

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KEMMYLLE SANNY DE MATOS FERREIRA

**ANÁLISE HIDROMECÂNICA DE UM TALUDE RODOVIÁRIO COMPOSTO POR
SOLO RESIDUAL NO TRECHO DE SERRA DO MAR DA BR-376/PR**

CURITIBA

2017

KEMMYLLE SANNY DE MATOS FERREIRA

**ANÁLISE HIDROMECÂNICA DE UM TALUDE RODOVIÁRIO COMPOSTO POR
SOLO RESIDUAL NO TRECHO DE SERRA DO MAR DA BR-376/PR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil pelo Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Roberta Bomfim Boszczowski

Coorientador: Prof^º. Dr. Vitor Pereira Faro

CURITIBA

2017

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof^a. Dra. Roberta Bomfim Boszczowski e ao meu coorientador, Prof^o. Dr. Vitor Pereira Faro, por todo apoio técnico e conceitual.

À doutoranda Liamara Paglia Sestrem pelo apoio ao longo do desenvolvimento dessa pesquisa em conjunto com a realização das atividades no grupo de pesquisa do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil.

Ao doutor Andres Gonzalez Acevedo, por toda a pesquisa desenvolvida nos anos que antecedem este trabalho. Mais especialmente, pela dedicação no repasse do conhecimento adquirido.

À mestranda Milena Arruda Silva, não apenas pela elaboração dos Apêndices 1 e 2 deste trabalho, como por todo apoio emocional e intelectual.

Aos amigos e colegas de trabalho da sala 28, em especial, Ana Paula Mikos, Jordana Furman, Marina Trevizolli e Thiago Ribeiro, pelo auxílio intelectual que possibilitou a elevação do nível técnico desse trabalho.

Aos integrantes do Grupo de Estudos em Geotecnia (GEGEO-UFPR), que me inspiram e fazem parte da beleza e do potencial transformador da área de Geotecnia na sociedade.

Aos amigos, Ana Paula Barbosa, Arielly Barbosa, Bruna Buher, Ian Kawanami, Jullian de Oliveira, Patrícia Megumi, Roberto Hino, Rodrigo Chin e Thomas Verderesi, que tiveram papel fundamental ao longo da minha graduação, consequentemente permitindo sua finalização com o presente trabalho.

À minha família, Vera Lúcia, Humblay Souza, Sattylla Sanny, Adolpho Ferreira e Rafael Arnoni, pelo apoio em todos os âmbitos ao longo da minha vida, em especial durante os anos de graduação.

*“Quem bebeu água da fonte não vai se perder
Quem cruzou aquela ponte não vai se esquecer
O que eu sou, eu sou em par
Não cheguei sozinho”
Lenine – “Castanho”*

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise hidromecânica, ou seja, dos parâmetros hidráulicos e de resistência mecânica, de um talude localizado na BR-376/PR. Analisa-se o tempo de infiltração em diferentes cenários de chuva e sua influência na condição de estabilidade por meio de modelagem numérica. A estratigrafia do solo que compõe o talude foi simplificada em duas camadas homogêneas compostas por solo residual de migmatito. Os parâmetros geotécnicos utilizados foram determinados em ensaios laboratoriais pretéritos de caracterização e resistência, além do ensaio de permeabilidade *in situ*. Ensaio especiais como perda ao fogo, papel filtro, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrômetro de energia dispersiva (EDS) foram realizados para melhor caracterização da amostra que representa a camada mais superficial da encosta. A curva de retenção do solo apresentou característica trimodal, com definição matemática sugerida neste estudo. O MEV, apesar de pouco conclusivo, indicou a diversidade de tamanhos de poros presentes no solo. O ensaio de perda ao fogo apontou ainda que a amostra é pouco intemperizada, com perda de massa de 0,40%. Os principais compostos químicos encontrados no ensaio de EDS, silício, alumínio e ferro, são provenientes dos minerais biotita e caulinita que compõem o solo analisado. Conclui-se, com base nos resultados das análises hidromecânicas que a infiltração de uma chuva intensa (145 mm/dia) e de pouca duração alcança 3 a 5 metros de profundidade, sem saturação completa do primeiro metro de solo. Para condições iniciais de chuva moderada (20 mm/dia por 3 dias) ou forte (50 mm/dia por 3 dias) antecedentes à chuva intensa, a infiltração foi superior a 5 metros e a saturação do primeiro metro de solo ocorreu no quinto e terceiro dias, respectivamente. Por fim, o cenário pluviométrico menos intenso ocasionou instabilidade na parte inferior do talude devido à inclinação e proximidade freática, resultando em uma redução de sucção mais acentuada no local. Por meio da retroanálise, a redução do ângulo de atrito necessária neste caso foi de 47%. Nos outros dois cenários, a instabilidade ocorreu primeiramente na parte superior e a redução do ângulo de atrito necessária foi de 15%.

Palavras-chave: Talude rodoviário, Análise de fluxo, Estabilidade.

ABSTRACT

This research presents a hydromechanics analysis, in other words, an analysis of hydraulics and mechanical resistance parameters of a slope located in the highway known as BR-376/PR. The analysis consists of estimating infiltration time in different scenarios of rainfall and its influence on stability condition throughout numerical modelling. The stratigraphy of slope's soil was simplified by only two homogeneous layers composed by residual migmatite type of soil. The geotechnical parameters used were defined in past laboratorial tests of characterization and resistance, in addition to permeability test *in situ*. Special tests such as fire loss, paper filter, scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) were performed in order to obtain a better characterization of the sample which represents the superficial layer of the highway slope. The retention curve of the soil showed a trimodal characteristic and its math definition is suggested in this study. The SEM test, although inconclusive, indicated a number of porous sizes in the soil sample. The fire loss test indicated that the soil shows low levels of weathering, with a fire loss of only 0.40%. The main chemical components found through EDS test were silicon, aluminous and iron, which are all from of the minerals of the soil such as biotite and kaolinite. It can be conclude from the results of hydromechanics analysis that the infiltration during an intense (145 mm/day) and short duration rainfall reaches 3 to 5 meters of depth, with no complete saturation of the first 1-meter of soil. For initial conditions of moderate rainfall (20 mm/day for 3 days) or strong (50 mm/day for 3 days), the infiltration is superior to 5 meters and the saturation of the first 1-meter of soil occurred in the fifth and third days, respectively. The pluviometric scenario less intense leaded to instability of the lower part of the slope due to high inclination angles and proximity to the water table, which results in a more accentuated decrease of soil suction. Throughout retro-analysis, the necessary reduction of friction angle of soil was about 47%. In the other two scenarios, the instability occurred firstly in the upper part and the necessary reduction of friction angle was about 15%.

Keywords: Highway slope, Infiltration analysis, Stability.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Método das lamelas | 19 |
| Figura 2 – Lamelas para cálculo da estabilidade de talude..... | 19 |
| Figura 3 – Sequência representativa da interação solo-ar-água..... | 21 |
| Figura 4 – Representação das componentes do potencial total do solo | 22 |
| Figura 5 – Exemplo de curva de retenção (Sucção x Grau de saturação) | 23 |
| Figura 6 – Curvas de retenção de amostras exemplo..... | 24 |
| Figura 7 – Curva de retenção: processos de secagem e umedecimento..... | 25 |
| Figura 8 – Esquematisação da disposição dos poros do solo..... | 26 |
| Figura 9 – Esquematisação dos vários formatos da curva de retenção | 26 |
| Figura 10 – Fluxos de água no papel filtro: (a) sem contato (b) com contato..... | 29 |
| Figura 11 – Relação sucção x quantidade de água no solo..... | 32 |
| Figura 12 – Ensaios laboratoriais de permeabilidade..... | 33 |
| Figura 13 – Exemplo da curva de condutividade hidráulica para uma areia fina siltosa baseada no método de Gardner (1958a) | 35 |
| Figura 14 – Componentes do infiltrômetro minidisco | 36 |
| Figura 15 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb para solos saturados..... | 37 |
| Figura 16 – Representação tridimensional da resistência de solos não saturados ... | 39 |
| Figura 17 – Série pluviométrica do pluviógrafo P2 | 42 |
| Figura 18 – Série pluviométrica completa do pluviógrafo P2 de 01/03/2014 a 01/06/2017 | 43 |
| Figura 19 – Precipitação mensal acumulada do pluviógrafo P2..... | 44 |
| Figura 20 – Talude em planta com os respectivos medidores de nível d'água | 46 |
| Figura 21 – Seções de corte AB e CD ao longo do talude em estudo | 46 |
| Figura 22 – Perfil topográfico do talude (km 667+120 m) – medidas em metros | 47 |
| Figura 23 – Curvas granulométricas das amostras AI-13A e AI-07..... | 48 |
| Figura 24 – Moldagem e preparação da amostra para os ensaios EDS/MEV | 53 |
| Figura 25 – Amostras preparadas para ensaio de MEV..... | 54 |
| Figura 26 – Equipamento para realizado dos ensaios de MEV e EDS | 54 |
| Figura 27 – Materiais utilizados no ensaio de sucção | 56 |
| Figura 28 – Procedimento para preparação da amostra no ensaio de papel filtro | 57 |
| Figura 29 – Distribuição crescente das umidades volumétricas das amostras | 58 |
| Figura 30 – Umidades gravimétricas dos papéis filtros superiores e inferiores..... | 59 |
| Figura 31 – Sequência executiva do processo de modelagem numérica | 60 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32 – Perda de massa resultante do ensaio de perda ao fogo | 62 |
| Figura 33 – Amostras ao longo do ensaio de perda ao fogo. (a) antes da queima (b) imediatamente após a queima (c) após resfriamento. | 63 |
| Figura 34 – Microscópica eletrônica com aumentos de 90 e 1000 vezes, respectivamente | 65 |
| Figura 35 – Microscópica eletrônica com aumentos de 3000 e 10000 vezes, respectivamente | 66 |
| Figura 36 – Composição da crosta terrestre | 67 |
| Figura 37 – Estrutura bandada da rocha migmatito | 68 |
| Figura 38 – Resultado do EDS para o Spectrum 1 da amostra AI-13A..... | 69 |
| Figura 39 – Resultado do EDS para o Spectrum 3 da amostra AI-13A..... | 70 |
| Figura 40 – Resultado do EDS para o Spectrum 8 da amostra AI-13A..... | 71 |
| Figura 41 – Estrutura indeformada do solo em macroescala | 72 |
| Figura 42 – Curva de retenção em função da umidade volumétrica | 73 |
| Figura 43 – Curva de retenção contendo definições | 75 |
| Figura 44 – Correlação entre grau de saturação e umidade volumétrica e índice de vazios | 76 |
| Figura 45 – Cenários de precipitação considerados na análise numérica | 78 |
| Figura 46 – Seções para análise da variação da poropressão..... | 79 |
| Figura 47 – Poropressões nas seções S1 e S2 relativas aos CENÁRIOS 1, 2 e 3...81 | |
| Figura 48 – Poropressões nas seções S3 e S4 relativas aos CENÁRIOS 1, 2 e 3...82 | |
| Figura 49 – Poropressões na seção S5 relativas aos CENÁRIOS 1, 2 e 3.....83 | |
| Figura 50 – Variação do fator de segurança com os diversos ângulos de atrito relativos à primeira camada do talude..... | 86 |
| Figura 51 – Superfícies de ruptura no 6º dia para ângulo de atrito pico (a) e ângulo de atrito mínimo (b) no CENÁRIO 1 | 88 |
| Figura 52 – Superfícies de ruptura no 6º dia para ângulo de atrito pico (a) e ângulo de atrito mínimo (b) no CENÁRIO 2 | 89 |
| Figura 53 – Superfícies de ruptura no 6º dia para ângulo de atrito pico (a) e ângulo de atrito mínimo (b) no CENÁRIO 3 | 90 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Composição do solo residual em função da rocha sã | 14 |
| Tabela 2 – Classificação dos movimentos de massa | 16 |
| Tabela 3 – Ilustração dos movimentos de massa | 17 |
| Tabela 4 – Distribuição granulométrica de amostras exemplo | 24 |
| Tabela 5 – Equações empíricas para ajuste da curva de retenção do solo | 27 |
| Tabela 6 – Métodos de medida de sucção | 28 |
| Tabela 7 – Curvas de calibração propostas para o papel filtro Whatman 42 | 30 |
| Tabela 8 – Relações empíricas para definição do coeficiente de permeabilidade | 34 |
| Tabela 9 – Coeficientes de correlação de Pearson entre os pluviógrafos P2, P3 e P4 | 43 |
| Tabela 10 – Ensaio realizados nas amostras indeformadas para caracterização do talude | 45 |
| Tabela 11 – Resultados e correlações entre os limites de Atterberg | 49 |
| Tabela 12 – Massa específica das amostras | 50 |
| Tabela 13 – Permeabilidade saturada das amostras | 50 |
| Tabela 14 – Valores médios de interceptos coesivos e ângulos de atrito | 51 |
| Tabela 15 – Recomendações de temperatura do ensaio de perda ao fogo a depender da composição mineralógica do solo | 52 |
| Tabela 16 – Pressões de entrada de ar e teores de umidade residual para cada tipo de poro | 75 |
| Tabela 17 – Cenários de precipitação considerados na análise numérica..... | 77 |
| Tabela 18 – Análises estatísticas dos dados apresentados em literatura | 84 |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 12 |
| 1.2 | OBJETIVOS..... | 12 |
| 1.3 | JUSTIFICATIVA..... | 12 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 14 |
| 2.1 | SOLOS RESIDUAIS..... | 14 |
| 2.2 | ESTABILIDADE DE TALUDES NATURAIS..... | 15 |
| 2.2.1 | TIPOS DE MOVIMENTO DE MASSA..... | 16 |
| 2.2.2 | CÁLCULO DA ESTABILIDADE..... | 17 |
| 2.3 | SOLOS NÃO SATURADOS..... | 20 |
| 2.3.1 | ENERGIA POTENCIAL TOTAL..... | 21 |
| 2.3.2 | CURVA DE RETENÇÃO..... | 22 |
| 2.3.3 | MEDIÇÃO DA SUCÇÃO..... | 27 |
| 2.3.3.1 | ENSAIO DE LABORATÓRIO – PAPEL FILTRO..... | 29 |
| 2.3.3.2 | ENSAIO DE CAMPO – TENSÍMETRO..... | 31 |
| 2.3.4 | CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA..... | 32 |
| 2.3.4.1 | ENSAIO DE CAMPO – INFILTRÔMETRO MINIDISCO..... | 35 |
| 2.3.5 | RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO..... | 36 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 40 |
| 3.1 | ÁREA DE ESTUDO..... | 40 |
| 3.1.1 | CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA..... | 40 |
| 3.1.2 | CARACTERIZAÇÃO HIDROGRÁFICA..... | 41 |
| 3.1.3 | CARACTERIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA..... | 41 |
| 3.2 | TALUDE RODOVIÁRIO EM ESTUDO..... | 44 |
| 3.2.1 | DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA..... | 45 |
| 3.2.2 | ENSAIOS PRETÉRITOS..... | 47 |

| | | |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.2.1 | GRANULOMETRIA..... | 47 |
| 3.2.2.2 | LIMITES DE ATTERBERG | 49 |
| 3.2.2.3 | MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS | 50 |
| 3.2.2.4 | ENSAIO DE PERMEABILIDADE <i>IN SITU</i> | 50 |
| 3.2.2.5 | ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA..... | 50 |
| 3.2.3 | ENSAIOS COMPLEMENTARES..... | 51 |
| 3.2.3.1 | ENSAIO DE PERDA AO FOGO..... | 51 |
| 3.2.3.2 | MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTRÔMETRO DE ENERGIA DISPERSIVA (MEV/EDS) | 52 |
| 3.2.3.3 | ENSAIO PAPEL FILTRO | 55 |
| 3.2.4 | DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO..... | 58 |
| 3.3 | ANÁLISE NUMÉRICA | 59 |
| 4 | RESULTADOS..... | 62 |
| 4.1 | ENSAIO DE PERDA AO FOGO..... | 62 |
| 4.2 | ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DO SOLO (MEV/EDS)..... | 63 |
| 4.3 | CURVA DE RETENÇÃO..... | 73 |
| 4.4 | ANÁLISE HIDROMECÂNICA..... | 76 |
| 4.4.1 | ANÁLISE DE FLUXO | 78 |
| 4.4.2 | ANÁLISE DE ESTABILIDADE | 84 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 91 |
| 6 | SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS | 93 |
| | APÊNDICE 1 – MAPA GEOLÓGICO | 94 |
| | APÊNDICE 2 – MAPA HIDROGRÁFICO | 95 |
| | APÊNDICE 3 – POROPRESSÕES: CENÁRIOS 1, 2 E 3..... | 96 |
| | APÊNDICE 4 – FATORES DE SEGURANÇA..... | 99 |
| | REFERÊNCIAS..... | 100 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A presente pesquisa utiliza dados provenientes de instrumentos instalados ao longo da BR-376/PR sentido Paraná – Santa Catarina e faz parte de um projeto de pesquisa estabelecido entre a Universidade Federal do Paraná e a concessionária Autopista Litoral Sul.

