica de Mecânica dos Solos (PINTO, 2006; TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996; DAS, 2011).

Esses dados foram utilizados para calcular o teor de umidade volumétrico (θ_w) a partir da equação (6):

$$\theta_w = S_r \cdot n \quad (6)$$

Sendo, S_r o Grau Saturação Inicial calculado com a equação (7) e o n a porosidade com a equação (8).

$$S_r = \frac{w \cdot g_s}{e_i} \quad (7)$$

Onde: w é a umidade média, g_s a massa específica dos grãos e o e_i o índice de vazios inicial.

$$n = \frac{e_i}{1 + e_i} \quad (8)$$

Dessa forma podemos chegar aos seguintes valores da Tabela 2:

Tabela 2 - Teor de umidade volumétrico (θ_w).	
Teor de umidade volumétrico (%)	
Areia	6,84
Solo 1	30,43
Solo 2	25,73

Fonte: Autor (2026).

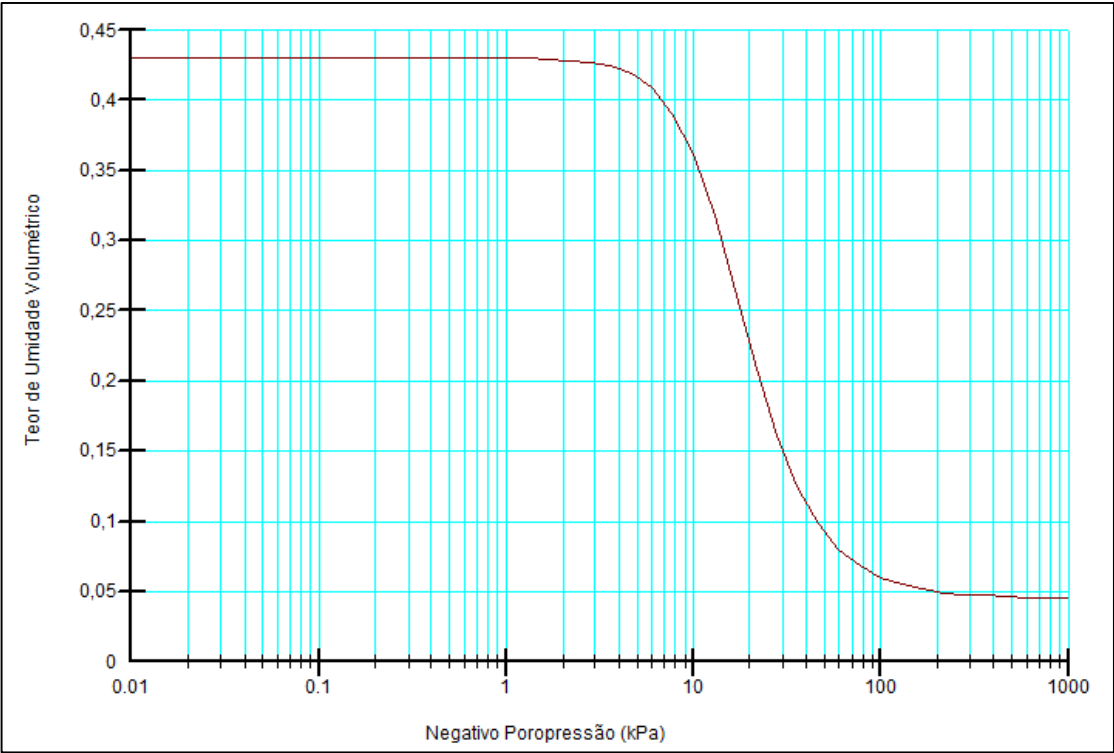
4.2. CURVA CARACTERÍSTICA

A partir das curvas granulométricas foi possível definir as suas respectivas curvas características assim como seus parâmetros com o RETC, apresentados na Tabela 3. As Figura 9 a Figura 11 mostram essas curvas.

Tabela 3 - Parâmetros da curva característica.					
Material	θ_R	θ_s	α (kPa)	n	K_s (m/s)
	(teor de umidade residual)	(teor de umidade saturado)	(parâmetro relacionado à pressão de entrada de ar)	(parâmetro de forma da curva)	(condutividade hidráulica saturada)
Areia (sand)	0,045	0,43	14,5	2,68	8,25 E-05
Solo 1 (sandy loam)	0,065	0,41	7,5	1,89	1,22801 E-05
Solo 2 (Sandy clay loam)	0,1	0,39	5,9	1,48	3,63889 E-06

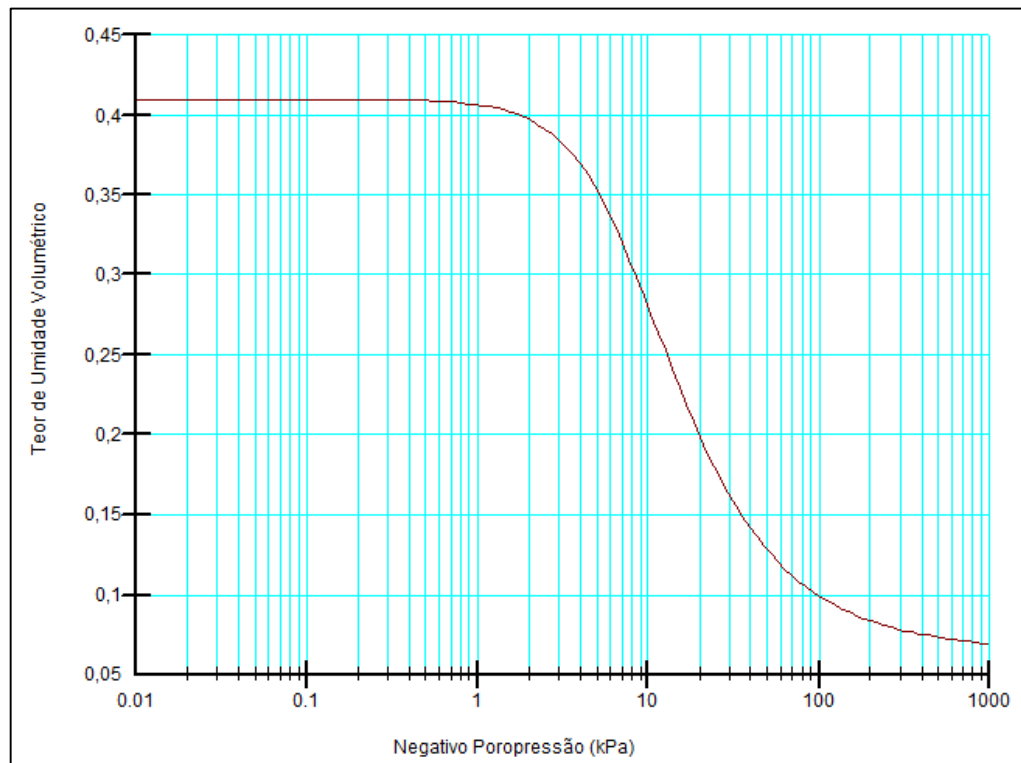
Fonte: Adaptado RETC (2026)

Figura 9 - Curva característica da areia.



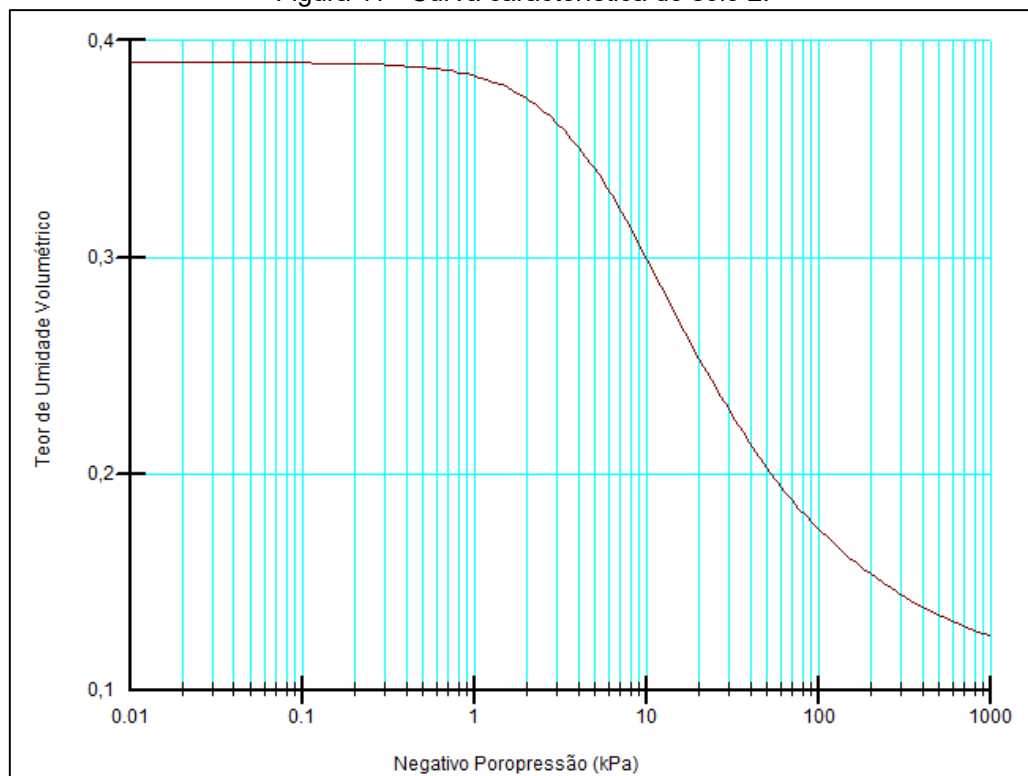
Fonte: Adaptado RETC (2026).

Figura 10 - Curva característica do solo 1.



Fonte: Adaptado RETC (2026).

Figura 11 - Curva característica do solo 2.



Fonte: Adaptado RETC (2026).

Com as curvas características definidas foi possível calcular a poropressão inicial de cada material, cujos resultados se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 – Poropressão inicial de cada material.

Poropressão inicial (kPa)	
Areia	-0,37
Solo 1	-0,15
Solo 2	-0,54

Fonte: Autor (2026).

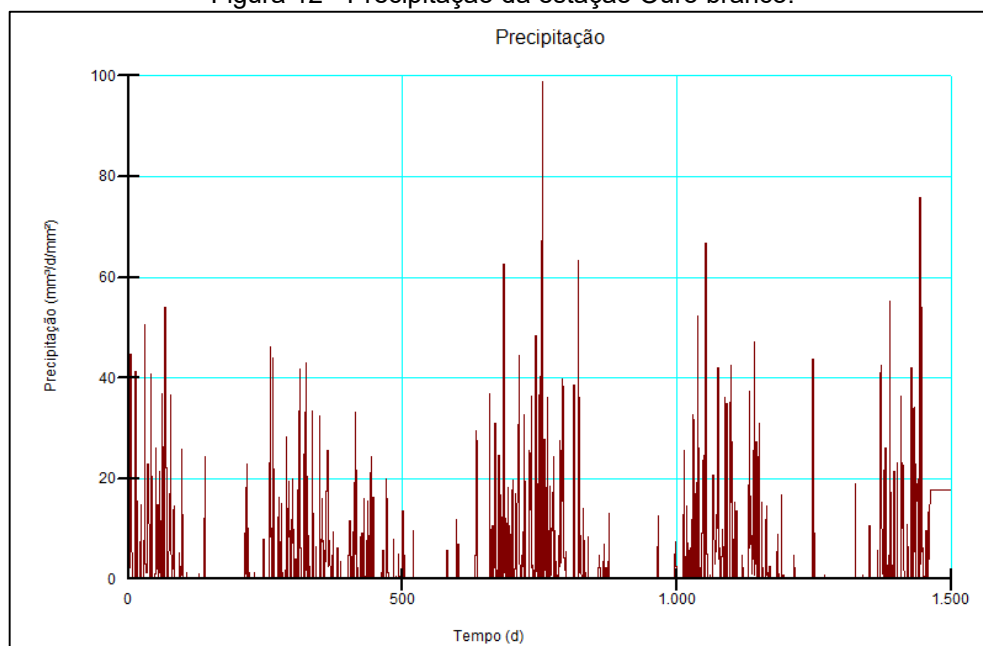
4.3. ANÁLISE NO SEEP/W

Os resultados da análise numérica serão apresentados em dados de entrada e análise dos resultados.

4.3.1. Dados de entrada

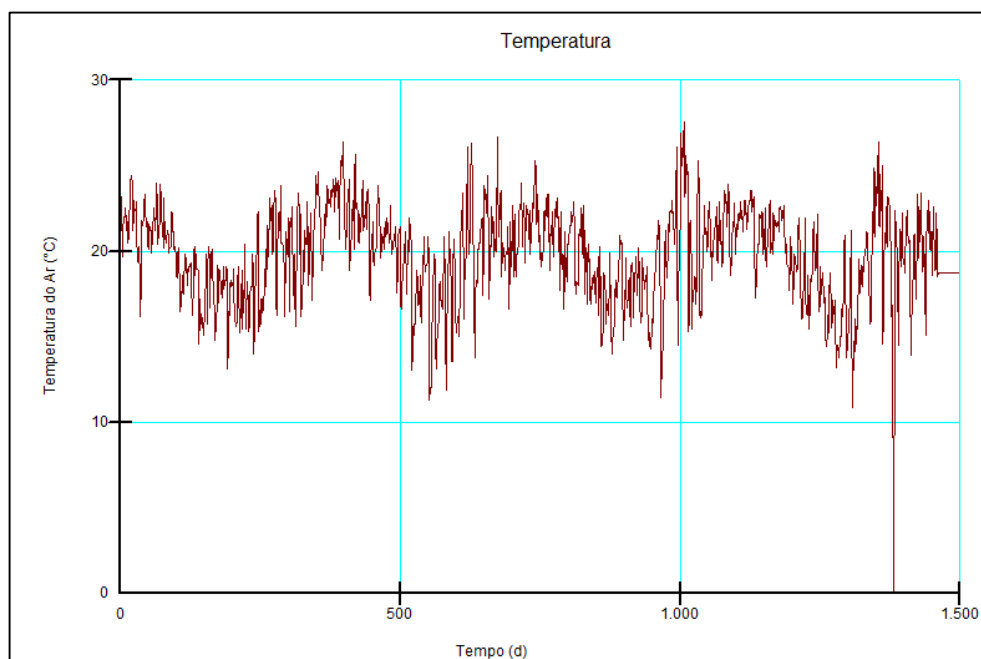
Os dados climáticos utilizados nas simulações compreendem as séries de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento da estação Ouro Branco, aplicadas como condições de contorno atmosféricas do modelo. Os gráficos apresentados a seguir mostram a variação temporal desses parâmetros entre os anos de 2018 e 2021.