O estudo desenvolvido neste trabalho pretende contribuir para o entendimento do comportamento de solos não saturados quando submetidos à infiltração de águas pluviais, considerando alguns parâmetros como intensidade da chuva, tempo de infiltração, permeabilidade e condutividade hidráulica, relacionando-os com a resistência ao cisalhamento e aos fatores de segurança para análise da estabilidade dos taludes rodoviários.

1.2 OBJETIVOS

Dentre os objetivos deste trabalho, destacam-se:

1. Compreender o processo de infiltração em solos não saturados:
 - Determinar tempos de formação da frente de umedecimento;
 - Correlacionar sucção com níveis pluviométricos.
2. Analisar a estabilidade de taludes naturais:
 - Estabelecer uma correlação paramétrica entre saturação do solo, fatores de segurança e parâmetros de resistência.

1.3 JUSTIFICATIVA

De acordo com o relatório elaborado pela Confederação Nacional de Transporte – CNT (2016) sobre a infraestrutura rodoviária brasileira, o Brasil possui uma malha rodoviária total de, aproximadamente, 1.720.000 km, dentre rodovias pavimentadas, não pavimentadas e planejadas para serem construídas. Aponta-se também um crescimento médio de 1,5% ao ano na extensão das rodovias federais pavimentadas.

O transporte rodoviário é o maior responsável pelos transportes de cargas e de pessoas, com um total de 61,8% e 96,2%, respectivamente. A rede rodoviária é elemento fundamental nas cadeias produtivas, pois une mercados promovendo a integração de regiões e estados (CNT, 2006).

Na região sul do Brasil são contabilizados 13.000 km apenas em rodovias federais pavimentadas (CNT, 2016). O traçado geométrico da maior parte dessas rodovias obedece a premissas estabelecidas com o objetivo de redução de custo com mobilização de terra e transporte de material.

Como detalhado por Pontes Filho (1998), algumas dessas premissas são: desenvolver o traçado ao longo de talvegues (linha sinuosa por onde correm as águas ao fundo do vale) ou acompanhando as curvas de nível para reduzir a quantidade de material escavado, atentando para declividades máximas que o eixo da rodovia pode alcançar. Dessa forma, justifica-se a existência de taludes naturais ao longo de quase a totalidade das rodovias.

Dado o presente panorama, a pesquisa aqui desenvolvida é justificada no sentido de reduzir riscos econômicos, sociais e ambientais associados aos processos de movimentos de massa. Ressalta-se ainda a importância da instrumentação e do contínuo monitoramento das rodovias dada a sua importância socioeconômica para o desenvolvimento do país.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS RESIDUAIS

Os taludes naturais são formados por solos residuais ou coluvionares, além da rocha sã na camada mais profunda. Ambos os tipos são formados por intemperismo físico-químico da rocha sã. Segundo Lacerda e Sandroni (1985), os solos coluvionares são mais heterogêneos por sofrerem transporte do seu local de origem devido à ação da gravidade, dessa forma, eles são encontrados nos sopés ou a pequenas distâncias de taludes mais íngremes. Já os solos residuais permanecem sempre sobrejacentes à rocha que lhe deu origem, como destacado por Gerscovich (2012).

De acordo com Moncada (2008), os principais fatores que determinam a formação dos solos residuais são clima e rocha matriz. O clima define a espessura e quantidade de horizontes, enquanto a rocha matriz resulta na composição mineralógica específica do solo.

A Tabela 1 apresenta a composição predominante do solo residual a depender da rocha sã a qual lhe deu origem.

Tabela 1 – Composição do solo residual em função da rocha sã

| ROCHA SÃ | TIPO DE SOLO |
|-----------|-------------------------|
| Basalto | Argiloso |
| Granito | Arenoargiloso (micáceo) |
| Calcário | Argiloso |
| Quartzito | Arenoso |
| Filito | Argiloso |
| Gnaisse | Siltoso e micáceo |

Fonte: Gerscovich (2012)

Ainda segundo Moncada (2008), a parte superficial dos solos, independente do histórico geológico envolvido, sofre com processos pedogenéticos tais como eluviação e iluviação, perda e ganho de material, respectivamente; lixiviação, remoção dos sais solúveis; podzolização e laterização, os quais geram concentração

de sílica e ferro. O principal agente desses processos é a movimentação de água no solo por meio da infiltração e evaporação de águas pluviais.

Diversos estudos foram realizados a fim de se estabelecer os horizontes mais comuns aos solos residuais. Em um dos estudos mais precursores desenvolvido por Vargas (1953) e descrito por Moncada (2008), existem três classificações genéticas dos solos tropicais brasileiros: solo residual maduro, argiloso e poroso; solo residual jovem, silto-arenoso; e rocha alterada. Dentre as diferenças entre solo residual maduro e jovem, destaca-se que o primeiro possui características mais homogêneas e ausência da estrutura da rocha mãe além de ser constituído geralmente por argilominerais e quartzo, enquanto o solo residual jovem ainda encontra-se em processo de intemperização, é bastante heterogêneo e preserva estruturas da rocha como xistosidade, estratificação e fraturas.

2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES NATURAIS

Os taludes naturais, encontrados ao longo das rodovias, diferenciam-se daqueles construídos pela ação humana e merecem devida atenção justamente por possuírem alturas e inclinações por vezes inadequadas para garantir sua total estabilidade. Além disso, as propriedades geotécnicas não são previamente conhecidas e extremamente variáveis ao longo da rodovia. Dessa forma, o cálculo de estabilidade envolve maiores incertezas que exigem intensa instrumentação.

Alguns dos principais fatores que influenciam na condição de estabilidade de taludes naturais são: infiltração de água no solo, inclinação do talude e intervenções humanas. A infiltração pode ocorrer superficialmente pela ação da chuva ou falhas nos sistemas de drenagem ou em profundidade pelo fluxo através de fraturas no embasamento rochoso (GERSCOVICH, 2012).

A forma como o relevo está disposto auxilia no entendimento do comportamento da água ao longo do talude. Ainda segundo Gerscovich (2012), a superfície do talude pode ser plana ou curvilínea (côncava ou convexa). No caso da base do talude ser mais encurtada, a encosta se torna “coletora” da água superficial. Se a base for mais alargada, a água superficial tenderá a ser majoritariamente dispersada.

2.2.1 TIPOS DE MOVIMENTO DE MASSA

A classificação do movimento de massa permite definir níveis de interferência na segurança da rodovia e correlacioná-los de maneira mais coerente com os seus respectivos fatores deflagradores como: índice pluviométrico, declividade, tipo de solo, entre outros. Varnes (1978) sintetizou os principais tipos de movimentos de massa, apresentados na Tabela 2, considerando também os tipos de materiais que podem se desprender do maciço.

Tabela 2 – Classificação dos movimentos de massa

| TIPO DE MOVIMENTO | | TIPO DE MATERIAL | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| | | ROCHA | SOLO (ENGENHARIA) | | |
| | | | GROSSEIRO | FINO | |
| Quedas | | De rocha | De detritos | De terra | |
| Tombamentos | | De rocha | De detritos | De terra | |
| Escorregamento | Rotacional | Poucas unidades | Abatimento de rocha | Abatimento de detritos | Abatimento de terra |
| | Translacional | Muitas unidades | De blocos de rocha; De rocha | De blocos de detritos; De detritos | De blocos de terra; De terra |
| Expansões laterais | | De rocha | De detritos | De terra | |
| Corridas/escoamentos | | De rocha (rastejo profundo) | De detritos | De terra | |
| Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimento | | | Rastejo de solo | | |

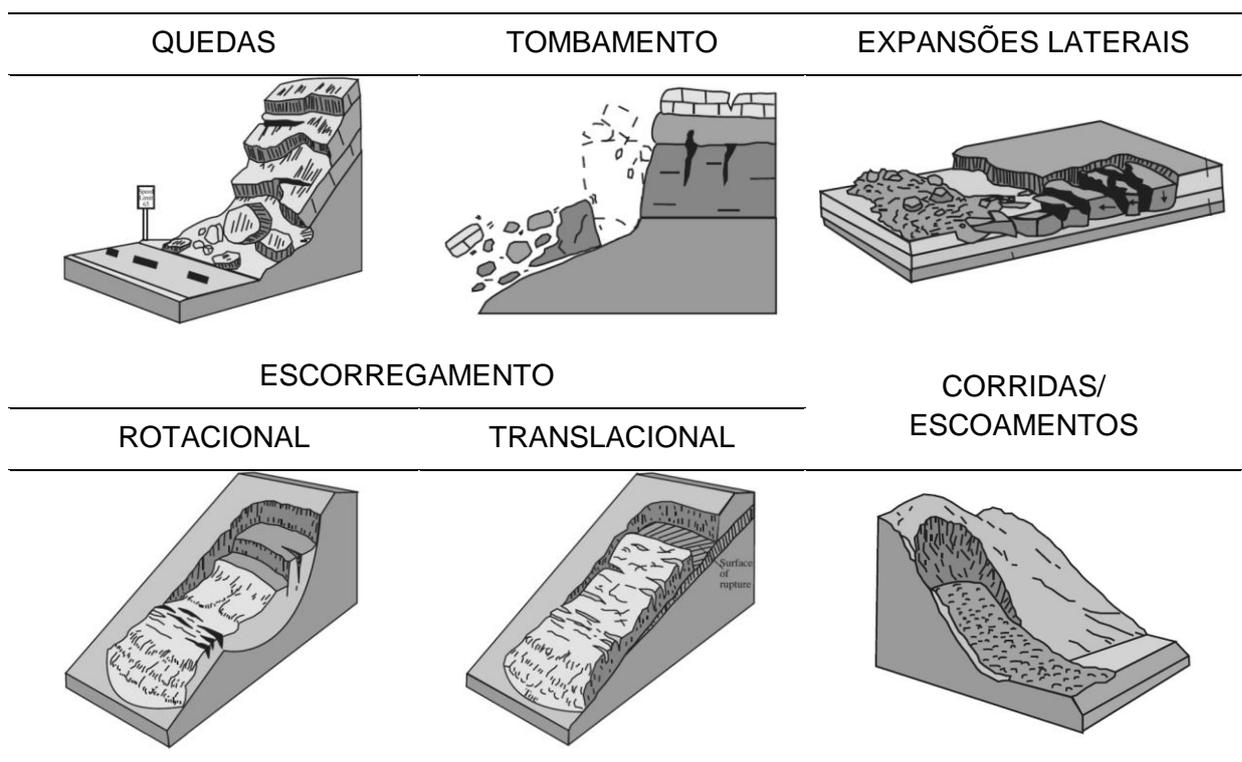
Fonte: Varnes (1978)

Estes movimentos de massa estão ilustrados na Tabela 3. Varnes (1978) ainda os descreve da seguinte maneira:

- Quedas: movimentos abruptos que ocorrem pelo desprendimento de rocha ou solo. A separação ocorre ao longo de discontinuidades como fraturas, juntas e planos de acomodação e o movimento é influenciado majoritariamente pela gravidade, variações climáticas e presença de água intersticial;
- Tombamento: rotação frontal de uma unidade ou mais de rocha ou solo em torno de seu ponto mais baixo. Também ocorre devido à gravidade ou às forças exercidas pelas unidades adjacentes;

- Escorregamento: apesar de o termo ser usado para referenciar movimentos de massa em geral, o escorregamento caracteriza-se pela presença de uma zona mais fraca a qual separa o material deslizado do material mais estável que está abaixo dele. A principal diferença entre o escorregamento rotacional e translacional é a forma da superfície de ruptura, a qual se mostra mais curvada e profunda no escorregamento rotacional;
- Expansões laterais: ocorrem normalmente em taludes levemente inclinados ou terrenos planos. O movimento é acompanhado de fraturas por tensões de cisalhamento. Uma das principais causas é o processo de liquefação do solo, no qual o solo coesivo muda da fase sólida para líquida;
- Corridas/escoamentos: também ocorre devido ao processo de liquefação, com a perda de resistência devido ao aumento de poropressão. Além disso, conta com a gravidade e inclinação do terreno para que ocorra, normalmente, com alta velocidade.

Tabela 3 – Ilustração dos movimentos de massa



Fonte: Adaptado de Varnes (1978)

2.2.2 CÁLCULO DA ESTABILIDADE

Em geral, a instabilidade dos taludes, naturais ou não, está associada a duas ações: aumento da sollicitação ou redução da resistência ao cisalhamento. No primeiro caso, alguns fatores determinantes são sobrecarga, sollicitações dinâmicas

e pressões laterais. Já a redução da resistência está associada às características geomecânicas do material que compõe o talude, intemperismo e variação de poropressão (VARNES, 1978).

Para o cálculo da estabilidade de taludes, podem-se utilizar métodos chamados “tradicionais” que consistem na determinação do fator de segurança baseado na análise do equilíbrio limite. O fator de segurança é definido pela razão entre a resistência média ao cisalhamento e a tensão média de cisalhamento a qual o solo está submetido ao longo da superfície de ruptura.

Pelo conceito apresentado no estudo da Mecânica dos Solos, a resistência ao cisalhamento do solo está associada às forças coesivas e de atrito das partículas e, no caso de solos não saturados, também ao nível de sucção. Essas variáveis são representadas matematicamente por meio da Equação 1:

$$\tau = c' + (\sigma_n - \mu_a) \tan \phi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^b \quad \text{Equação 1}$$

A Equação 1 pode ser reduzida uma vez que se considera que a pressão do ar é a atmosférica, dessa forma, utiliza-se a Equação 2.

$$\tau = c' + \sigma_n \tan \phi' + (-\mu_w) \tan \phi^b \quad \text{Equação 2}$$

Onde: τ : tensão de cisalhamento resistente do solo [kPa];

c' : coesão efetiva do solo [°];

σ_n : tensão normal total [kPa];

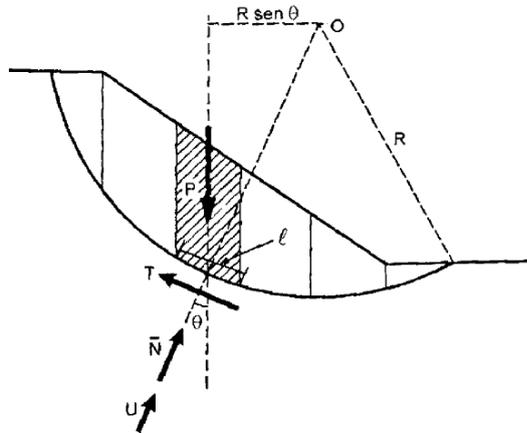
ϕ' : ângulo de atrito efetivo [°];

μ_w : poropressão da água (negativo para sucção) [kPa];

ϕ^b : ângulo de atrito (acrécimo de resistência com o aumento da sucção) [°].

Para a definição da superfície de ruptura, em geral, são detalhados os métodos de Bishop (1955) e Fellenius (1936). Ambos os métodos são consagrados em literatura, amplamente utilizados e que se baseiam no equilíbrio de momentos e forças das várias lamelas que subdividem a massa de solo mobilizada (Figura 1).

Figura 1 – Método das lamelas



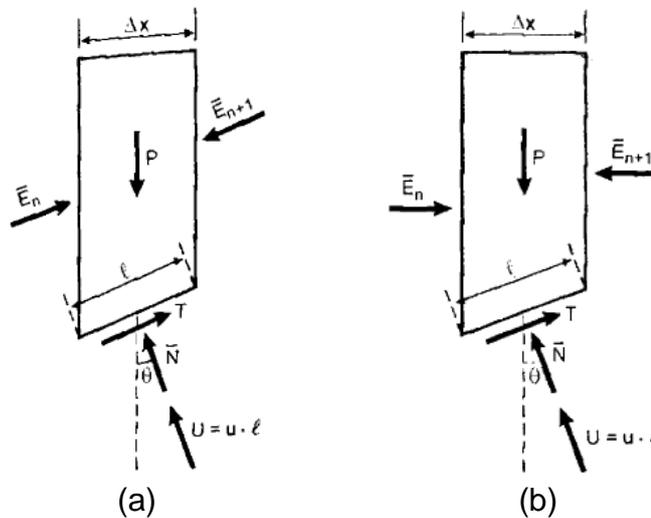
Fonte: Massad (2003)

Os métodos de Fellenius e Bishop foram desenvolvidos antes dos estudos de solos não saturados e contam com certas simplificações que visam igualar o número de incógnitas ao número de equações do sistema de equilíbrio. Dessa forma, incorrem em algumas limitações de uso, como, por exemplo, restringem-se apenas às superfícies de ruptura circulares.

A diferença fundamental entre eles é a direção da resultante das forças laterais, como pode ser observado na Figura 2. No método de Fellenius, ela é paralela à base da lamela, enquanto que no de Bishop, ela é horizontal (MASSAD, 2003).