Figura 12 - Precipitação da estação Ouro branco.



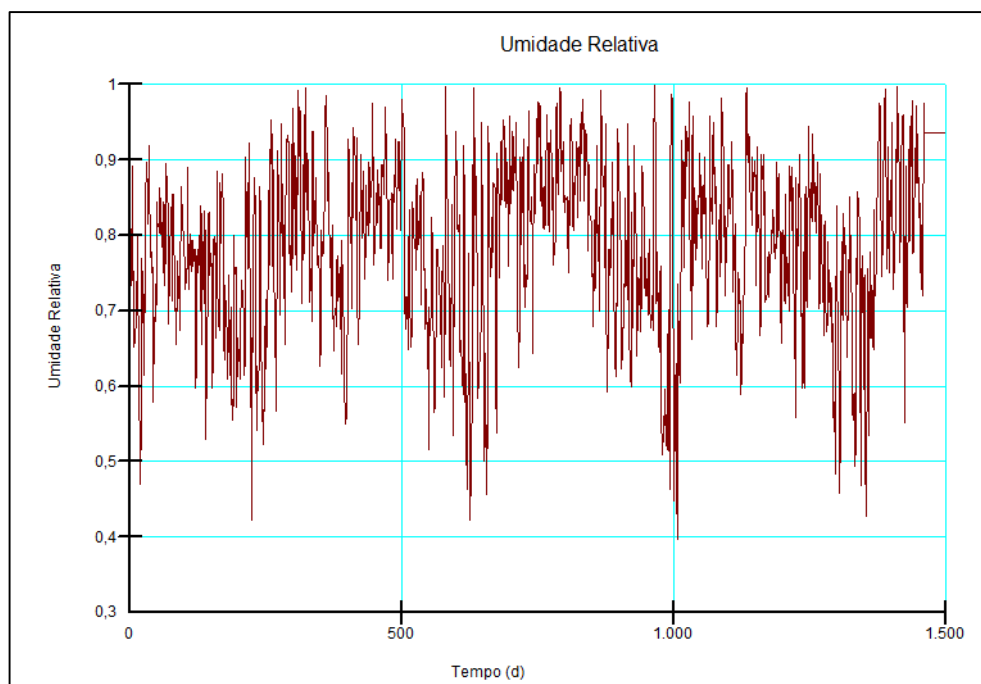
Fonte: Adaptado INMET (2026).

Figura 13 - Temperatura do ar da estação Ouro Branco.



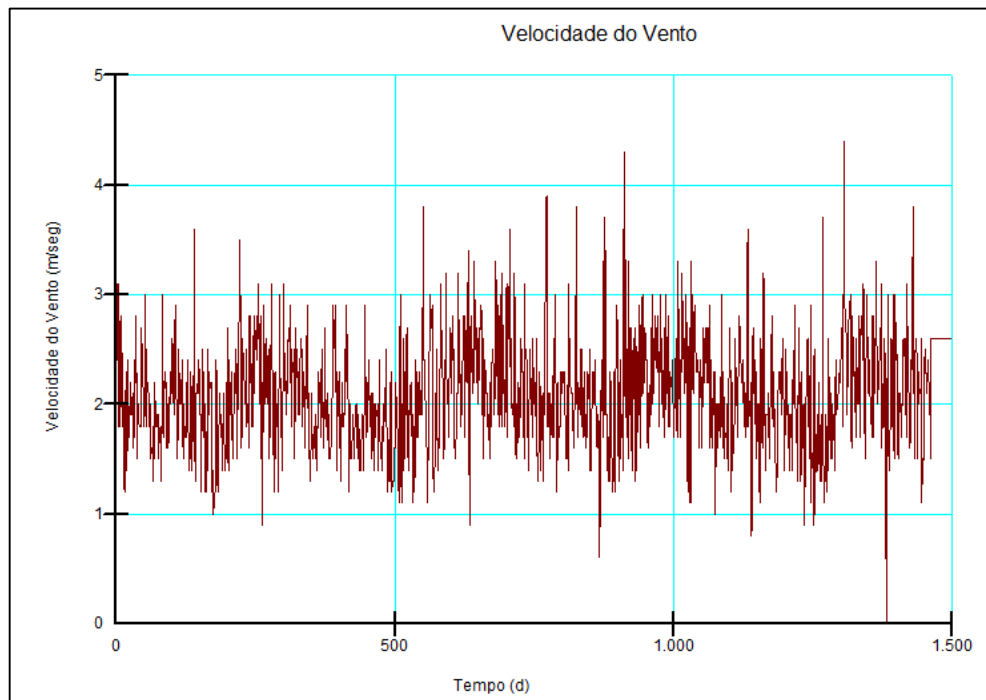
Fonte: Adaptado INMET (2026).

Figura 14 - Umidade relativa da estação Ouro Branco.



Fonte: Adaptado INMET (2026).

Figura 15 - Velocidade do vento da estação Ouro Branco.



Fonte: Adaptado INMET (2026).

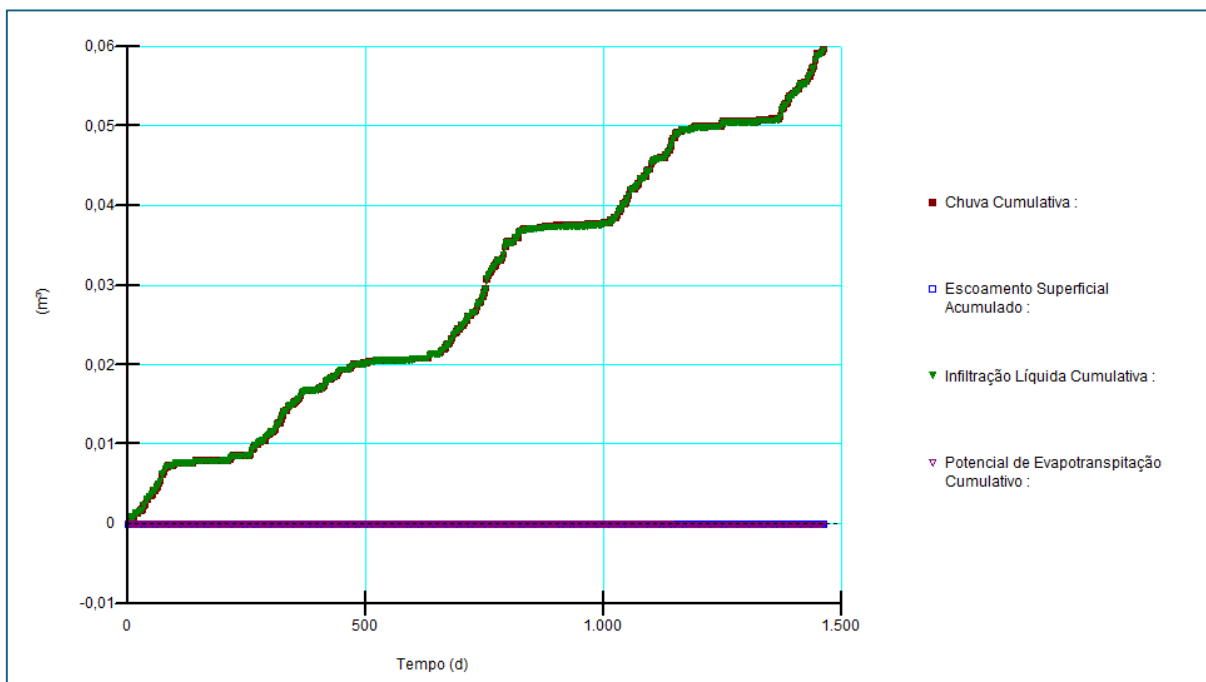
A evapotranspiração foi calculada pelo software SEEP/W por meio do método de Penman-Monteith. A radiação foi definida a partir da latitude de onde está a estação meteorológica. Já o albedo, que é o coeficiente de reflexão de todo o intervalo da radiação visível, não foi medido pela estação meteorológica, portanto, esse valor foi obtido por uma média terrestre, que segundo VAREJÃO-SILVA (2006), do total de radiação solar (100%) incidente sobre a Terra, 36% retornam diretamente para o espaço por reflexão das nuvens, partículas em suspensão e da superfície.

Um aspecto fundamental a ser definido na modelagem refere-se à posição inicial da superfície piezométrica. Considerando que o lisímetro encontra-se inicialmente em condição seca, ou seja, sem a presença de nível d'água em seu interior, a superfície piezométrica foi posicionada na base do sistema de camadas. Essa definição estabelece a condição inicial de poropressão nula em todo o domínio, a partir da qual as simulações transientes serão iniciadas.

4.3.2. Resultados da análise numérica

Após inserir todos os dados de entrada e definir os períodos, foi possível gerar um gráfico com uma análise do balanço hídrico em um ponto localizado na porção superior do lisímetro, indicando que a dinâmica de fluxo é diretamente controlada pela variabilidade das condições atmosféricas impostas na superfície.

Figura 16 - Balanço hídrico do lisímetro com gráficos acumulados.



Fonte: Autor (2026)

Na Figura 16 observa-se que a chuva cumulativa (linha vermelha) alcança aproximadamente 0,06 m ao término do período analisado, apresentando aumentos associados a ocorrências pontuais de precipitação, o que evidencia uma distribuição temporal irregular das chuvas. A infiltração líquida cumulativa (linha verde) acompanha de maneira praticamente sobreposta a curva de precipitação ao longo de todo o intervalo estudado, indicando que a maior parte da água precipitada foi efetivamente absorvida pelo perfil do solo.

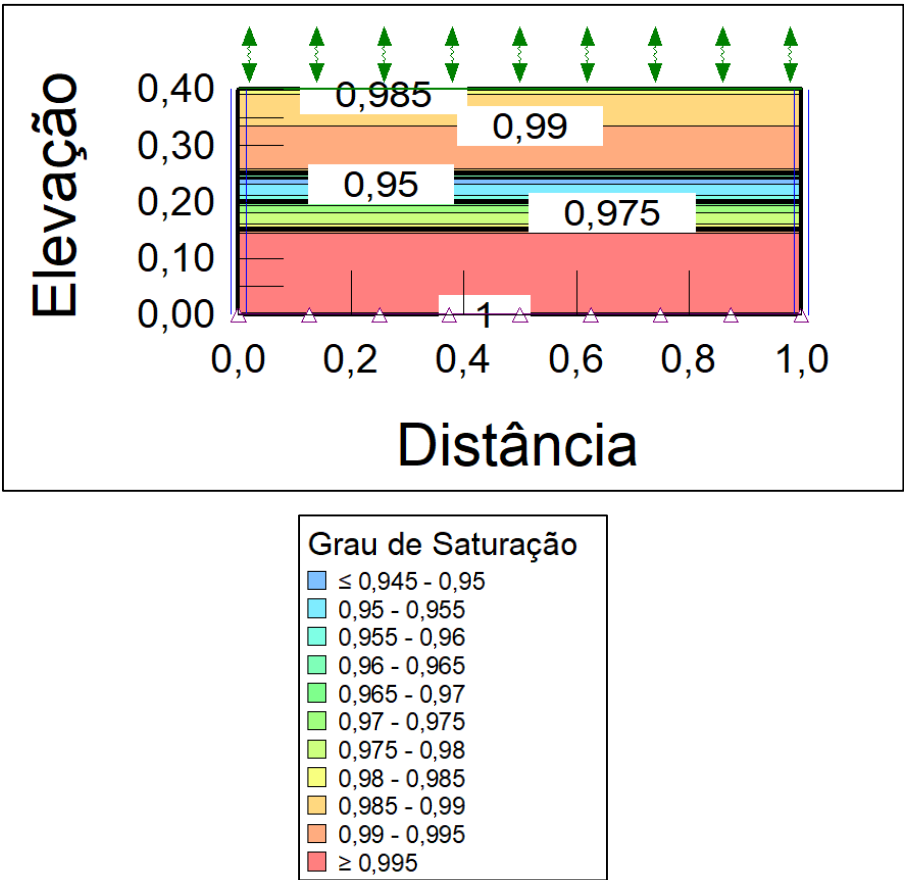
O escoamento superficial acumulado (linha azul) permanece praticamente nulo ao longo de todo o período, evidenciando que não houve geração relevante de *runoff*, que é a parte da precipitação que não infiltra no solo e escoar pela superfície. Esse

comportamento é compatível com alta capacidade de infiltração do material superficial e ausência de excedente hídrico na superfície.

Já o potencial de evapotranspiração cumulativo (linha roxa) também se mantém muito próximo de zero, indicando que, neste cenário específico, as perdas atmosféricas tiveram influência pouco expressiva no balanço global quando comparadas ao volume precipitado.

O sistema demonstra um comportamento predominando a infiltração, com armazenamento interno sendo controlado principalmente pela diferença entre infiltração e evapotranspiração. A ausência de escoamento superficial sugere que o solo não atingiu condição de saturação superficial persistente ao longo do período analisado. O grau de saturação do modelo no último dia da análise é apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Grau de saturação no último dia de análise.



Fonte: Autor (2026)

Observa-se que a camada inferior (região em vermelho) apresenta $S_r \approx 1,0$, caracterizando condição praticamente saturada. Esse comportamento indica acúmulo de água nas porções mais profundas do perfil, coerente com a percolação descendente imposta na superfície.