Figura 2 – Lamelas para cálculo da estabilidade de talude

(a) Método de Fellenius (b) Método de Bishop



Fonte: Massad (2003)

Segundo Massad (2003), a formulação matemática definida pelo método de Fellenius apresenta-se como na Equação 3, assim como a do método de Bishop, na Equação 4.

$$F = \frac{\sum [c'.l + (P \cos \theta - u. \Delta x. \sec \theta) \tan \varphi']}{\sum (P \sin \theta)} \quad \text{Equação 3}$$

$$F = \frac{\sum \left[c'.l + \frac{P - u. \Delta x - c'. \Delta x. \tan \theta / F}{\cos \theta + \tan \varphi' \cdot \sin \theta / F} \cdot \tan \varphi' \right]}{\sum (P \sin \theta)} \quad \text{Equação 4}$$

Segundo Calle (2000), o método de Bishop não satisfaz o equilíbrio de forças horizontais de cada lamela e o método de Fellenius não satisfaz o equilíbrio de forças de cada lamela. Dessa forma, outros métodos de cálculo do fator de segurança foram desenvolvidos como Morgenstern & Price e Spencer, sendo o primeiro conhecido por ser bastante conservador.

Computacionalmente é possível calcular e comparar os diversos métodos. É importante notar, contudo, que a escolha do melhor método baseia-se no conhecimento da geologia *in situ* e do perfil do solo intemperizado do talude, como ressaltado por Calle (2000).

2.3 SOLOS NÃO SATURADOS

O solo é definido como uma estrutura trifásica: fase sólida, fase gasosa e fase líquida, comumente água. Essa definição contempla, mais especificamente, a condição dos solos não saturados.

Contudo, como destacado por Vilar (2004), os princípios da Mecânica dos Solos são estabelecidos para solos saturados. Dentre as hipóteses para tal fato estão os efeitos da simplificação ou ainda pelo consenso de que a condição saturada é, em diversos casos, a situação mais crítica.

Ainda segundo Vilar (2004), a condição de solo não saturado, no entanto, estará presente durante toda a vida útil de diversas obras geotécnicas. Em taludes naturais, o solo que o compõe pode ainda sofrer com as variações sazonais de temperatura, umidade e pluviometria que podem alterar sensivelmente o grau de saturação do solo.

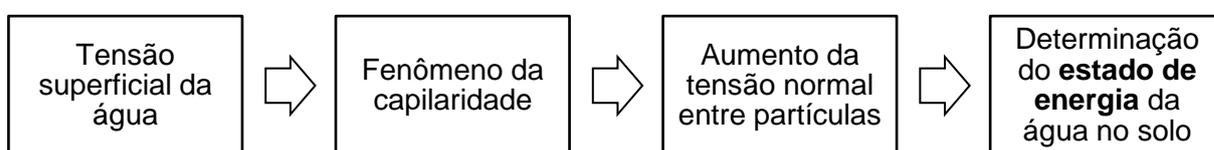
Para entender a interação entre a água e as partículas de solo utiliza-se o modelo de um tubo de pequeno diâmetro colocado em água e observa-se o

fenômeno da capilaridade. Como bem explicado por Calle (2000), a capilaridade decorre da tensão superficial que existe na interface ar-água devido ao fato de a água ser atraída de forma mais intensa que o ar para o interior da massa de água.

Para que haja o equilíbrio das solicitações, a superfície do líquido se contrai e fica tracionada. É justamente essa contração que gera um diferencial de pressão que, no caso de tubos de pequeno diâmetro, resulta na elevação capilar para o equilíbrio de forças na direção vertical. Calle (2000) ainda destaca que nas paredes do tubo surgem componentes que tendem a comprimi-las e aproximá-las de tal forma a produzir uma tensão normal, a qual é uma associação direta à tensão normal entre as partículas de solo.

Dessa forma, a Figura 3 apresenta uma sequência lógica entre os processos relacionados à interação solo-ar-água para melhor entendimento. Busca-se, como salientado por Calle (2000), a determinação do estado de energia da água no solo para melhor compreender como esta afeta nos parâmetros de caracterização, permeabilidade e resistência.

Figura 3 – Sequência representativa da interação solo-ar-água



Fonte: A autora (2017)

O “estado de energia” a ser determinado é caracterizado apenas pela energia potencial uma vez que se considera a velocidade de água no solo suficientemente reduzida a ponto de não produzir energia cinética (BAVER *et al.*, 1972 *apud* CALLE, 2000).

2.3.1 ENERGIA POTENCIAL TOTAL

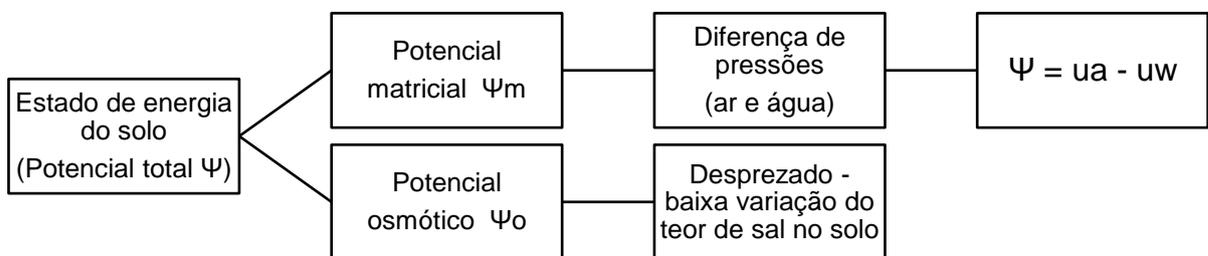
A energia potencial total ao qual um solo não saturado está submetido possui duas componentes principais: potencial matricial e osmótico. Dessa forma, o potencial total pode ser quantificado pelo conceito de sucção matricial e sucção osmótica.

A sucção matricial é a diferença entre a pressão do ar (u_a), usualmente considera-se a pressão atmosférica (P_{atm}), e a pressão de água (u_w), ou seja,

$u_a - u_w$. Já a sucção osmótica é a diferença de pressão necessária para anular o fluxo de uma solução de água pura para uma solução mais concentrada, através de uma membrana semipermeável, por osmose (MARINHO, 1997 *apud* CARDOSO Jr., 2006).

Fredlund & Rahardjo (1993) demonstram que a variação na sucção osmótica pouco interfere na sucção total. Dessa forma, é possível desconsiderar os efeitos da sucção osmótica uma vez que se garanta um controle no teor de sal do solo em análise. Portanto, a sucção total do solo estaria determinada de forma simplificada pela sucção matricial, como esquematizado na Figura 4.

Figura 4 – Representação das componentes do potencial total do solo



Fonte: A autora (2017)

Uma vez definido o comportamento teórico-prático da água no solo, é fácil concluir que a quantidade de água e a capacidade de retenção do solo afetam diretamente a pressão existente nos vazios, e, conseqüentemente, a energia a qual o solo está submetido.

Dessa forma, a caracterização hidráulica dos materiais porosos é definida pela curva de retenção a qual correlaciona a sucção do solo com a quantidade de água nele presente. Como destacado por Marinho (2005), com a curva de retenção é possível compreender fenômenos relacionados ao fluxo, à resistência e à compressibilidade de solos não saturados.

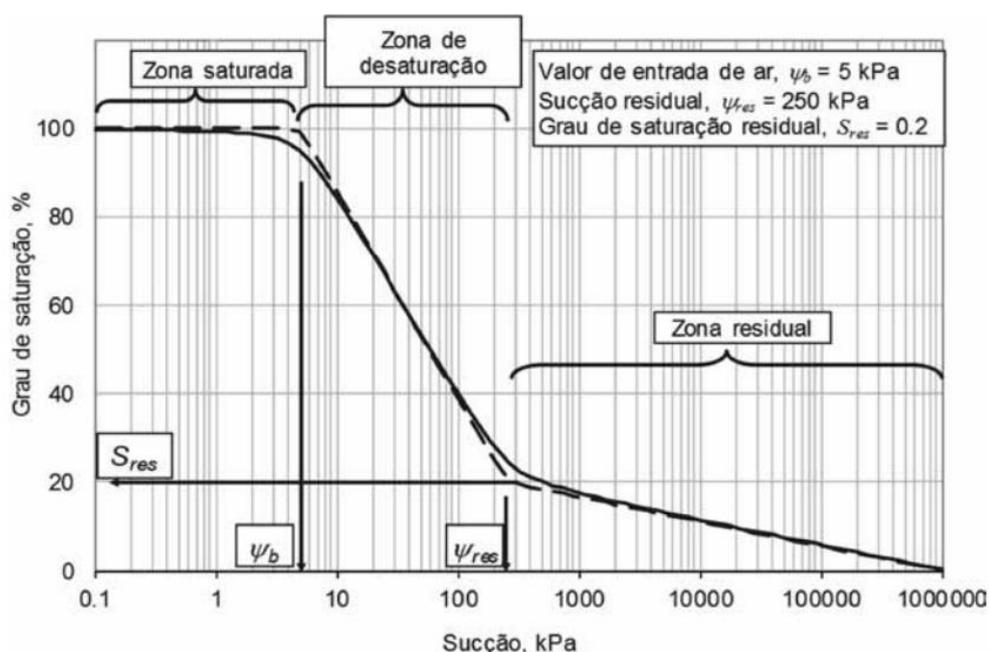
2.3.2 CURVA DE RETENÇÃO

A curva de retenção é a representação gráfica entre a sucção e a quantidade de água contida no solo, a qual é descrita pelo teor de umidade gravimétrico ou volumétrico ou grau de saturação.

A importância dessa curva se dá pelo fato de ser possível compreender o comportamento do solo com a evolução do teor de umidade através da elevação do nível d'água ou precipitação.

Como descrito por Gitirana Jr. *et al.* (2015) e apresentado na Figura 5, a curva de retenção em geral possui três trechos definidos por três parâmetros. No primeiro, denominado zona saturada, o solo apresenta-se completamente saturado até o momento em que o valor da sucção atinge o “valor de entrada de ar” (ψ_b ou ψ_{ar}), o qual se refere à máxima sucção suportada pelos maiores poros antes de serem drenados. O segundo trecho, zona de desaturação, corresponde ao intervalo de sucção onde ocorre o processo de drenagem do solo em termos de fluxo de água líquida, a qual se encontra relativamente livre nos poros do solo. Já o grau de saturação residual, associado à sucção residual, define o início do último trecho, onde a saída de água ocorre predominantemente por processos de transferência de vapor com exigência de sucções extremamente altas.

Figura 5 – Exemplo de curva de retenção (Sucção x Grau de saturação)

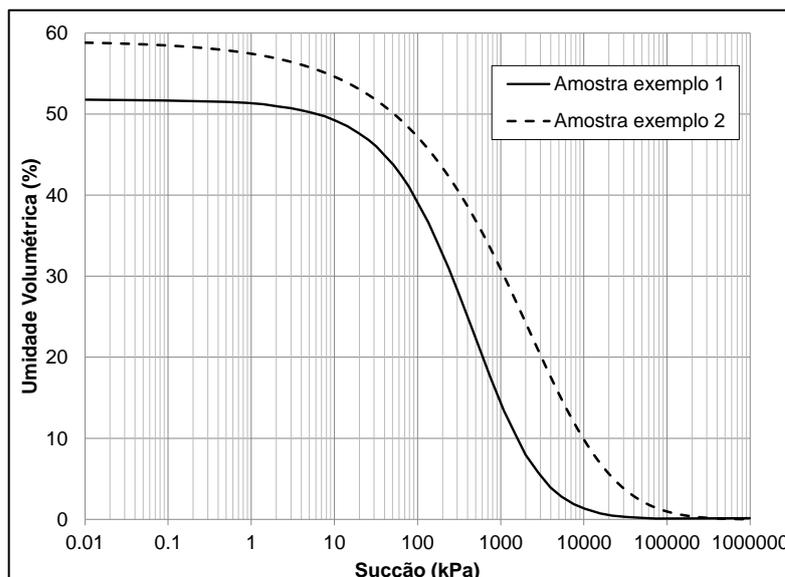


Fonte: Gitirana Jr. *et al.* (2015)

As curvas de retenção apresentam comportamentos distintos a depender da composição do solo. Os solos arenosos tendem a apresentar uma perda brusca de umidade quando a sucção ultrapassa um determinado valor, já os solos argilosos apresentam curvas mais suaves (GERSCOVICH, 2012).

A fim de visualizar melhor essa afirmação, foram selecionadas duas amostras exemplo retiradas de locais próximos a Serra do Mar do estado do Paraná. A Figura 6 apresenta as curvas de retenção das amostras e, a Tabela 4, as porcentagens de material de acordo com a classificação granulométrica (pedregulho, areia, silte e argila).

Figura 6 – Curvas de retenção de amostras exemplo



Fonte: A autora (2017)

Tabela 4 – Distribuição granulométrica de amostras exemplo

| AMOSTRA | PEDREGULHO (60 – 2,0 mm) | AREIA (2,0 - 0,06 mm) | SILTE (0,06 – 0,002 mm) | ARGILA (<0,002 mm) |
|---------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1 | 0,1 | 25,6 | 71,1 | 3,2 |
| 2 | 0,1 | 20,4 | 48,8 | 30,7 |

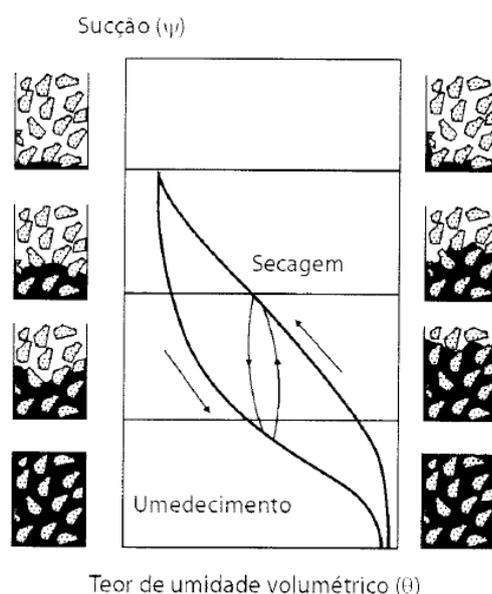
Fonte: A autora (2017)

A amostra 2, com maior porcentagem de argila quando comparada com a amostra 1, possui uma curva de retenção mais suavizada. Segundo Calle (2000), os solos argilosos, devido a melhor distribuição dos poros, conseguem reter a maior parte da água, enquanto que os solos arenosos, por terem poros maiores, a uma dada sucção matricial, muitos deles se esvaziam. Portanto, para uma mesma variação de sucção, ocorre uma variação de umidade volumétrica muito menor em solos argilosos que arenosos.

Dessa forma, Calle (2000) destaca que os principais fatores que influenciam na forma da curva de retenção são: distribuição granulométrica, a distribuição dos poros, a estrutura e a mineralogia das partículas.

Outro fator de interferência relevante na obtenção da melhor curva de retenção é o fenômeno da histerese, apresentado na Figura 7. A depender do processo de variação da umidade do solo (secagem ou umedecimento), as curvas podem apresentar certa diferença de caminhos uma vez que a relação entre sucção e teor de umidade não tem caráter unívoco.

Figura 7 – Curva de retenção: processos de secagem e umedecimento



Fonte: Gerscovich (2012)

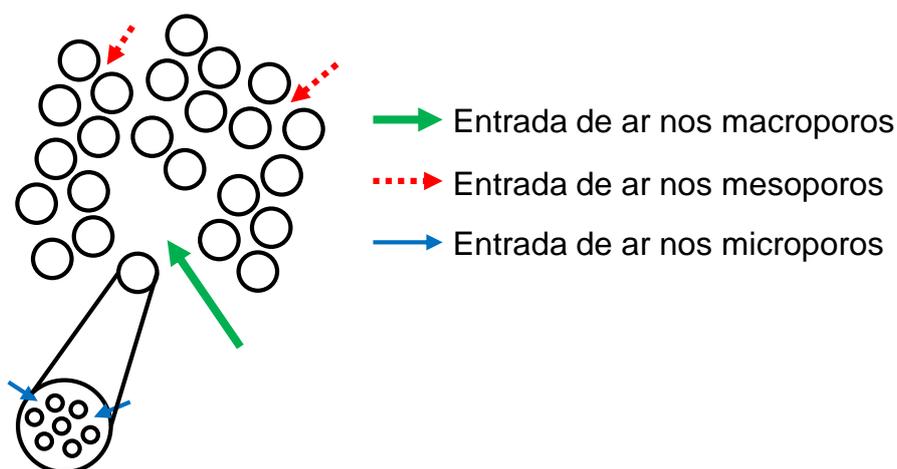
Segundo Calle (2000), a histerese ocorre devido aos seguintes fatores:

- Não conformidade dos poros: o equilíbrio do poro pode ser alcançado em posições diferentes envolvendo diferentes quantidades de água;
- Efeito do ângulo de contato: esse ângulo tende a ser maior no processo de umedecimento.
- Bolhas de ar: no processo de umedecimento pode haver captura de bolhas de ar pelos vazios do solo;
- Alteração da estrutura do solo: expansão e contração ocorridas durante os processos de secagem e umedecimento podem mudar a estrutura do solo.