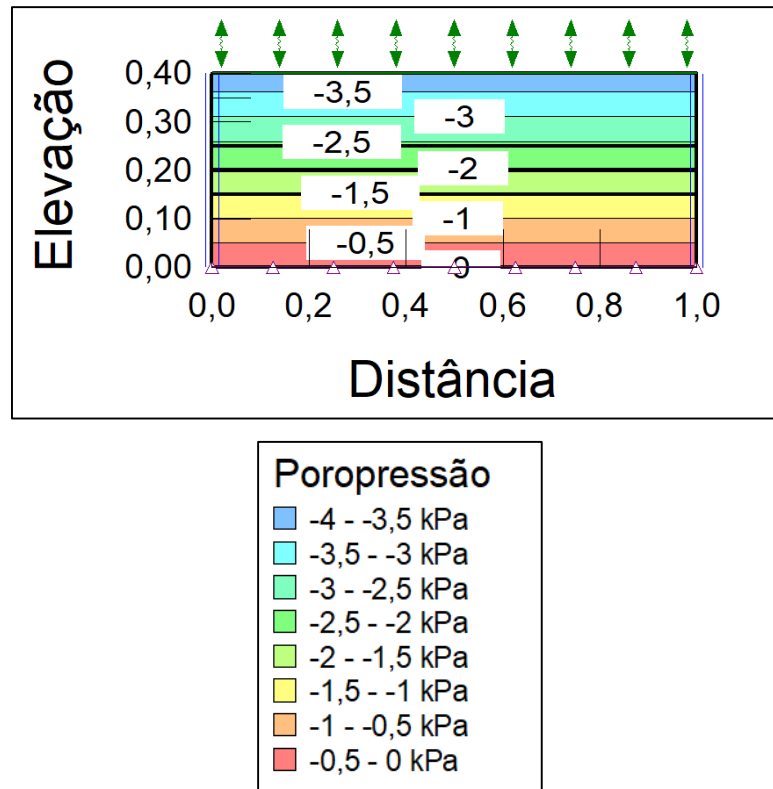
Na zona intermediária, os valores variam entre 0,95 e 0,975, representados por tonalidades de transição (verde a amarelo), indicando material altamente saturado, porém ainda com presença de ar nos vazios. Essa região funciona como zona de transição entre o domínio saturado inferior e a camada superior.

Já na camada mais superficial, os valores variam entre 0,985 e 0,99, mantendo-se elevados, porém ligeiramente inferiores à saturação completa. Isso indica que, embora haja infiltração constante, os processos de evapotranspiração promovem pequena redução no grau de saturação próximo à superfície.

A ausência de variação lateral significativa confirma que o fluxo ocorre essencialmente na direção vertical, sem formação de zonas preferenciais horizontais. De modo geral, o perfil encontra-se em condição próxima à saturação plena, com diferenças de grau de saturação associadas principalmente ao balanço entre infiltração e evapotranspiração e à redistribuição interna da água no meio poroso.

A Figura 18 apresenta a distribuição da poropressão (u) ao longo do perfil, evidenciando valores negativos em praticamente toda a altura do lisímetro, com variação predominantemente vertical e comportamento uniforme na direção horizontal, reforçando o resultado do grau de saturação. Os valores são relativamente baixos, o que era esperado, visto o alto grau de saturação das camadas.

Figura 18 - Poropressão no último dia de análise.

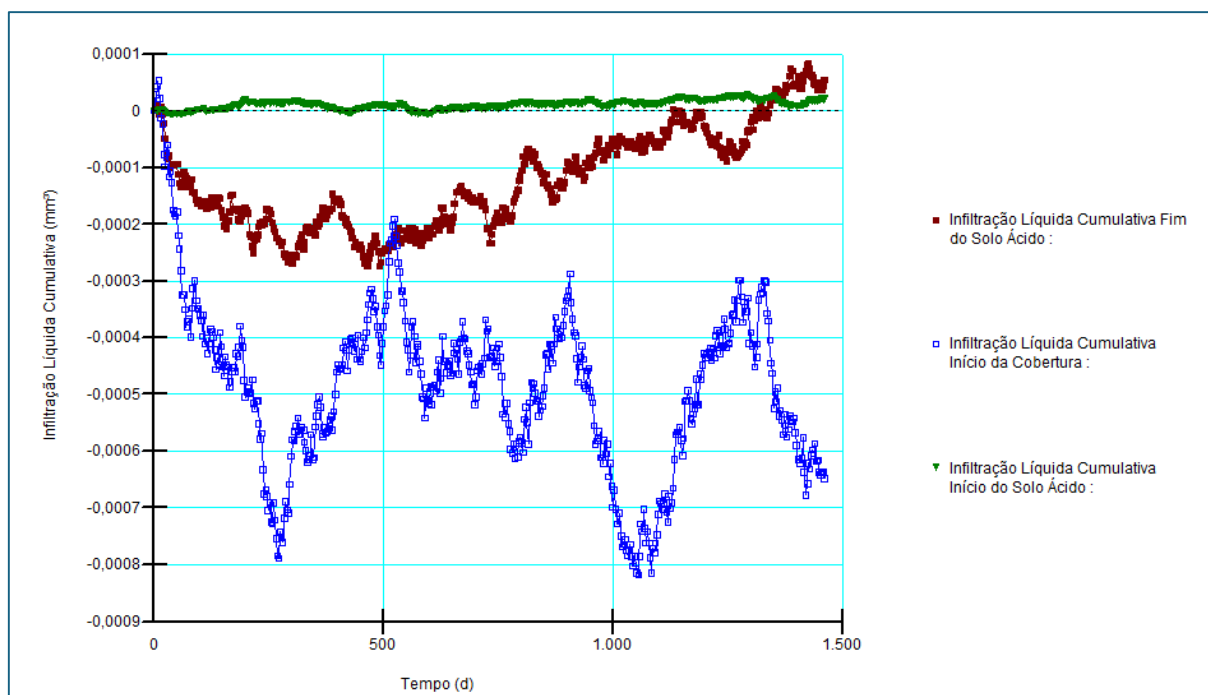


Fonte: Autor (2026)

Observa-se que, na base do perfil, a poropressão tende a valores próximos de 0 kPa, indicando condição próxima à saturação e a superfície piezométrica que foi inserida. À medida que se avança em direção à superfície, os valores tornam-se progressivamente mais negativos, atingindo aproximadamente -3,5 kPa na região superior. Esse gradiente vertical de sucção caracteriza um perfil em condição não saturada na parte superior, com aumento da tensão capilar em direção ao topo.

Para analisar a infiltração líquida acumulada no início da cobertura, no contato entre a cobertura e o solo ácido e no fim do solo ácido, ao longo do tempo, temos a Figura 19.

Figura 19 - Infiltração na cobertura e no solo ácido.



Fonte: Autor (2026)

A linha azul, correspondente ao início da cobertura, apresenta os valores negativos mais expressivos ao longo do período analisado, indicando maior intensidade de fluxo descendente nessa região. Observa-se também maior variabilidade temporal, refletindo a resposta direta da camada superficial aos eventos de precipitação e às variações climáticas. Isso confirma que a cobertura é a zona de maior gradiente hidráulico e principal responsável pela transmissão inicial da água infiltrada. No início do solo ácido (curva verde), os valores permanecem próximos de zero ao longo de todo o período, o que sugere que essa interface atua como zona de equilíbrio hidráulico. Isso indica que a quantidade de água que chega a essa camada é aproximadamente compensada pela redistribuição interna e pelo armazenamento temporário, sem acúmulo significativo de fluxo líquido cumulativo.

Já a linha vermelha, correspondente ao fim do solo ácido, apresenta valores negativos acumulados ao longo do período, indicando que o fluxo descendente atravessa todo o perfil. Entretanto, a magnitude é inferior à observada na cobertura, demonstrando redução progressiva da intensidade de percolação com a profundidade.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados de poropressões, grau de saturação, infiltração líquida cumulativa e balanço hídrico em ponto superior do lisímetro é possível estabelecer uma conclusão técnica consistente sobre o comportamento hidráulico do sistema de cobertura.

Os resultados indicam que o fluxo no interior do lisímetro ocorre predominantemente sob regime não saturado, com gradientes hidráulicos controlados principalmente pelas condições atmosféricas impostas na superfície. A análise da carga hidráulica total evidencia a formação de gradientes verticais compatíveis com infiltração descendente nos períodos chuvosos e redistribuição interna nos períodos secos. A presença da superfície piezométrica na base influencia diretamente a distribuição de poropressões, estabelecendo uma condição de contorno que controla a drenagem inferior e limita o desenvolvimento de pressões neutras positivas nas camadas superiores.

O comportamento do grau de saturação confirma que a cobertura alcalina permanece majoritariamente em condição parcialmente saturada, com aumento de saturação concentrado nas zonas mais profundas e próximas à interface com o material subjacente. A camada superficial apresenta maior variabilidade temporal, refletindo a influência direta da precipitação e evapotranspiração.

A análise da infiltração líquida cumulativa demonstra que o sistema opera próximo ao equilíbrio hidráulico, com fluxos de baixa magnitude e predominância de redistribuição interna ao longo do tempo. A ocorrência de valores negativos em determinados pontos indica momentos de fluxo ascendente ou extração hídrica superficial, associados à sucção imposta pelas condições climáticas.

Destaca-se que o lisímetro possui espessuras reduzidas de camadas quando comparado a sistemas de campo, o que implica menor capacidade de armazenamento hídrico e resposta mais rápida às variações climáticas. Essa característica favorece ciclos mais intensos de umedecimento e secagem, podendo levar ao ressecamento acelerado das camadas superficiais durante períodos secos.

Portanto, os resultados devem ser interpretados considerando a limitação de escala do experimento, uma vez que sistemas reais de cobertura, com maiores espessuras, tendem a apresentar maior inércia hidráulica e resposta mais amortecida às variações atmosféricas.

De forma integrada, os resultados demonstram que a cobertura alcalina exerce controle efetivo sobre o fluxo de água, reduzindo a percolação vertical intensa e mantendo o sistema majoritariamente sob condições não saturadas. Esse comportamento é fundamental para a mitigação da drenagem ácida de rocha, uma vez que a limitação da infiltração profunda contribui para a redução do contato entre água e material potencialmente gerador de acidez.

Apesar das condições não saturadas facilitarem o fluxo de oxigênio em relação à uma saturação plena, os altos índices de saturação e baixos valores de porosidade dificultam o ingresso de oxigênio no sistema de cobertura e no material potencialmente gerador de acidez.

Assim, conclui-se que o desempenho hidráulico observado indica eficiência da cobertura como barreira hidráulica parcial, atuando tanto pelo controle da infiltração, quanto pela manutenção de condições de sucção favoráveis à estabilidade do sistema ao longo do período analisado.

REFERENCIAS

ADU-WUSU, C. & YANFUL, E.K. Performance of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle mine, Ontario. Can. Geotechnol. J., 43:1-18, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: solo — análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

BOULOU, H. E. S. Fluxos aquoso e de oxigênio em coberturas alcalinas: estudo numérico e experimental. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Não Publicado.

BUSSIÈRE, B.; BENZAAZOUA, M.; AUBERTIN, M. & MBONIMPA, M. A laboratory study of covers made of low-sulphide tailings to prevent acid mine drainage. Environ. Geol., 45:609-622, 2004.

DAS, Braja M. Fundamentos de engenharia geotécnica. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: John Wiley & Sons, 1993. 517 p.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, v. 31, n. 4, p. 521–532, 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. W. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, v. 31, n. 4, p. 533–546, 1994.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL. SEEP/W: módulo do GeoStudio para análise de fluxo em meios porosos. Versão 2019. Calgary: GEO-SLOPE International, 2019.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP): Estação Meteorológica de Ouro Branco – Código A513. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 3 de março de 2026.

PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos. 3. ed. São Paulo: Grupo A, 2006. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>.

MATEUS, Maria do Socorro Costa Sao. Determinação em laboratório da condutividade hidráulica de solos não saturados. 1994. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994. doi:10.11606/D.18.1994.tde-29082024-092148.

MARINHO, F. A. M. Introdução ao comportamento dos solos não saturados. Mini curso ministrado durante o XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Brasília, 1998.

MEND PROGRAM. Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials. Ottawa: Environment Canada, 2009.

RETC: computer program for analyzing soil water retention and hydraulic conductivity functions. Versão Windows 2.0. Riverside: U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS, 1998. Disponível em: <https://www.pc-progress.com/en/default.aspx?retc>

SALOMONS, W.; STIGLIANI, W. M. (ed.). Biogeodynamics of pollutants in soils and sediments: risk assessment of delayed and non-linear responses. Berlin: Springer, 1995.

SOARES, A.B.; UBALDO, M.O.; SOUZA, V.P.; SOARES, P.S.M.; BARBOSA, M.C. & MENDONÇA, R.M.G. Design of a dry cover pilot test for acid mine drainage abatement in southern Brazil. I: Materials characterization and numerical modeling. Mine Water Environ., 28:219-231, 2009.

SOUZA, V. P.; BORMA, L. D. S.; MENDONÇA, R. M. G. Projeto de coberturas secas para controle da drenagem ácida em depósitos geradores de acidez. In: SEMINÁRIO BRASIL CANADÁ DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS MINERADAS, 12., 2003, Florianópolis. Rio de Janeiro: CETEM/SBG, 2003. v. 1, p. 253-271.

O'KANE, M. et al. CANMET - CETEM manual on cover system design for reactive mine waste. Ottawa: CANMET, 2002. (OKC Report, 689-01).

PRICE, W. A. Prediction manual for drainage chemistry from sulfidic geologic materials. MEND Report 1.20.1. CANMET – Mining and Mineral Sciences Laboratories, 2009.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. Soil mechanics in engineering practice. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil survey manual. Washington, DC: USDA, Natural Resources Conservation Service, 2017. (USDA Handbook, n. 18).

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, v. 44, p. 892–898, 1980.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e climatologia. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

ANEXO I – RELATÓRIO DA ANÁLISE NO SEEP/W

Análise SEEP/W

Relatório gerado usando GeoStudio 2024.2.1. Copyright © 2024 Bentley Systems, Incorporated.