Outra questão importante na determinação da curva de retenção é a correta determinação dos tamanhos e distribuição dos poros do solo. Como esquematizado

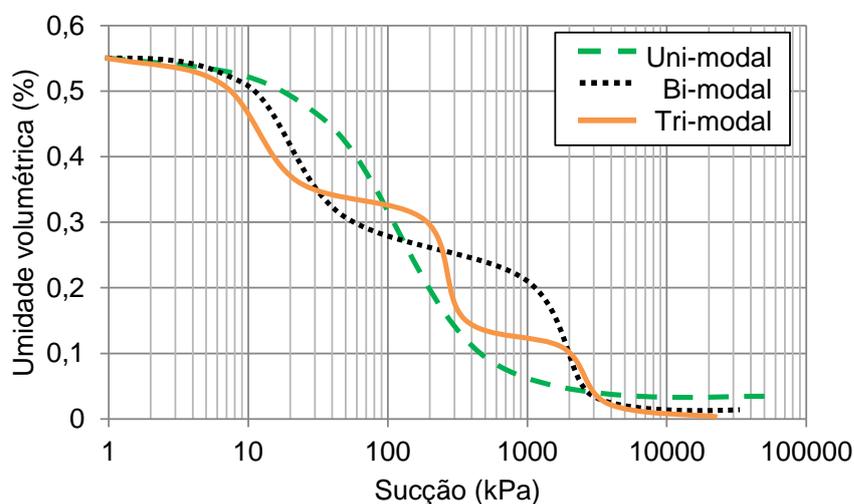
na Figura 8, a estrutura dos poros pode ser bi-modal ou tri-modal. Nesses casos, a curva de retenção possuirá outros patamares correspondentes aos tamanhos dos poros, com teores de umidade residual e pressões de entrada de ar distintas, como pode ser observado na Figura 9, de caráter meramente ilustrativo.

Figura 8 – Esquemática da disposição dos poros do solo



Fonte: A autora (2017)

Figura 9 – Esquemática dos vários formatos da curva de retenção



Fonte: A autora (2017)

Em geral, as relações matemáticas definidas na literatura, no entanto, são para curvas do tipo uni-modal, como aquelas apresentadas na Tabela 5. Dessa forma, para os outros tipos de curva, é possível encontrar diferentes equações que se ajustem aos diferentes patamares, a fim de se definir matematicamente o conjunto, como será mostrado no item 4.3 deste trabalho.

Tabela 5 – Equações empíricas para ajuste da curva de retenção do solo

| AUTORES | RELAÇÕES MATEMÁTICAS | PARÂMETROS |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BROOKS e COREY (1966) in FREDLUND & RAHARDJO (1993) | $\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_b^\lambda}{\psi} \right) + \theta_r$ | ψ -sucção matricial; ψ_b -sucção de entrada de ar; ψ_r -sucção residual; θ -umidade vol. (cm ³ /cm ³); θ_s -umid. vol. de saturação; θ_r -umid. vol. residual; λ -parâmetro de ajuste (tipo de solo) |
| VAN GENUTCHEN (1980) | $\theta = \theta_r + \frac{\theta_s + \theta_r}{(1 + \alpha \psi ^n)^m}$ $m = 1 - \frac{1}{n}$ | n, m-parâmetros de ajuste; α -parâmetro de ajuste (1/cm). |
| FREDLUND, XING e HUANG (1994) | $\theta = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{\psi_a}\right)^n\right)} \right]^m$ | e = 2,71828 10 ⁶ -valor limite de sucção matricial para qualquer solo. |

Fonte: Adaptada e modificada de Calle (2000)

2.3.3 MEDIÇÃO DA SUCÇÃO

A sucção não é uma grandeza fácil de ser obtida, dessa forma a literatura apresenta diversos métodos diretos ou indiretos, como: funil de pedra porosa, câmara de pressão, membrana de pressão, tensiômetro, papel filtro, blocos porosos e sensores de condutividade elétrica. Ainda existem muitas ressalvas e limitações devido às incertezas inerentes a cada método, como mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 – Métodos de medida de sucção

| MÉTODO | TIPO | SUCÇÃO | FAIXA DE MEDIDA (kPa) | OBSERVAÇÕES |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Funil de pedra porosa | Laboratorial | Matricial | 0 a 70 | - Para baixas sucções; - Sucção aplicada diretamente à amostra. |
| Câmara de pressão | Laboratorial | Matricial | 0 a 1500 | - Técnica de translação de eixos; - A capacidade depende da pedra porosa (pressão de entrada de ar); - Continuidade da fase ar. |
| Membrana de pressão | Laboratorial | Matricial Total | Até 10000 | - Técnica de translação de eixos; - Membrana de celulose (seletividade). |
| Tensiômetro | Laboratorial <i>in situ</i> | Matricial | 0 a 70 | - Tempos de resposta em função da condutância da pedra porosa. |
| Papel filtro | Laboratorial | Matricial Total | Todos os valores | - Necessita precisão máxima na pesagem; - A determinação da sucção depende do contato com o solo. |
| Blocos porosos | Laboratorial In situ | Matricial | 10 a 1000 | - Condutividade elétrica de materiais porosos (gesso, fibra de vidro, etc); - Histerese pronunciada, mais sensível às altas sucções; - Longo tempo de resposta; - Fácil deterioração do material. |
| Psicrômetros | Laboratorial In situ | Osmótica | 500 a 8000 | - Mais recomendada para laboratório; - Depende de rigoroso controle de temperatura, principalmente nas baixas sucções. |
| Sensores de condutividade térmica | Laboratorial | Matricial | 0 a 400 | - Cápsula cerâmica contendo sensor de temperatura e miniaquecedor; - Condutividade térmica do bloco varia com a sua umidade; - Equilíbrio solo-cápsula (bloco) > sucção matricial medida a partir da condutividade. |
| Extrator de solução do solo | Laboratorial | Osmótica | Todos os valores | - Condutividade do extrato; - Concentração dos solutos; - Extrato e psicrômetro (resolução não satisfatória). |
| Equilíbrio da fase vapor | Laboratorial | Total | Todas as faixas > 400 | - Solução com concentração e umidade relativa conhecida; - Amostra de solo em dessecador sem contato com a solução (equilíbrio demorado). |
| Princípios osmóticos | Laboratorial | Matricial | 200 a 1600 | - Membrana de celulose para diálise; - Solução com concentração conhecida e umidade relativa conhecida; - Solução de Polietileno Glicol (PEG), peso molecular 20.000; - Útil para instalar e controlar sucção em ensaios. |

Fonte: Modificado de Vilar (2000) *apud* Menezes (2010)

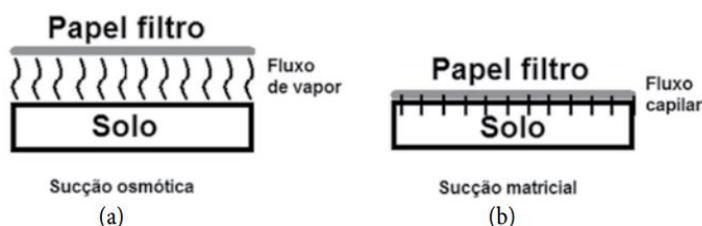
Serão detalhados neste trabalho apenas os métodos utilizados para a obtenção dos dados desse estudo, ou seja, papel filtro como ensaio de laboratório e tensiômetro como ensaio de campo.

2.3.3.1 ENSAIO DE LABORATÓRIO – PAPEL FILTRO

Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), “papel filtro” é um método indireto para medir sucção total ou matricial. Consiste em colocar um papel filtro diretamente sobre o solo e esperar que haja o equilíbrio das sucções do papel e do solo. É necessário então calibrar o volume da água no papel filtro com a sucção do solo através de curvas de calibração.

Marinho *et al.* (2015) explicam que a sucção matricial é medida quando o fluxo ocorre por capilaridade com contato direto através das partículas do solo e o papel, pois apenas tensões capilares são vencidas nesse processo. Por outro lado, a sucção total é medida se o fluxo ocorre em forma de vapor sem contato entre o solo e o material poroso, já que são vencidas as forças osmóticas e capilares, que retêm a molécula de água, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxos de água no papel filtro: (a) sem contato (b) com contato



Fonte: Marinho *et al.* (2015)

Segundo Marinho (2005), os papéis filtro mais usados são Whatman N° 42 e Schleicher & Schuell N° 589. De acordo com Chandler e Gutierrez (1986), essa técnica foi desenvolvida por Gardner (1937). Ao longo dos anos, diversos autores desenvolveram e refinaram equações de calibração para ambos os tipos de papéis. A partir desses estudos, Fredlund & Rahardjo (1993) concluíram que ocorre uma divergência relativamente maior entre as curvas de calibração para o papel tipo Schleicher & Schuell N° 589.

Outra questão relevante sobre o ensaio é a divergência entre a condição inicial do papel filtro. Marinho (2005) aponta que apesar de a norma americana ASTM-D5298-10 sugerir que o papel filtro deva ser seco em estufa por, no mínimo, 16 horas antes do uso, esse procedimento pode alterar a curva de calibração. Dessa

forma, o papel filtro deve ser usado diretamente uma vez retirado da caixa, ou seja, seco ao ar.

Para o papel filtro Whatman Nº 42, Marinho (2005) indica que a umidade inicial no estado seco ao ar é de aproximadamente 6%, a qual permite medições de sucção de zero até 29 MPa, considerando a formulação proposta por Chandler *et al.* (1992). Esta é a máxima sucção matricial que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do solo.

A Tabela 7 apresenta as curvas de calibração recomendadas pela norma americana ASTM-D5298-10, onde o ponto de inflexão da curva corresponde a valores intermediários de umidade gravimétrica do papel filtro (W). Esses, no entanto, são apenas alguns exemplos das metodologias presentes na literatura.

Tabela 7 – Curvas de calibração propostas para o papel filtro Whatman 42

| REFERÊNCIA | TIPO | SUCÇÃO (kPa) | OBSERVAÇÃO |
|-----------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------------------------|
| ASTM D5298 | Total | $\psi = 10^{5,327-0,0779w}$ | $W \leq 45,3\%$ |
| | Matricial | $\psi = 10^{2,412-0,0135w}$ | $W > 45,3\%$ |
| Chandler & Gutierrez (1986) | Matricial | $\psi = 10^{2,85-0,0622w}$ | $80 \leq \psi \leq 6000 \text{ kPa}$ |
| Chandler et al. (1992) | Matricial | $\psi = 10^{4,842-0,0622w}$ | $W \leq 47\%$ |
| | | $\psi = 10^{6,050-2,48\log w}$ | $W > 47\%$ |
| Oliveira & Marinho (2006) | Matricial | $\psi = 10^{4,83-0,0839w}$ | $W \leq 33\%$ |
| | Total | $\psi = 10^{2,57-0,0154w}$ | $W > 33\%$ |

Fonte: Adaptado de ASTM-D5298-10

Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), as curvas de calibração são bilineares tomadas a partir de um gráfico de dispersão onde o eixo das ordenadas é o teor de umidade gravimétrica e o das abscissas é a sucção do solo em escala logarítmica. A transição entre as porções úmida e seca da curva de calibração ocorre quando o teor de água no papel filtro Whatman 42 é próximo àquele apresentado na coluna “Observação” da Tabela 7.

Estudos mais recentes visam correlacionar as diversas curvas de calibração propostas a fim de minimizar a divergência entre os valores de sucção obtidos por cada uma delas. Um estudo brasileiro realizado por Bicalho *et al.* (2008) buscou

correlacionar sete curvas de calibração (Fawcett & Collis-George (1967), Hamblin (1981), Chandler & Gutierrez (1986), Chandler *et al.* (1992), Leong *et al.* (2002) e ASTM D5298-03) através de análises lineares e não lineares, para solo arenoso siltoso compactado. O melhor resultado obtido foi o ajuste de uma curva por análise não linear considerando apenas as curvas propostas por Chandler *et al.* (1992), Leong *et al.* (2002) e pela norma americana ASTM D5298-03.

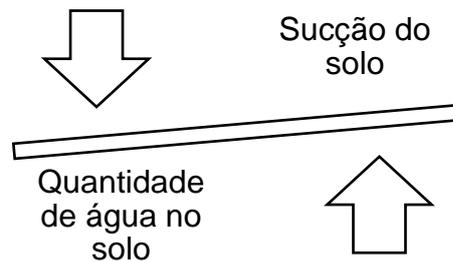
Alguns pontos importantes durante a realização do ensaio é observar um tempo mínimo de equilíbrio de uma semana (Fredlund e Rahardjo, 1993), além de garantir que o papel filtro seja retirado do local de equilíbrio sem perda significativa de umidade (entre 3 a 5 segundos). Por fim, deve-se manusear o papel com muito cuidado e pesar em balança de precisão da ordem de 0,001 g.

2.3.3.2 ENSAIO DE CAMPO – TENSIÔMETRO

Tensiômetro é um aparelho instalado *in situ* a uma determinada profundidade que permite monitorar de forma representativa o comportamento do solo no que tange a absorção da água pluvial. O tensiômetro permite obter indiretamente o nível de saturação do solo através da medição da pressão exercida em sua ponta inferior. O contato solo-tensiômetro é estabelecido por uma pedra porosa que permite o equilíbrio entre as condições interna e externa do instrumento.

O princípio de funcionamento do tensiômetro é relativamente simples. Dessa forma, pode-se concluir que quanto menos água estiver presente no solo, ou seja, para menores teores de umidade, a água do tensiômetro estará submetida a maiores sucções a fim de se igualar as pressões entre os meios interno e externo. A Figura 11 ilustra essa conclusão que é determinante para entender o comportamento do tensiômetro perante os níveis de chuva.

Figura 11 – Relação sucção x quantidade de água no solo



Fonte: A autora (2017)

Segundo Marinho (2005), um dos aspectos mais importantes do tensiômetro é a possibilidade de registro das leituras automaticamente, uma vez associado a um sensor de pressão elétrico. Além disso, é possível também a transmissão automática com o auxílio de um *datalogger*. Em contrapartida, existem algumas limitações como leituras máximas de registro, problemas de cavitação e necessidade de manutenção constante e reposição de água no equipamento.

2.3.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica é outro parâmetro que auxilia o entendimento do comportamento da água no solo. Uma vez que a curva de retenção representa a capacidade do solo em armazenar certa quantidade de água, a condutividade hidráulica representa a capacidade do solo de transportar esta água.

Esta propriedade do solo está associada à determinação da sua permeabilidade. E é neste momento que ocorre a diferenciação entre solos saturados e não saturados. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), a água apenas pode fluir no interior do solo através de poros que contenham água. Dessa forma, o nível de saturação está intimamente ligado à permeabilidade do solo. Ainda segundo Fredlund e Rahardjo (1993), a relação não é linear, sendo que o coeficiente de permeabilidade reduz de forma mais intensa conforme o decréscimo da saturação.

Para solos saturados, a permeabilidade em laboratório é determinada através de ensaios com permeâmetro de carga constante (solos mais arenosos) ou de carga variável (solos mais argilosos), ambos ilustrados na Figura 12. A formulação matemática desses métodos baseia-se na Lei de Darcy, expressa na Equação 5.

$$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y}$$

Equação 5

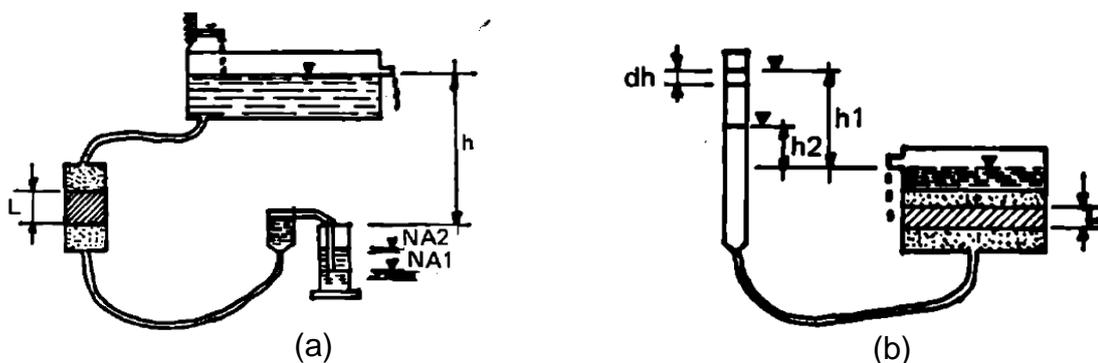
Onde: v_w : taxa de fluxo da água,

k_w : coeficiente de permeabilidade em função da quantidade de água,

$\frac{\partial h_w}{\partial y}$: gradiente hidráulico na direção y, denominado i_{wy} .

Figura 12 – Ensaio laboratoriais de permeabilidade

(a) Carga constante (b) Carga variável



Fonte: Caputo (1988)

Para solos não saturados, como apontado por Fredlund e Rahardjo (1993), experimentos realizados por Buckingham (1907), Richards (1931) e Childs e Collis George (1950) demonstram que a formulação da Lei de Darcy pode ser aplicada com sucesso. Isso se deve ao fato de que a taxa de infiltração de água em solo não saturado também é linearmente proporcional ao coeficiente hidráulico, se mantido o coeficiente de permeabilidade constante.