Informação Sobre o Arquivo

Versão do Arquivo: 11.07
Versão da Ferramenta: 24.2.1.28
Criado por: Ligya
Editado por Último por: Ligya
Número da Revisão: 45
Data: 03/03/2026
Tempo: 19:47:15
Nome do Arquivo: lisimetro v1.gsz
Diretório: C:\Users\Lygia\Documents\UFOP\Trabalho de Conclusão de Curso - TCC\
Data Que Foi Solucionada por Último: 03/03/2026
Hora em Que Foi Executada da Última Vez: 19:58:41

Configurações de Projeto

Sistema de Unidades: Sistema Internacional de Unidades (SI)
Data de Início: domingo, 01' 01e 'janeiro' 01e '2018

Configurações da Análise

Análise SEEP/W

Tipo: SEEP/W
Tipo de Análise: Transiente
Física
Transferência de Água
Convecção livre: efeitos térmicos: Não
Convecção livre: efeitos de soluto: Não
Transferência de vapor: isotérmica: Não
Transferência de vapor: térmica: Não
Configurações de Água
Poropressão Inicial de: Superfície Piezométrica
Número Máximo de Iterações: 500
Diferença Máxima: 0,005
Dígitos Significativos: 2
N.º Máx. de Verificações: 10
Critério de Sobre-Relaxação
Taxa Inicial: 1
Taxa Mínima: 0,1
Taxa do Fator de Redução: 0,65
Frequência de Reduções (Iterações): 10
Peso Específico da Água: 9,807 kN/m³
Módulo Volumétrico de Poro-Fluido: 2.083.333,3 kPa
Configurações
Excluir valores cumulativos: Não
Etapas
Tempo de Início: 1 d
Duração: 1.459 d
N.º de Etapas: 1.459
Método de Geração de Etapas: Linear
Incremento de Tempo: 1 d

Materiais

Areia grossa

Hidráulica

Modelo de Material Hidráulico: Saturado/Não Saturado

Função Teor de Umidade Volumétrica: Van Genuchten areia

Função de Condutividade Hidráulica: Cond hid areia

Ky'/Kx' Ratio: 1

Kz'/Kx' Ratio: 1

Dip Direction: 90 °

Dip: 0 °

Poropressão de Ativação: -0,37 kPa

Solo Ácido

Hidráulica

Modelo de Material Hidráulico: Saturado/Não Saturado

Função Teor de Umidade Volumétrica: Van Genuchten acido (solo 1)

Função de Condutividade Hidráulica: Cond hid solo acido

Ky'/Kx' Ratio: 1

Kz'/Kx' Ratio: 1

Dip Direction: 90 °

Dip: 0 °

Poropressão de Ativação: -0,15 kPa

Cobertura

Hidráulica

Modelo de Material Hidráulico: Saturado/Não Saturado

Função Teor de Umidade Volumétrica: Van Genuchten cobertura (solo 2 lateritico + cal)

Função de Condutividade Hidráulica: cond hid cobertura

Ky'/Kx' Ratio: 1

Kz'/Kx' Ratio: 1

Dip Direction: 90 °

Dip: 0 °

Poropressão de Ativação: -0,54 kPa

Superfícies Piezométricas Iniciais

Superfície Piezométrica Inicial 1

Sucção máx.: 50 kPa

Coordenadas

Coordenada 1: (0; 0) m

Coordenada 2: (1; 0) m

Condições de Contorno

Drainage

Categoria: Hidráulica

Tipo: Vazão de Água 0 m³/seg

Verificar: Sim

terra-clima

Categoria: [Hidráulica](#)

Tipo: [Interação Terra-Clima](#)

Método de Evapotranspiração: [Penman-Monteith](#)

Permitir evaporação durante eventos pluviométricos: [Sim](#)

Função de Temperatura do Ar: [Temperatura](#)

ID da Função de Precipitação: [Precipitação](#)

ID da Função de Umidade Relativa: [Umidade Relativa](#)

Função de Velocidade do Vento: [Velocidade do Vento](#)

Tipo de radiação: [Fluxo de Radiação Solar kJ/seg/m²](#)

Função de Radiação Solar: [radiação](#)

Função Albedo: [albedo](#)

Funções de Vegetação Necessárias: [Não](#)

Método de Poropressão Mínima: [Calculado](#)

Funções Climáticas

Temperatura

Modelo: [Função Linear de Dados](#)

Função: [Temperatura do Ar x Tempo](#)

Intercepto Y: [22,1 °C](#)

Série de Dados: [estação ouro branco](#)

Precipitação

Modelo: [Função Dados de Etapas](#)

Função: [Precipitação x Tempo](#)

Série de Dados: [estação ouro branco](#)

Umidade Relativa

Modelo: [Função Linear de Dados](#)

Função: [Umidade Relativa x Tempo](#)

Intercepto Y: [0,748](#)

Série de Dados: [estação ouro branco](#)

albedo

Modelo: [Função Dados de Etapas](#)

Função: [Albedo x Tempo](#)

Intercepto Y: [0,36](#)

Pontos de Dados: [Tempo \(d\), Albedo](#)

Ponto de Dados: [\(0; 0,36\)](#)

Ponto de Dados: [\(1; 0,36\)](#)

Ponto de Dados: [\(1.525; 0,36\)](#)

radiação

Modelo: [Radiação Solar Estimada](#)

Função: [Fluxo de Radiação Solar x Tempo](#)

Latitude: [-20,5566 °](#)

Distribui senoidalmente: [Não](#)

Intercepto Y: [0,36678052 kJ/seg/m²](#)

Velocidade do Vento

Modelo: [Função Linear de Dados](#)

Função: [Velocidade do Vento x Tempo](#)

Intercepto Y: [2,4 m/seg](#)

Série de Dados: [estação ouro branco](#)

Funções Cond. da Água K

Cond hid areia

Modelo: Função Dados de Cond. Hidráulica

Função: Condutividade X da Água x Poropressão

Curva Ajustada aos Dados: 100 %

Curvatura do Segmento: 100 %

Kx Saturada: 8,25e-05 m/seg

Pontos de Dados: Sucção Mátrica (kPa), Condutividade X da Água (m/seg)

Ponto de Dados: (0; 8,25e-05)

Ponto de Dados: (0,01; 8,2499179e-05)

Ponto de Dados: (0,018329807; 8,2497735e-05)

Ponto de Dados: (0,033598183; 8,249373e-05)

Ponto de Dados: (0,061584821; 8,2482662e-05)

Ponto de Dados: (0,11288379; 8,2452076e-05)

Ponto de Dados: (0,20691381; 8,2367398e-05)

Ponto de Dados: (0,37926902; 8,2133164e-05)

Ponto de Dados: (0,6951928; 8,1484974e-05)

Ponto de Dados: (1,274275; 7,9694334e-05)

Ponto de Dados: (2,3357215; 7,4818067e-05)

Ponto de Dados: (4,2813324; 6,2231674e-05)

Ponto de Dados: (7,8475997; 3,6092446e-05)

Ponto de Dados: (14,384499; 8,4359731e-06)

Ponto de Dados: (26,366509; 5,5445365e-07)

Ponto de Dados: (48,329302; 1,7222765e-08)

Ponto de Dados: (88,586679; 4,2872411e-10)

Ponto de Dados: (162,37767; 1,0170457e-11)

Ponto de Dados: (297,63514; 2,3892948e-13)

Ponto de Dados: (545,55948; 5,6022428e-15)

Ponto de Dados: (1.000; 1,3130731e-16)

Propriedades Estimadas

Método de Estimação de Função de Condutividade Hidráulica K: Função Van Genuchten