Fredlund e Rahardjo (1993) ressaltam, no entanto, que o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado não pode ser simplesmente considerado constante. Dessa forma, esse parâmetro é normalmente expresso em função da quantidade de água presente no solo ou da sucção matricial do solo não saturado.

Algumas relações empíricas foram estabelecidas para a determinação do coeficiente de permeabilidade não saturado, sendo algumas delas apresentadas na Tabela 8.

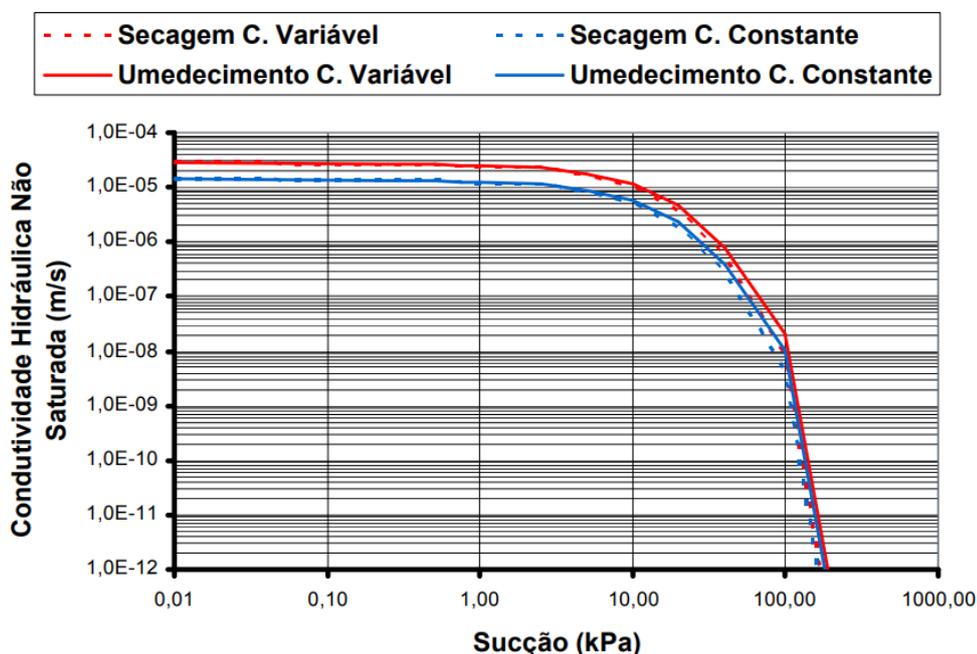
Tabela 8 – Relações empíricas para definição do coeficiente de permeabilidade

| AUTORES | RELAÇÕES MATEMÁTICAS | PARÂMETROS |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CORRELAÇÕES COM A SUCCÃO MATRICIAL | | |
| BROOKS e COREY (1964) | $k_w = k_s$ se $\psi \leq \psi_a$ $k_w = k_s \left[\frac{\psi_a}{\psi} \right]^{2+3\lambda}$ se $\psi > \psi_a$ | k_w -coeficiente de permeabilidade não saturada; k_s -coeficiente de permeabilidade saturada; ψ -sucção matricial; ψ_a -sucção matricial de entrada de ar; λ -parâmetro de ajuste. |
| GARDNER (1958a) | $k_w = \frac{k_s}{1 + a \left[\frac{\psi}{\rho_w g} \right]^n}$ | a -parâmetro de ajuste; n -parâmetro de ajuste. |
| ARBHABHIRAMA e KRIDAKORN (1968) | $k_w = \frac{k_s}{1 + \left[\frac{\psi}{\psi_a} \right]^{n'}}$ | n' -parâmetro de ajuste. |
| CORRELAÇÕES COM O TEOR DE UMIDADE | | |
| VAN GENUCHTEN (1980) | $k_w = k_s \theta^{0,5} \left[1 - \left(1 - \theta^{1/m} \right)^{m^2} \right]$ $\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ | θ -teor de umidade normalizado; m -parâmetro de ajuste; θ -teor de umidade volumétrica; θ_s -teor de umidade saturada; θ_r -teor de umidade residual. |

Fonte: Modificado de Fredlund e Rahardjo (1993)

A Figura 13 apresenta um exemplo de variação da condutividade hidráulica em função da sucção do solo pelo modelo Gardner (1958a). A curva foi obtida por Lisboa (2006) para solo residual composto por areia fina siltosa da região de Viçosa (MG).

Figura 13 – Exemplo da curva de condutividade hidráulica para uma areia fina siltosa baseada no método de Gardner (1958a)



Fonte: Lisboa (2006)

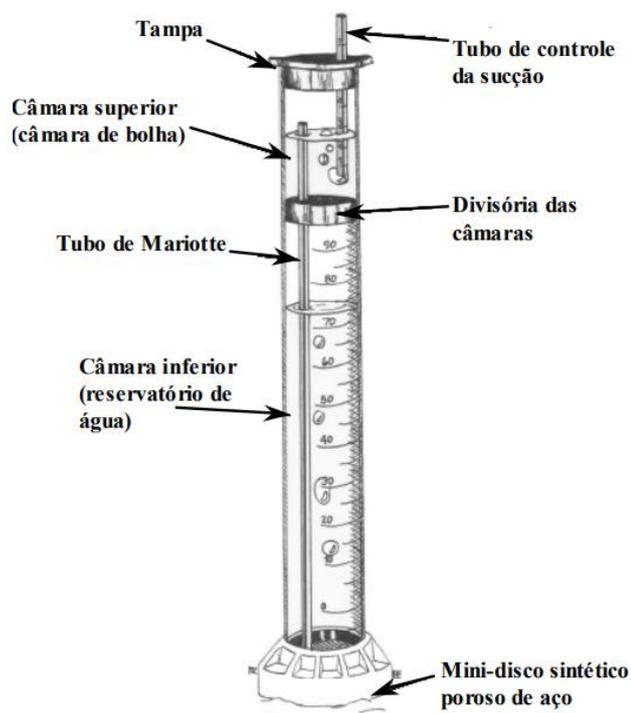
2.3.4.1 ENSAIO DE CAMPO – INFILTRÔMETRO MINIDISCO

Por meio de ensaio de campo, é possível obter a permeabilidade saturada do solo. A importância da determinação dessa permeabilidade, além de permitir correlacionar com a permeabilidade não-saturada, é poder definir a máxima velocidade de infiltração das águas pluviais no solo (LUMB, 1975 *apud* VICTORINO, 2015).

Existem diversos equipamentos que permitem a determinação desse fator, dentre eles será detalhado o funcionamento do infiltrômetro minidisco, o qual foi utilizado para obtenção de dados utilizados nessa pesquisa.

Segundo Mendes (2008), o ensaio consiste na leitura do nível d'água na câmara inferior do infiltrômetro, a cada sucção submetida e controlada na câmara superior, em determinados intervalos de tempo. O minidisco, que está em contato direto com o solo, é uma peça de aço inoxidável com pequenos poros responsável pela passagem da água. Todas as partes componentes do equipamento estão apresentadas na Figura 14.

Figura 14 – Componentes do infiltrômetro minidisco



Fonte: Mendes (2008)

O resultado do ensaio é o gráfico de acompanhamento da infiltração progressiva e acumulada em função da raiz quadrada do tempo, regida pela Equação 6.

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t}$$

Equação 6

Onde I : infiltração acumulada (cm);

t : intervalos de tempo correspondente às leituras;

C_1 : parâmetro relacionado à condutividade hidráulica ($m \cdot s^{-1}$);

C_2 : parâmetro relacionado à absorção do solo ($m \cdot s^{-1/2}$).

Por fim, a permeabilidade saturada é calculada através da razão entre o parâmetro C_1 e o parâmetro A, o qual, segundo Mendes (2008) está relacionado aos parâmetros de Van Genuchten e depende do tipo de solo, valor da sucção imposta e do raio do minidisco.

2.3.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), alguns problemas geotécnicos como capacidade de suporte de cargas, empuxos de terra em estruturas de contenção e

estabilidade de taludes necessitam da determinação da resistência ao cisalhamento do solo com o qual se está trabalhando. Dessa forma, é extremamente importante em termos de segurança das estruturas geotécnicas, a determinação correta desse parâmetro.

Em solos saturados, utiliza-se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, apresentado na Figura 15, e o conceito de tensões efetivas, proposto por Terzaghi, para definição da resistência ao cisalhamento a partir da Equação 7, estabelecida por Bishop em 1959 (Boszczoeki, 2008).

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi'$$

Equação 7

Onde: c' : coesão efetiva;

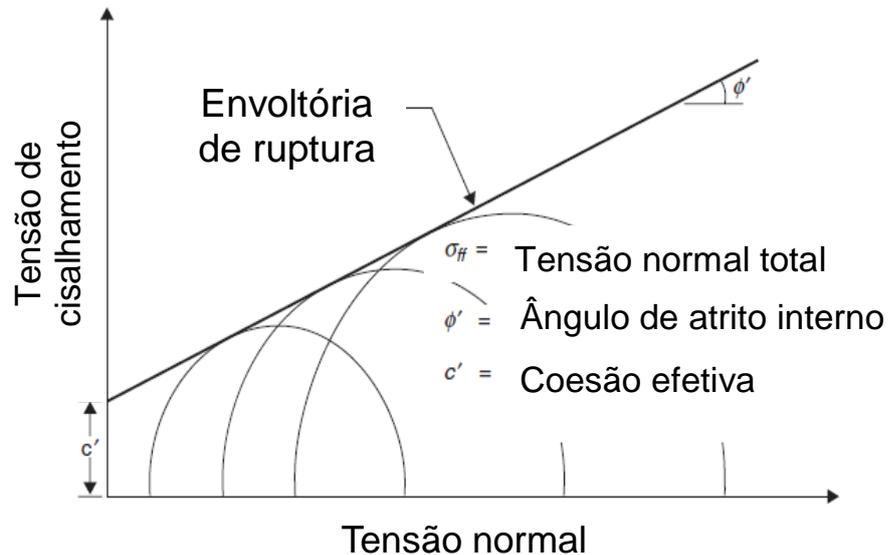
σ : tensão normal total;

u_w : tensão neutral;

$\sigma - u_w$: tensão normal efetiva (σ');

ϕ' : ângulo de atrito efetivo.

Figura 15 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb para solos saturados



Fonte: Adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993)

A formulação para mecânica de solos saturados pode ser aplicada quando o grau de saturação é superior a 85% (Fredlund e Rahardjo, 1993 *apud* Boszczoeki, 2008). Dessa forma, faz-se necessário o estudo mais específico sobre resistência ao cisalhamento de solos não saturados, uma vez que esta condição estará presente em diferentes períodos ao longo dos anos nas estruturas geotécnicas.

A determinação da resistência ao cisalhamento em solos não saturados ainda não é consenso em literatura. Muitos pesquisadores tentam correlacionar os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito efetivo) com o estado de tensão do solo, que é descrito para essa condição por tensões normais líquidas ($\sigma - u_a$) e sucção matricial ($u_a - u_w$) (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

A primeira equação sobre resistência ao cisalhamento de solos não saturados foi proposta por Bishop em 1959, e está expressa na Equação 8. Fredlund *et al.* (1978) propuseram uma outra relação que explica a resistência dos solos não saturados em função de duas variáveis de tensão independentes, expressa na Equação 9 (BOSZCZOWKI, 2008).

$$\tau_f = c' + [(\sigma_n - u_a) + \chi (u_a - u_w)] \tan \phi' \quad \text{Equação 8}$$

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad \text{Equação 9}$$

Onde: τ_f : resistência ao cisalhamento do solo não saturado;

c' : coesão efetiva do solo saturado;

$(\sigma_n - u_a)$: tensão normal líquida no plano de ruptura, no momento da ruptura;

$(u_a - u_w)$: sucção matricial do solo no momento da ruptura;

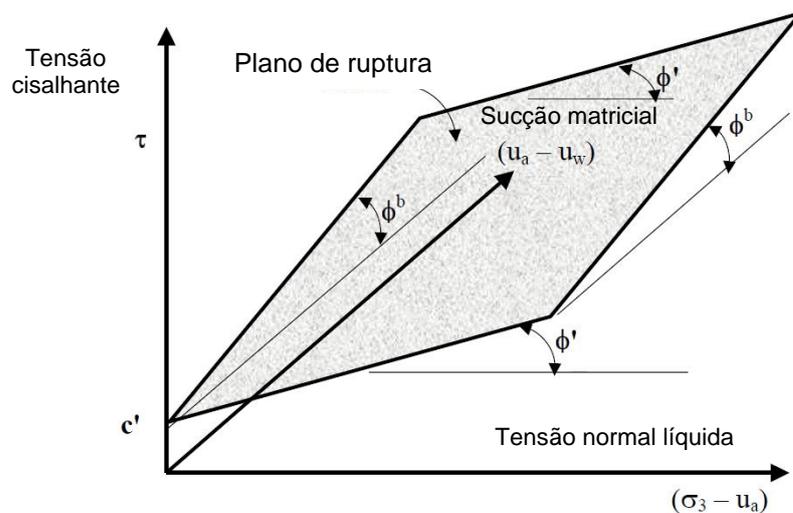
χ : relativo ao grau de saturação (varia de 0 a 1, até total saturação);

ϕ' : ângulo efetivo de resistência ao cisalhamento do solo saturado;

ϕ^b : ângulo de resistência ao cisalhamento devido à sucção matricial.

A Equação 9 pode ser representada graficamente em um plano tridimensional conforme a Figura 16.

Figura 16 – Representação tridimensional da resistência de solos não saturados



Fonte: Modificado de Boszcowski (2008)

Existem algumas ressalvas em relação às equações apresentadas como, por exemplo, o parâmetro χ não ser dependente única e exclusivamente do grau de saturação do solo, mas estar relacionado com o histórico e magnitude das tensões aplicadas, a estrutura do solo e a histerese no processo de umedecimento e secagem em ensaios de laboratório (GULHATI & SATIJA, 1981 *apud* CALLE, 2000).

Calle (2000) apresenta duas conclusões importantes que podem ser observadas baseando-se nos diversos estudos e pesquisas desenvolvidas em torno do tema, são elas:

- A resistência ao cisalhamento se relaciona de maneira não linear com a sucção matricial: para baixos valores de sucção matricial (elevada saturação) tem-se aproximadamente $\phi^b = \phi'$. A resistência ao cisalhamento tende a um valor máximo limite para altos valores de sucção (saturação reduzida), podendo em alguns solos arenosos apresentar valores decrescentes de resistência para baixos valores de saturação.
- A relação entre coesão aparente do solo e sucção matricial tende a ser diretamente proporcional, porém, a sucção matricial não parece apresentar influência definida no valor do ângulo de atrito interno do solo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho avaliou dados de monitoramento geológico-geotécnico obtidos em um trecho de, aproximadamente, 36 km (do km 646+000 ao km 682+000) da BR376/PR, compreendendo um total de seis pluviógrafos (nomeados P1 a P6) e 13 pontos de coleta de amostras indeformadas em pontos de interesse definidos por Victorino (2015), a fim de serem representativos para caracterização de toda a área.

As análises hidromecânicas desenvolvidas pelo presente estudo focaram em uma encosta localizada no lado direito da pista norte no km 667+120 m. O local foi definido por estar localizado em uma região (entre os km 667+000 e km 672+000) com alto índice de deslizamentos pretéritos, registrados desde 2008 e que totalizam 36 pontos de deslizamentos, os quais corresponderam a, aproximadamente, 37% do total de ocorrências.

Dessa forma, para o trecho específico a ser detalhado nesse estudo, a instrumentação instalada em campo constitui-se de quatro medidores de nível d'água, um pluviógrafo (nomeado P2), além dos resultados provenientes de duas das amostras indeformadas (nomeadas AI-13A e AI-07).

3.1.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

O Apêndice 1 encontrado ao final deste trabalho foi desenvolvido com base em dados elaborados e cedidos pela MINEROPAR (2005). Constitui-se de parte da Folha de Curitiba em escala 1:250.000 e sistema UTM de coordenadas.

Com base no Apêndice 1, a área em questão, a qual circunda a rodovia na parte sul, pertence ao Complexo Gnáissico Migmatítico, formado por migmatitos oftálmicos, com paleossoma de biotita gnáissica, do período arqueano-proterozóico inferior. Como descrito no Atlas Geológico do Estado do Paraná elaborado pela MINEROPAR (2001), o migmatito é uma rocha geralmente gnáissica, composta de um material hospedeiro metamórfico, com faixas e veios introduzidos de material ígneo quartzo-feldspático (pegmatito ou granito).

Além disso, encontram-se no mapa outras formações geológicas como a Suíte álcali-granitos, Complexo granítico gnáissico e sedimentos recentes, dos

períodos proterozóico superior – cambriano e quartenário – holoceno, que comprovam a complexidade geológica encontrada na Serra do Mar.

3.1.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROGRÁFICA

De acordo com o Instituto das Águas do Paraná (antiga SUDERHSA, 2006), a região está localizada na bacia hidrográfica litorânea do estado do Paraná.

O Apêndice 2 deste trabalho contém a hidrografia detalhada do local. Ao longo do trecho total da rodovia, foram identificadas duas bacias hidrográficas denominadas Bacia Norte e Bacia Sul. A primeira contém os pluviógrafos P1 (km 660+570), P5 (km 652+900) e P6 (km 662+000), e a segunda, os pluviógrafos P2 (km 667+900), P3 (km 669+300) e P4 (km 676+800).

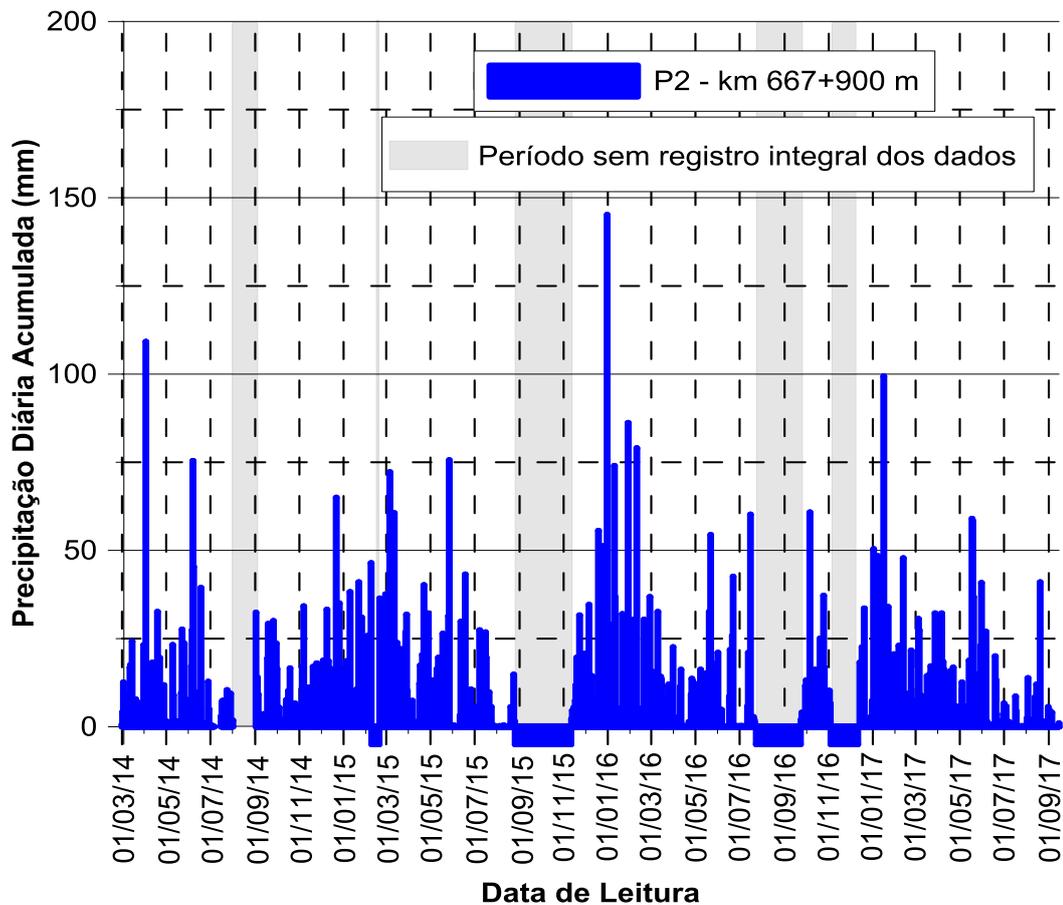
Além disso, percebe-se pela análise do Apêndice 2, que a hidrografia do local é bastante densa. Justifica-se, portanto, a definição da profundidade do lençol freático na região, apresentado no item 3.2.1 deste trabalho.

3.1.3 CARACTERIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

O pluviógrafo que servirá de base para as análises hidromecânicas é aquele que está mais próximo do talude em estudo. Denominado P2, o pluviógrafo está instalado no km 667+900 m, na bacia sul e possui uma base de dados de aproximadamente 3 anos e meio.

Ao longo desse período, houve seis falhas de leituras identificadas entre os dias 07 a 15/07/2014, 02/08 a 01/09/2014, 09 a 19/02/2015, 26/08 a 11/11/2015, 24/07 a 23/09/2016 e 04/11 a 11/12/2016, como observado na Figura 17. Essas falhas têm diversos fatores associados como manutenção do equipamento, defeito na transmissão ou registro de dados. Dessa forma, realizou-se, por meio de correlações com os demais pluviógrafos pertencentes à mesma bacia, o preenchimento das leituras faltantes, a fim de se obter maior consistência nas análises.

Figura 17 – Série pluviométrica do pluviógrafo P2



Fonte: A autora (2017)

Os pluviógrafos que pertencem à mesma bacia onde se localiza o P2 são denominados P3 (km 669+300) e P4 (km 676+800). Com auxílio do *software* de tratamento estatístico de código livre, denominado Weka, produzido pela Universidade de Waikato (2010), na Nova Zelândia, foi possível verificar a existência de uma correlação linear entre os dados. Dessa forma, foram estimados os coeficientes lineares que correlacionam não só P2 com P3 ou P2 com P4, mas também P2 com P3 e P4, em conjunto por meio da regressão linear. A análise realizada entre os três pluviógrafos denomina-se regressão linear múltipla. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

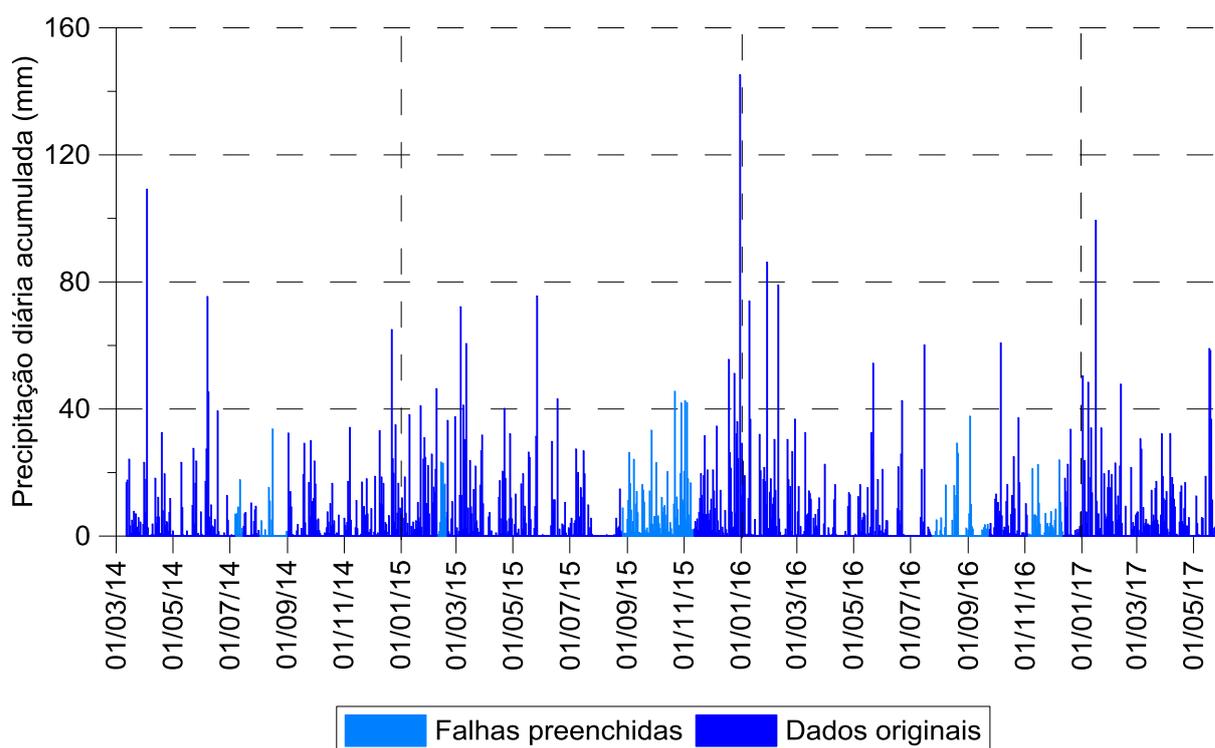
Tabela 9 – Coeficientes de correlação de Pearson entre os pluviômetros P2, P3 e P4

| VARIÁVEL DEPENDENTE | VARIÁVEL INDEPENDENTE | VARIÁVEL INDEPENDENTE | CORRELAÇÃO DE PEARSON | a | b | c |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------|--------|---|
| P2 | P3 | P4 | 0,8630 | 0,7768 | 0,0525 | 0 |
| P2 | P3 | - | 0,8621 | 0,8315 | 0 | - |
| P2 | P4 | - | 0,7297 | 0,5534 | 0 | - |

Fonte: A autora (2017)

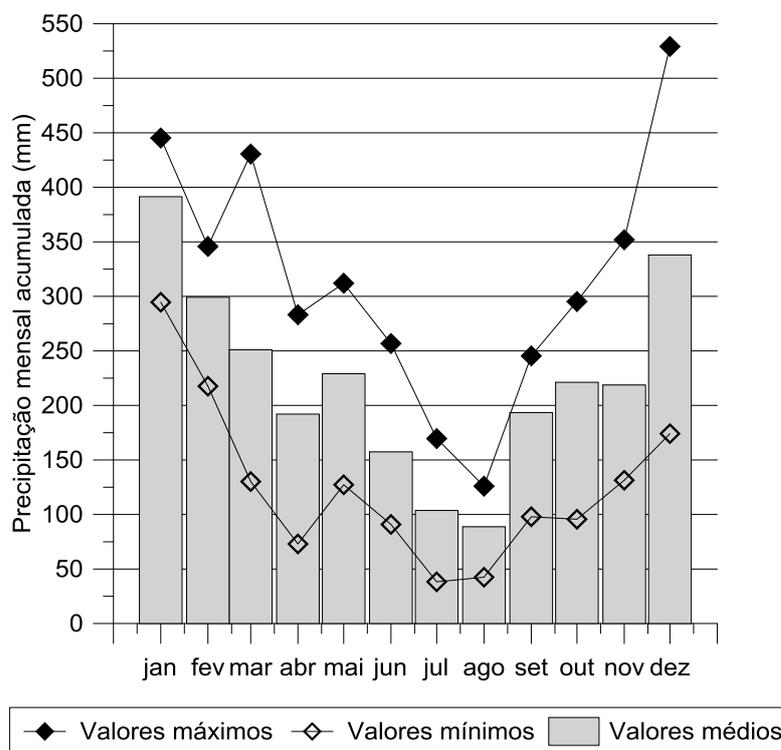
Como resultado dessa análise, foi possível completar a série histórica do pluviômetro P2, a qual está apresentada na Figura 18. Além disso, na Figura 19 apresentam-se os acumulados mensais a fim de se estabelecer a sazonalidade pluviométrica da área.

Figura 18 – Série pluviométrica completa do pluviômetro P2 de 01/03/2014 a 01/06/2017



Fonte: A autora (2017)

Figura 19 – Precipitação mensal acumulada do pluviógrafo P2



Fonte: A autora (2017)

Dentre as conclusões obtidas através da análise das Figuras 18 e 19, observa-se que os meses mais secos da região são junho, julho e agosto, enquanto os mais chuvosos são dezembro, janeiro e fevereiro. Além disso, o acumulado diário médio correspondente à série histórica é de 7,5 mm, com pico máximo registrado igual a 145,2 mm no dia 31/12/2015. Ainda, nos meses mais secos, esse valor é equivalente a 4,2 mm e nos meses mais chuvosos, 11,4 mm.

3.2 TALUDE RODOVIÁRIO EM ESTUDO

Além do conjunto de dados históricos provenientes da instrumentação instalada próximo ao talude analisado neste trabalho, a escolha do local foi baseada na possibilidade de realização de ensaios de sucção na amostra indeformada, AI-13A, uma vez que se observou a carência de pontos para melhor definição da sua respectiva curva de retenção. Buscou-se não apenas seu aperfeiçoamento, como o conseqüente estudo hidromecânico do local.

Os dados de caracterização geológico-geotécnica do talude advêm, portanto, das amostras AI-13 A (707750 E, 7133769 S) e AI-07 (706721 E, 7138133 S), as quais distam 4,5 quilômetros entre si, porém se constituem de solo residual de

migmatito e pertencem ao Complexo Gnáissico Migmatítico, apresentado no Apêndice 1. A amostra AI-13A foi retirada a 1,0 metro de profundidade e a AI-07, a 1,2 metros de profundidade.

A Tabela 10 sintetiza os ensaios pretéritos à elaboração desse estudo por Victorino (2015), assim como os ensaios complementares que foram realizados para fundamentar as análises.

Tabela 10 – Ensaios realizados nas amostras indeformadas para caracterização do talude

| AMOSTRA INDEFORMADA | LOCALIZAÇÃO | ENSAIOS PRETÉRITOS | ENSAIOS COMPLEMENTARES |
|---------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| AI-13 A | km 667+120 | Granulometria; Limites de Atterberg; Massa específica; Permeabilidade saturada; Cisalhamento direto. | Papel filtro; Perda ao fogo; MEV/EDS. |
| AI-07 | km 672+000 | Granulometria; Limites de Atterberg; Massa específica; Permeabilidade saturada; Triaxial. | - |

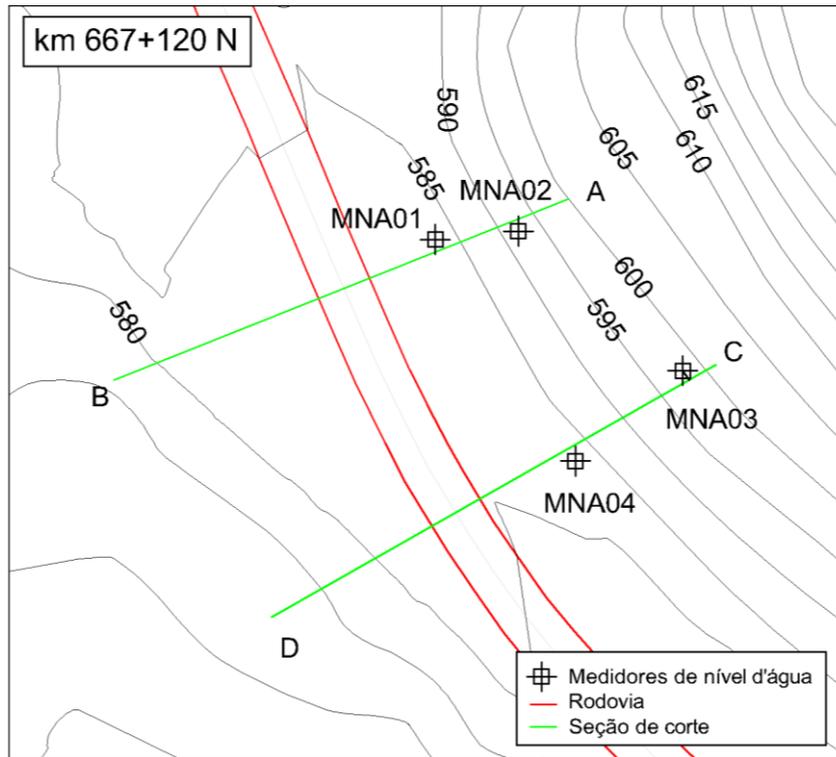
Fonte: A autora (2017)

3.2.1 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

A seção de análise foi definida com base em levantamento planialtimétrico datado do ano de 2012 e disponibilizado pela concessionária da rodovia, com suas respectivas curvas de nível a cada metro.