Função TU Vol.: Van Genuchten areia

Kx Saturada: 8,25e-05 m/seg

Sucção Máxima: 1.000 kPa

Sucção Mínima: 0,01 kPa

Num. Pontos: 20

cond hid cobertura

Modelo: Função Dados de Cond. Hidráulica

Função: Condutividade X da Água x Poropressão

Curva Ajustada aos Dados: 100 %

Curvatura do Segmento: 100 %

Kx Saturada: 3,638891e-06 m/seg

Pontos de Dados: Sucção Mátrica (kPa), Condutividade X da Água (m/seg)

Ponto de Dados: (0; 3,638891e-06)

Ponto de Dados: (0,01; 3,2989944e-06)

Ponto de Dados: (0,018329807; 3,1888036e-06)

Ponto de Dados: (0,033598183; 3,0443039e-06)

Ponto de Dados: (0,061584821; 2,8566587e-06)

Ponto de Dados: (0,11288379; 2,6154643e-06)

Ponto de Dados: (0,20691381; 2,3104417e-06)

Ponto de Dados: (0,37926902; 1,9347413e-06)

Ponto de Dados: (0,6951928; 1,4922981e-06)

Ponto de Dados: (1,274275; 1,0117457e-06)

Ponto de Dados: (2,3357215; 5,61378e-07)

Ponto de Dados: (4,2813324; 2,3363455e-07)

Ponto de Dados: (7,8475997; 6,9001026e-08)
Ponto de Dados: (14,384499; 1,495721e-08)
Ponto de Dados: (26,366509; 2,6350573e-09)
Ponto de Dados: (48,329302; 4,1579968e-10)
Ponto de Dados: (88,586679; 6,2350891e-11)
Ponto de Dados: (162,37767; 9,1467079e-12)
Ponto de Dados: (297,63514; 1,3295328e-12)
Ponto de Dados: (545,55948; 1,9252574e-13)
Ponto de Dados: (1.000; 2,7835857e-14)

Propriedades Estimadas

Método de Estimação de Função de Condutividade Hidráulica K: Função Van Genuchten
Função TU Vol.: Van Genuchten cobertura (solo 2 laterítico + cal)
Kx Saturada: 3,638891e-06 m/seg
Sucção Máxima: 1.000 kPa
Sucção Mínima: 0,01 kPa
Num. Pontos: 20

Cond hid solo acido

Modelo: Função Dados de Cond. Hidráulica

Função: Condutividade X da Água x Poropressão

Curva Ajustada aos Dados: 100 %

Curvatura do Segmento: 100 %

Kx Saturada: 1,22801e-05 m/seg

Pontos de Dados: Sucção Máxima (kPa), Condutividade X da Água (m/seg)

Ponto de Dados: (0; 1,22801e-05)
Ponto de Dados: (0,01; 1,2206913e-05)
Ponto de Dados: (0,018329807; 1,2155634e-05)
Ponto de Dados: (0,033598183; 1,206829e-05)
Ponto de Dados: (0,061584821; 1,1920257e-05)
Ponto de Dados: (0,11288379; 1,1669984e-05)
Ponto de Dados: (0,20691381; 1,1249118e-05)
Ponto de Dados: (0,37926902; 1,0549039e-05)
Ponto de Dados: (0,6951928; 9,4092956e-06)
Ponto de Dados: (1,274275; 7,6393043e-06)
Ponto de Dados: (2,3357215; 5,1753727e-06)
Ponto de Dados: (4,2813324; 2,4971978e-06)
Ponto de Dados: (7,8475997; 7,0412745e-07)
Ponto de Dados: (14,384499; 1,10216e-07)
Ponto de Dados: (26,366509; 1,1542849e-08)
Ponto de Dados: (48,329302; 1,0048696e-09)
Ponto de Dados: (88,586679; 8,1706471e-11)
Ponto de Dados: (162,37767; 6,4930327e-12)
Ponto de Dados: (297,63514; 5,1214605e-13)
Ponto de Dados: (545,55948; 4,0299144e-14)
Ponto de Dados: (1.000; 3,1685686e-15)

Propriedades Estimadas

Método de Estimação de Função de Condutividade Hidráulica K: Função Van Genuchten
Função TU Vol.: Van Genuchten acido (solo 1)
Kx Saturada: 1,22801e-05 m/seg
Sucção Máxima: 1.000 kPa
Sucção Mínima: 0,01 kPa
Num. Pontos: 20

Funções Teor de Umidade Vol.

Van Genuchten areia

Modelo: Função Van Genuchten
Função: Teor de Umidade Volumétrico x Poropressão
Compressibilidade: 0 /kPa
Teor de Umidade Volumétrica Saturado: 0,43
A: 14,5 kPa
N: 2,68
M: 0,62686567
Limite de Sucção.: 1000000
Porosidade: 0,43

Van Genuchten cobertura (solo 2 lateritico + cal)

Modelo: Função Van Genuchten
Função: Teor de Umidade Volumétrico x Poropressão
Compressibilidade: 0 /kPa
Teor de Umidade Volumétrica Saturado: 0,39
A: 5,9 kPa
N: 1,48
M: 0,32432432
Limite de Sucção.: 1000000
Porosidade: 0,38999975

Van Genuchten acido (solo 1)

Modelo: Função Van Genuchten
Função: Teor de Umidade Volumétrico x Poropressão
Compressibilidade: 0 /kPa
Teor de Umidade Volumétrica Saturado: 0,41
A: 7,5 kPa
N: 1,89
M: 0,47089947
Limite de Sucção.: 1000000
Porosidade: 0,40999999

Geometria

Nome: Geometria 2D

Configurações

Ver: 2D
Espessura do Elemento: 1 m

Pontos

	X	Y
Ponto 1	0 m	0 m
Ponto 2	0 m	0,15 m
Ponto 3	1 m	0,15 m
Ponto 4	1 m	0 m
Ponto 5	0 m	0,2 m
Ponto 6	1 m	0,2 m
Ponto 7	0 m	0,25 m
Ponto 8	1 m	0,25 m
Ponto 9	0 m	0,4 m
Ponto 10	1 m	0,4 m

Linhas

	Ponto de Início	Ponto de Término	Comprimento	Ângulo	Contorno Hidráulico
Linha 1	1	2	0,15 m	90 °	
Linha 2	2	3	1 m	0 °	
Linha 3	3	4	0,15 m	90 °	
Linha 4	4	1	1 m	0 °	Drainage
Linha 5	2	5	0,05 m	90 °	
Linha 6	5	6	1 m	0 °	
Linha 7	6	3	0,05 m	90 °	
Linha 8	5	7	0,05 m	90 °	
Linha 9	7	8	1 m	0 °	
Linha 10	8	6	0,05 m	90 °	
Linha 11	7	9	0,15 m	90 °	
Linha 12	9	10	1 m	0 °	terra-clima
Linha 13	10	8	0,15 m	90 °	

Regiões

	Material	Pontos	Área
Região 1	Areia grossa	1;2;3;4	0,15 m²
Região 2	Solo Ácido	2;5;6;3	0,05 m²
Região 3	Cobertura	5;7;8;6	0,05 m²
Região 4	Areia grossa	7;9;10;8	0,15 m²

Propriedades da Malha

Tamanho Global do Elemento: 0,01 m