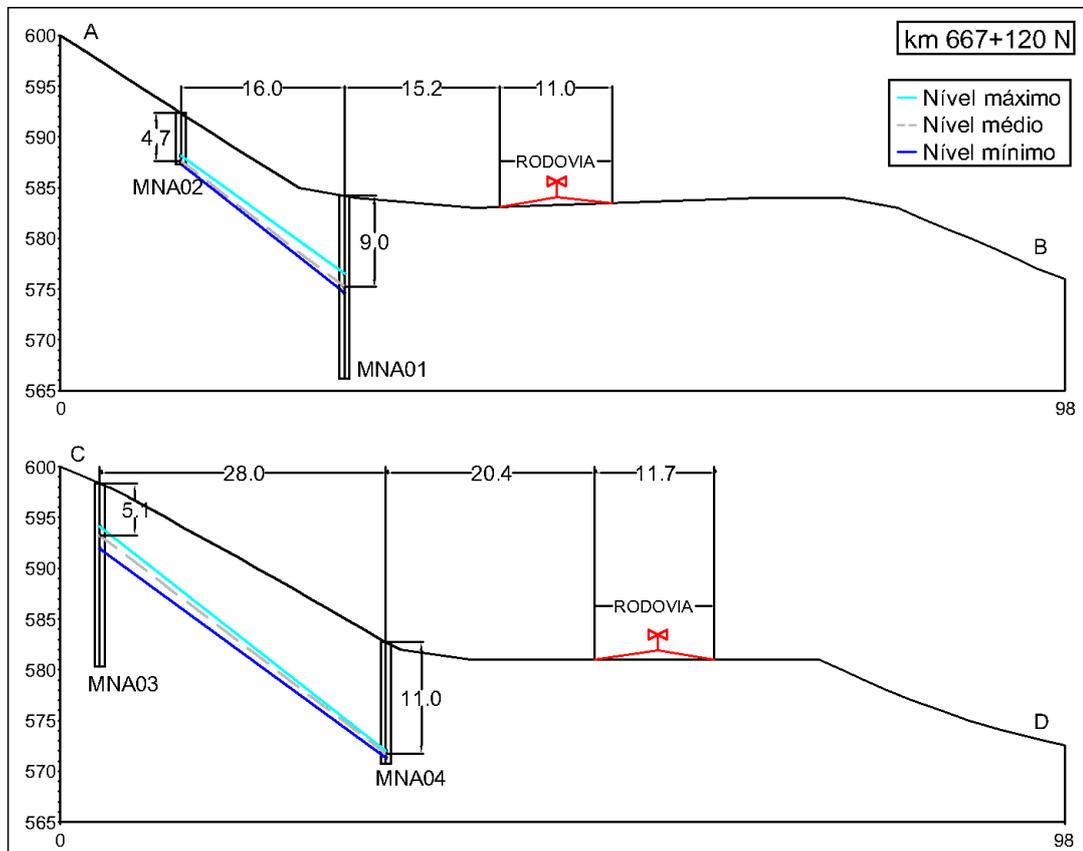
Inicialmente, no entanto, foi necessário definir o nível do lençol freático no local. Por meio das coordenadas dos medidores de nível d'água, foi possível estabelecer dois cortes (AB e CD) para análise (Figura 20). Traçados os perfis de elevação relativos a ambos os cortes, as leituras obtidas permitem observar que a profundidade do lençol freático é de, aproximadamente, 5 metros a 40 metros da rodovia e de 9 metros na região mais próxima a rodovia (Figura 21). Além disso, uma vez que os níveis máximo, mínimo e médio são muito próximos entre si, infere-se que há pouca variação sazonal.

Figura 20 – Talude em planta com os respectivos medidores de nível d'água



Fonte: A autora (2017)

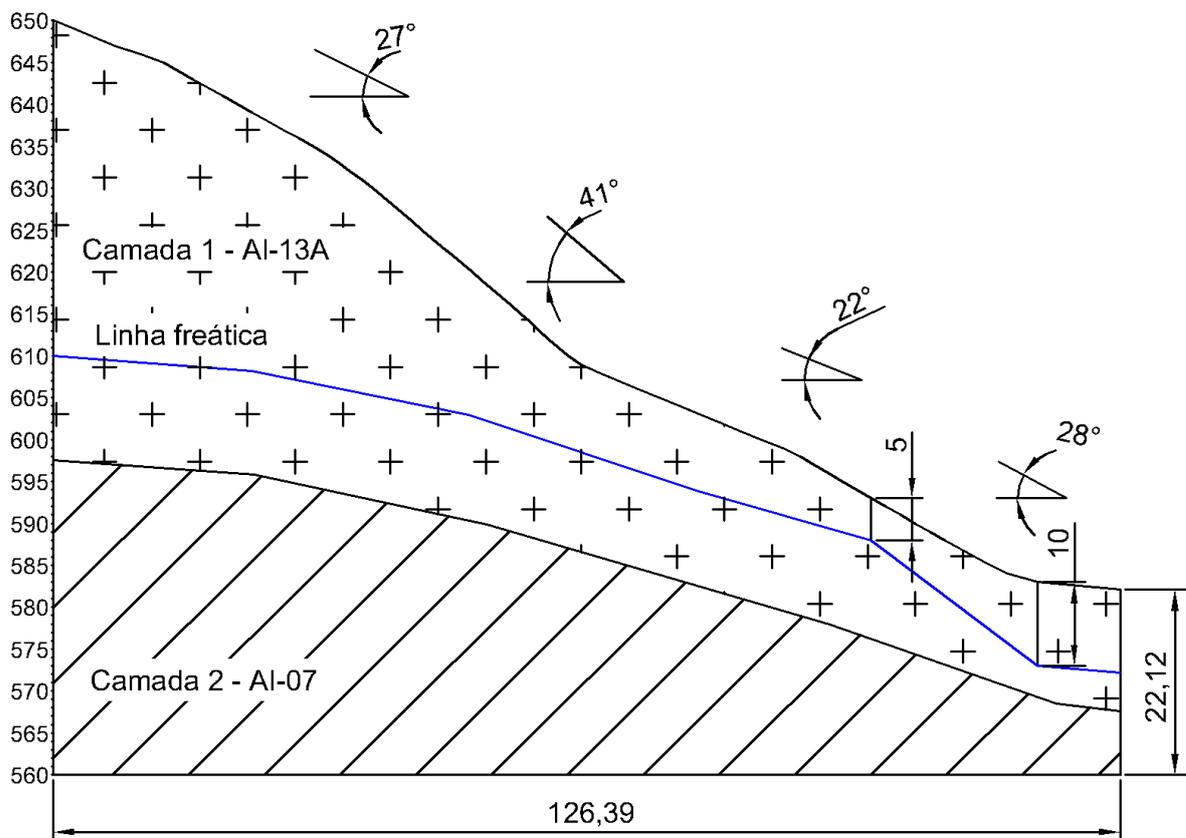
Figura 21 – Seções de corte AB e CD ao longo do talude em estudo



Fonte: A autora (2017)

Dessa forma, a seção do talude analisado foi definida conforme a Figura 22. Optou-se por uma delimitação do comprimento total em 126,39 metros, obtendo-se altura a montante de 90 metros e a jusante de 22,12 metros. As inclinações superficiais variam de 22° a 41°. A separação entre as camadas superior e inferior, representadas pelas propriedades geológicas-geotécnicas das amostras AI-13A e AI-07, respectivamente.

Figura 22 – Perfil topográfico do talude (km 667+120 m) – medidas em metros



Fonte: A autora (2017)

3.2.2 ENSAIOS PRETÉRITOS

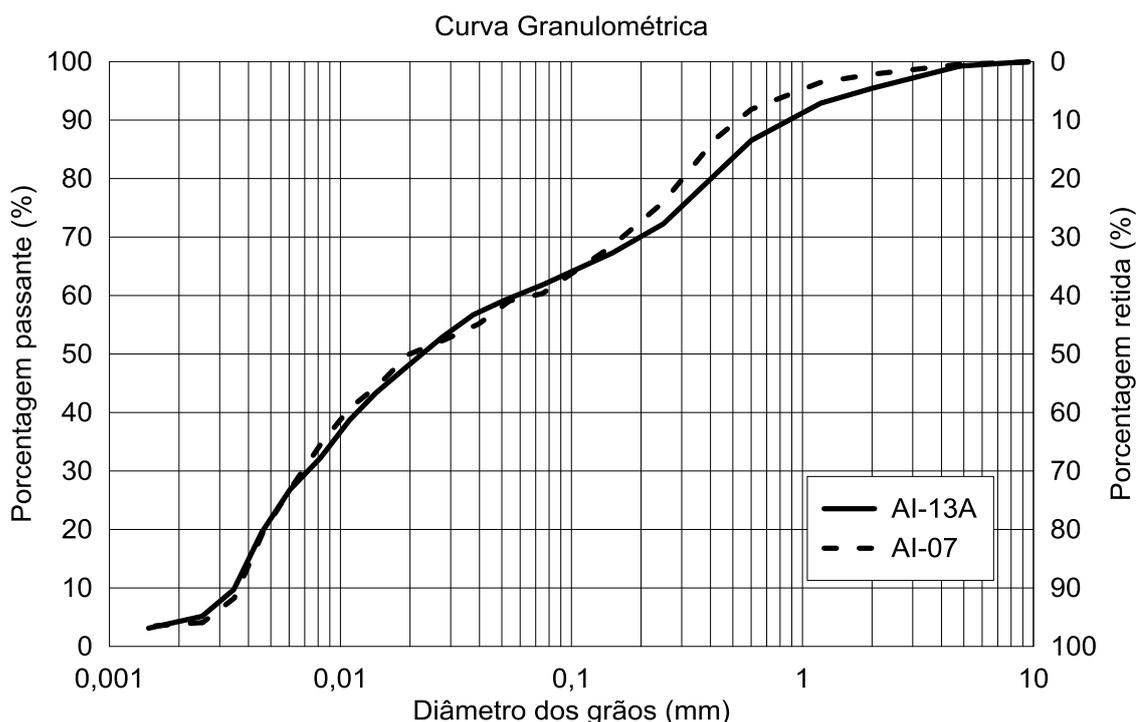
Serão apresentados a seguir os resultados dos ensaios realizados para as amostras AI-13A e AI-07, os quais foram publicados por Victorino (2015), com respectivas considerações em relação aos dados encontrados na literatura.

3.2.2.1 GRANULOMETRIA

A análise granulométrica das amostras foi feita baseada em ensaio descrito e executado conforme a ABNT NBR 7181:2016.

Com base na Figura 23 e Tabela 11, ambos os solos são classificados como silte arenoso. A maior parcela, correspondente ao silte, é em torno de 55%, enquanto que a quantidade de areia é de 36%, estando em maior parte no seu tamanho médio (0,2 a 0,6 mm). O equivalente às partículas de argila e pedregulho corresponde igualmente a valores em torno de 2 a 4%.

Figura 23 – Curvas granulométricas das amostras AI-13A e AI-07



Fonte: Modificado de Victorino (2015)

Tabela 11 – Distribuição granulométrica das amostras AI-13A e AI-07

| CLASSIFICAÇÃO ABNT 6502/95 (VALORES EM mm) | | | | | | |
|--------------------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| AMOSTRA | ARGILA <0,002 | SILTE 0,002 – 0,06 | AREIA | | | PEDREGULHO 2 – 60 |
| | | | FINA 0,06 – 0,2 | MÉDIA 0,2 – 0,6 | GROSSA 0,6 – 2 | |
| AI-13A | 4,13 | 56,41 | 9,20 | 16,75 | 8,94 | 4,56 |
| AI-07 | 3,76 | 55,69 | 12,78 | 19,61 | 6,00 | 2,16 |

Fonte: Modificado de Victorino (2015)

Com base na distribuição granulométrica é possível classificar o solo quanto a sua graduação e compressibilidade. No entanto, define-se primeiramente que o

presente solo possui granulação fina uma vez que a porcentagem passante na peneira n°200 (0,075 mm) é superior a 50% (PINTO, 2006).

Neste caso, faz-se necessária uma análise dos índices de consistência para melhor explicar o comportamento dos solos finos. Como destacado por Pinto (2006), a classificação neste caso não é função apenas das porcentagens das frações granulométricas, mas também da sua atividade.

3.2.2.2 LIMITES DE ATTERBERG

Os ensaios para determinação dos limites de Atterberg foram realizados conforme as normas ABNT NBR 6459:2016 e ABNT NBR 7180:2016, para o limite de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), respectivamente.

A Tabela 12 apresenta as porcentagens correspondentes ao LL e LP. Para obtenção de outros parâmetros de correlação para análise qualitativa do estado do solo, utilizou-se como umidade natural (ω) de 20,48% para a amostra AI-13A e de 19,23% para a amostra AI-07 (VICTORINO, 2015).

Tabela 12 – Resultados e correlações entre os limites de Atterberg

| LIMITES DE ATTERBERG | | AMOSTRA AI-13A | AMOSTRA AI-07 |
|-----------------------------|----------------------------------|-------------------|------------------|
| Limite de liquidez (LL) | NBR 6459:2016 | 22,33% | 23,88% |
| Limite de plasticidade (LP) | NBR 7180:2016 | 18,33% | 21,11% |
| CORRELAÇÕES | | | |
| Índice de plasticidade (IP) | $IP = LL - LP$ | 4,00% | 2,77% |
| Índice de consistência (IC) | $IC = \frac{LL - \omega}{IP}$ | 0,46 | 1,68 |
| Índice de atividade (IA) | $IA = \frac{IP}{\% (< 0,002mm)}$ | 0,97 | 0,74 |

Fonte: Modificado de Victorino (2015)

Ambos os solos são classificados de acordo com a carta de plasticidade desenvolvida por Casagrande e apresentada por Pinto (2006) como silte de baixa compressibilidade. Além disso, nota-se que o índice de plasticidade (IP), indicado na Tabela 12, reflete-se em amostras de solo de baixa plasticidade.

O índice de atividade indica a influência da fração de argila no comportamento do solo. Quando o índice é menor que 0,75, considera-se a argila como inativa;

entre 0,75 e 1,25, considera-se influência normal; e, acima de 1,25 ela é considerada ativa (PINTO, 2006). Nos solos em questão, esse índice indica atividade inativa a normal. Outra forma de notar essa relação é verificar que tanto o índice de consistência (IC) como a fração granulométrica de argila são baixos.

3.2.2.3 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

A massa específica foi determinada de acordo com os procedimentos do DNER-ME 093/94. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Massa específica das amostras

| AMOSTRA | MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³) |
|---------|---------------------------------------|
| AI-13A | 2,613 |
| AI-07 | 2,680 |

Fonte: Modificado de Victorino (2015)

3.2.2.4 ENSAIO DE PERMEABILIDADE *IN SITU*

Com auxílio do infiltrômetro minidisco foi possível obter a permeabilidade saturada de ambas as amostras. Esses valores foram utilizados como parâmetros de entrada na análise de fluxo no talude. A Tabela 14 apresenta as permeabilidades saturadas definidas para cada amostra.

Tabela 14 – Permeabilidade saturada das amostras

| AMOSTRA | PERMEABILIDADE SATURADA k_{sat} (cm/s) |
|---------|---------------------------------------------|
| AI-13A | $2,88 \times 10^{-4}$ |
| AI-07 | $1,03 \times 10^{-3}$ |

Fonte: Modificado de Victorino (2015)

3.2.2.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

A fim de aferir valores médios para o ângulo de atrito e intercepto coesivo das referidas amostras, foram realizados os seguintes ensaios: para a amostra AI-13A, realizou-se cisalhamento direto e para AI-07, triaxial. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores médios de interceptos coesivos e ângulos de atrito

| CAMADA | AMOSTRA | INTERCEPTO COESIVO (kPa) | ÂNGULO DE ATRITO (°) |
|--------|---------|--------------------------|----------------------|
| 1 | AI-13A | 0 | 38 |
| 2 | AI-07 | 13 | 31 |

Fonte: Acevedo *et al.*, (2017)

Para a amostra AI-13A, com a aplicação de tensões de 30, 60 e 90 kPa, obteve-se um intercepto coesivo efetivo de 0 kPa e ângulo de atrito de, aproximadamente, 38° (ACEVEDO *et al.*, 2017).

Já a amostra AI-07 foi submetida ao ensaio triaxial CIU (consolidado isotropicamente e não-drenado). De acordo com Spannenberg (2003), a fase de cisalhamento é realizada sob condições não drenadas e com medição de poropressão. Para o traçado da trajetória de tensões, foram aplicadas tensões iguais a 15, 60 e 90 kPa. O intercepto coesivo efetivo foi de, aproximadamente, 13 kPa e ângulo de atrito, 31° (ACEVEDO *et al.*, 2017).

3.2.3 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Para melhor entendimento da camada superficial do talude, representada pela amostra indeformada AI-13A, foram realizados três ensaios não convencionais: perda ao fogo, para verificação do grau de intemperismo; microscopia eletrônica, a fim de observar a distribuição dos grãos; espectrômetro de energia dispersiva, para definir a composição química e mineralógica; e, por fim, o ensaio de papel filtro para estabelecer a curva de retenção do solo.

3.2.3.1 ENSAIO DE PERDA AO FOGO

Scarin e Bernardes (2016) destacam que o ensaio de perda ao fogo é utilizado para a caracterização do grau de intemperismo do solo devido a sua simplicidade e baixo custo. A perda de massa resultante do ensaio representa a queima de argilominerais e hidróxidos de ferro e alumínio, produtos do intemperismo. Ainda como explicado por Scarin e Bernardes (2016), no ensaio utiliza-se um forno que pode alcançar temperaturas em torno de 1200°C, denominado de mufla. No entanto, a temperatura e tempo de ensaio são definidos para cada tipo de solo, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 – Recomendações de temperatura do ensaio de perda ao fogo a depender da composição mineralógica do solo

| COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA | TEMPERATURA (°C) |
|-------------------------------------------------------------------|------------------|
| Alta presença de mica | < 800 |
| Presença de caulinita | > 600 |
| Alta presença de argilominerais de alta atividade (ex: esmectita) | > 800 |

Fonte: Adaptado de Scarin e Bernardes (2016)

O índice de perda ao fogo (PF) é calculado conforme a Equação 10:

$$PF (\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

Onde: M_i : massa inicial da amostra (g);

M_f : massa final da amostra (g).

O ensaio realizado para cada amostra de solo correspondente a cada ponto da curva de retenção ocorreu segundo a seguinte sequência:

1. Secagem em estufa (105°C) por 24 horas;
2. Destorroamento;
3. Pesagem inicial da amostra (M_i) em um cadinho de porcelana;
4. Secagem na mufla (600°C) por 24 horas;
5. Secagem no dessecador para evitar ganho de umidade;
6. Pesagem final da amostra (M_f) no cadinho de porcelana.

A falta de normatização do ensaio para solos gera uma variabilidade de resultados e metodologias aplicadas. No entanto, independente da temperatura, tempo de queima e procedimento de peneiramento escolhidos, recomenda-se que haja um cuidado extra na manipulação da amostra na pesagem final uma vez que esta estará muito quente.

3.2.3.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTRÔMETRO DE ENERGIA DISPERSIVA (MEV/EDS)

Segundo Mitchell (1976), a análise microscópica do solo pode ser útil para estudos de classificação, tamanho, forma, textura e condição de grãos isolados ou agregados de silte e areia. Ainda como explicado por Mitchell (1976), o princípio de

funcionamento dos ensaios é baseado na emissão de feixe de elétrons. Alguns dos elétrons espalham-se pela amostra, e diferentes partes dela aparecem em cores mais claras ou escuras em proporção a quantidade de elétrons dispersos. Depois de passar por uma série de lentes, a imagem é disponibilizada em uma tela fluorescente para análise.

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura e espectrômetro de energia dispersiva foram realizados no Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná (UFPR) no dia 23 de outubro de 2017.

A preparação da amostra foi feita com antecedência, buscando-se moldar fragmentos indeformados da Al-13A em anéis de 1 cm de diâmetro com altura similar entre os 5 corpos de prova utilizados. A amostra foi mantida indeformada a fim de se conservar a estrutura e disposição original dos grãos e dos poros do solo, como apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Moldagem e preparação da amostra para os ensaios EDS/MEV



Fonte: A autora (2017)

Após a moldagem, realizou-se primeiramente o ensaio EDS a fim de se obter a composição química da amostra. O ensaio de MEV foi realizado em seguida com a metalização da amostra com ouro. Duas das cinco amostras foram submetidas ao ensaio de MEV. Estas amostras apresentam coloração escura após a metalização e são apresentas na Figura 25.

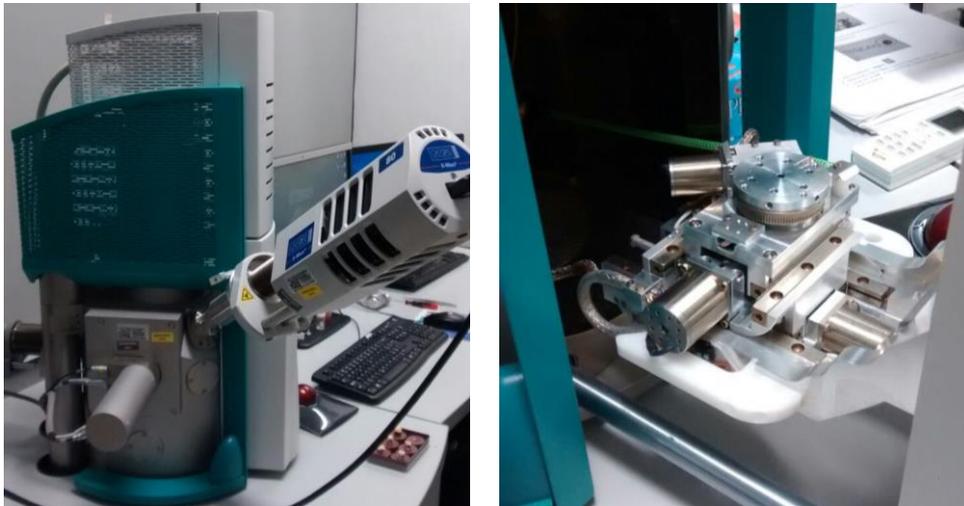
Figura 25 – Amostras preparadas para ensaio de MEV



Fonte: A autora (2017)

Foi utilizado o mesmo equipamento para ambos os ensaios, o qual é apresentado na Figura 26. Em resumo, de forma simplificada, pode-se dizer que enquanto o EDS permite a classificação dos elementos químicos encontrados na amostra, o MEV possibilita a visualização de imagens microscópicas de alta resolução.

Figura 26 – Equipamento para realizado dos ensaios de MEV e EDS



Fonte: A autora (2017)

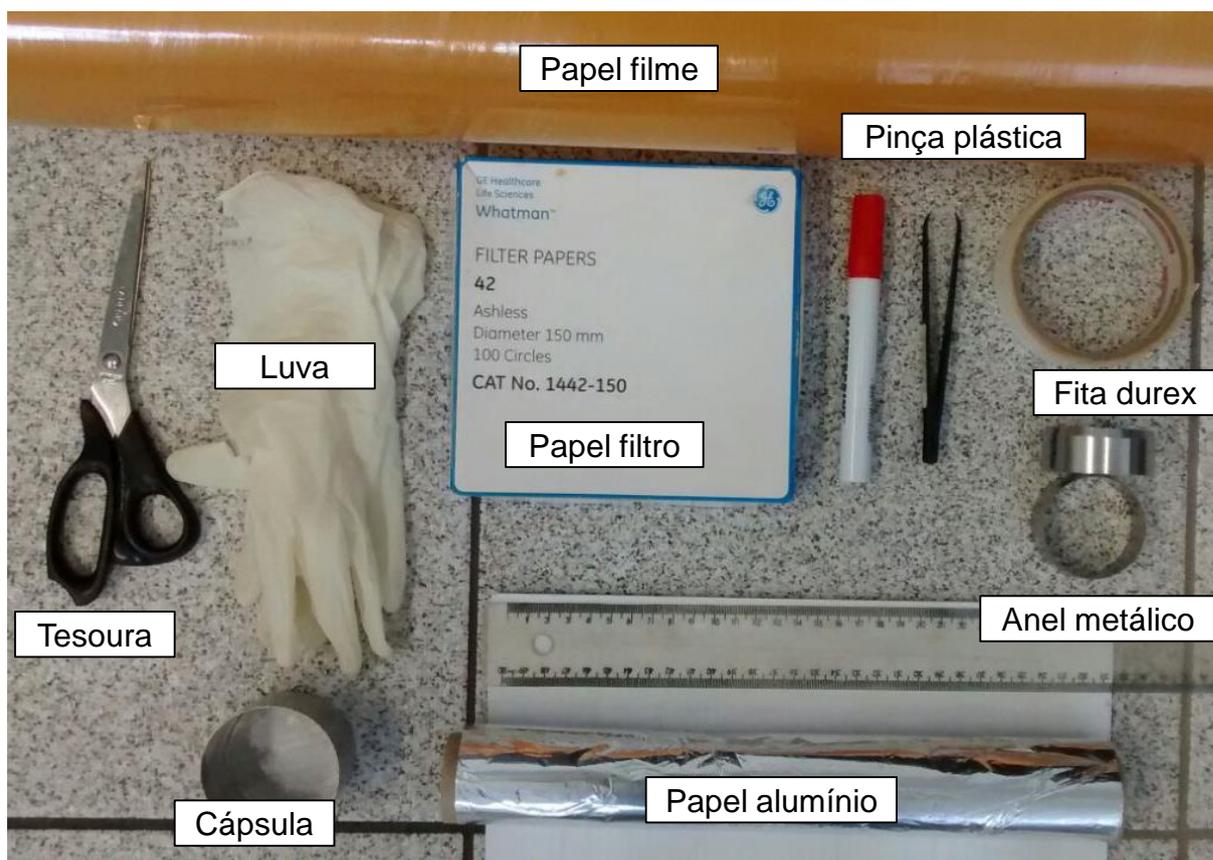
3.2.3.3 ENSAIO PAPEL FILTRO

O ensaio de papel filtro foi realizado seguindo os seguintes passos:

1. Moldagem das amostras em anel metálico circular (diâmetro aproximado de 4,8 cm e altura de 2 cm), cada amostra com teores de umidade diferentes entre si;
2. Colocação de pequenos pedaços de papel filtro Whatman 42 em contato com o solo;
3. Selagem com camadas alternadas de papel filme e papel alumínio;
4. Colocação das amostras em uma caixa de isopor hermeticamente fechada e armazenada em câmara seca (aprox. 19°C) por 30 dias;
5. Após o fim do período de equilíbrio, pesou-se o papel filtro (transferido em menos de 5 segundos para plástico hermeticamente fechado) e a amostra de solo com o anel;
6. Colocação de todo o conjunto na estufa (aprox. 105°C) por 24 horas;
7. Após esse período, pesou-se novamente o papel filtro e o conjunto solo+anel para aferição da umidade gravimétrica;
8. Medição das dimensões específicas de cada anel para aferição da umidade volumétrica;
9. A sucção foi aferida através da umidade gravimétrica do papel filtro por meio da relação de calibração estabelecida por Chandler *et al.* (1992).

Para tanto, foram utilizados materiais apresentados na Figura 27. Destaca-se o uso de luva e pinça plástica durante todo o processo para evitar variações de peso do papel e facilitar a retirada e colocação do mesmo no saco plástico hermeticamente fechado para pesagem ao final do período de equilíbrio e, posteriormente, a secagem em estufa.

Figura 27 – Materiais utilizados no ensaio de sucção



Fonte: A autora (2017)

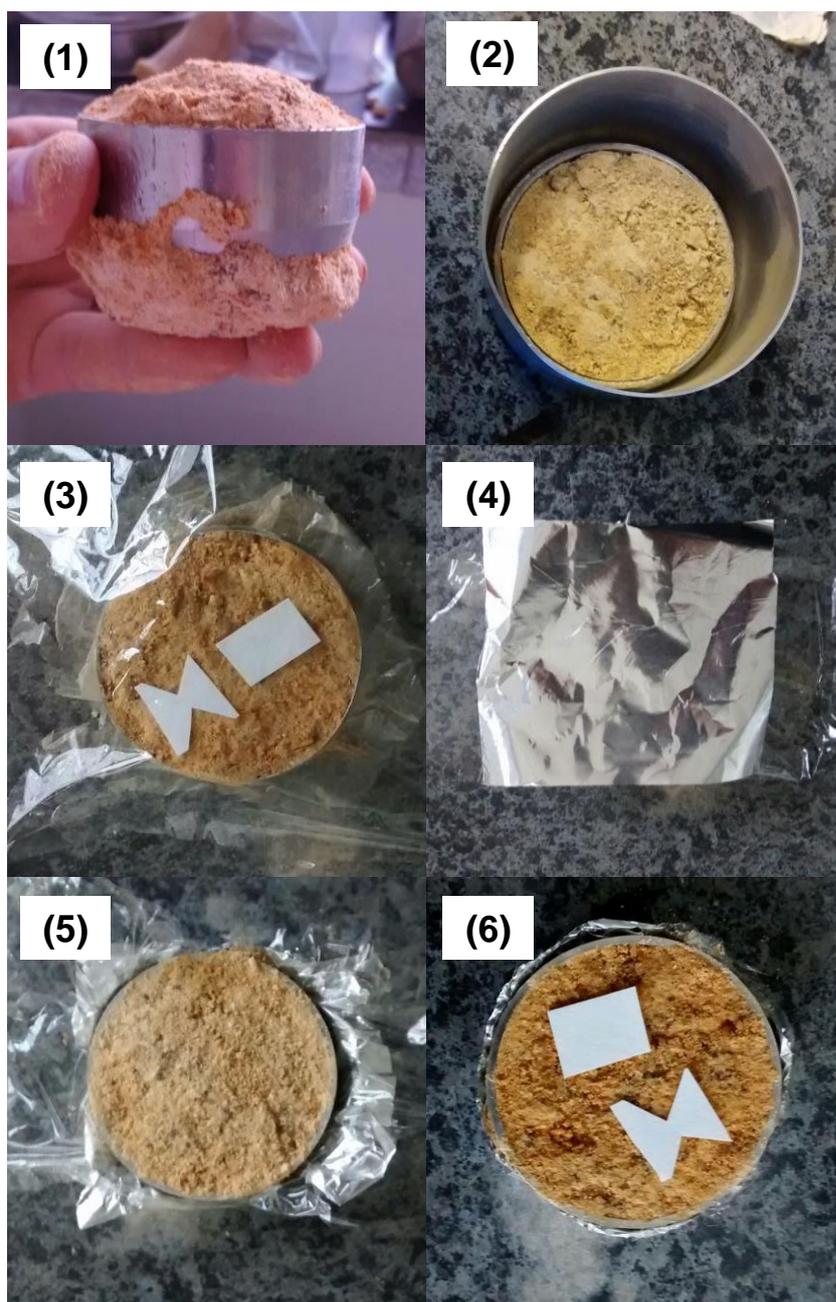
O ensaio possui procedimentos executivos simples, porém, pela falta de norma específica que oriente sua execução, a seguir são apresentadas algumas recomendações a fim de evitar erros que o invalidem, além de ações que facilitam a execução do mesmo.

O preparo da amostra é feito cravando o anel metálico em uma porção indeformada do solo. Recomenda-se realizar talhamento lateral contínuo, para que o cravamento do anel não altere a estrutura original do solo, até que o anel esteja cravado com espessura excedente de solo na parte superior e inferior do anel, como observado na Figura 28 (1). No caso do solo estar muito seco, borrifou-se água destilada para permitir a moldagem dos corpos de prova. É extremamente importante que o solo ocupe todo o volume do anel metálico, ilustrado na Figura 28 (2) uma vez que a umidade volumétrica será determinada considerando este volume.

Em seguida, acrescida a quantidade de água necessária e o papel filtro Whatman 42, o corpo de prova foi selado, primeiramente, com um papel filme e em

seguida com papel alumínio, como pode ser visto na Figura 28 (3) e (4). Repetiu-se o procedimento quatro vezes, duas em cada lado. Além disso, deixou-se um excesso de papel na lateral para posterior corte na altura do anel – Figura 28 (5) e (6). O embrulho do corpo de prova realizado dessa maneira não apenas garante que não haja perda de umidade durante o tempo de equilíbrio, como facilita a retirada do papel filtro para pesagem ao final desse período.

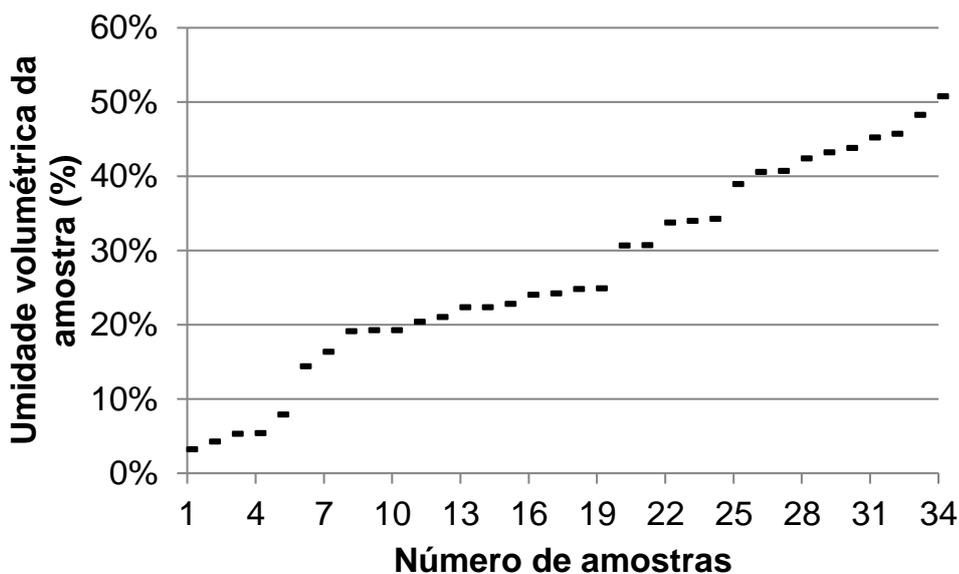
Figura 28 – Procedimento para preparação da amostra no ensaio de papel filtro



Fonte: A autora (2017)

O volume de água acrescido em cada amostra deve ser calculado previamente a fim de garantir abrangência de todo o espectro de variação da umidade volumétrica, resultando em uma curva de retenção bem definida. Neste trabalho, a Figura 29 apresenta, em ordem crescente, os valores de umidade alcançados pelas 34 amostras utilizadas no ensaio.

Figura 29 – Distribuição crescente das umidades volumétricas das amostras



Fonte: A autora (2017)

Por fim, destaca-se que, no presente estudo, foi realizada a trajetória de umedecimento uma vez que a amostra já se encontrava totalmente seca devido ao seu tempo excessivo de armazenamento.

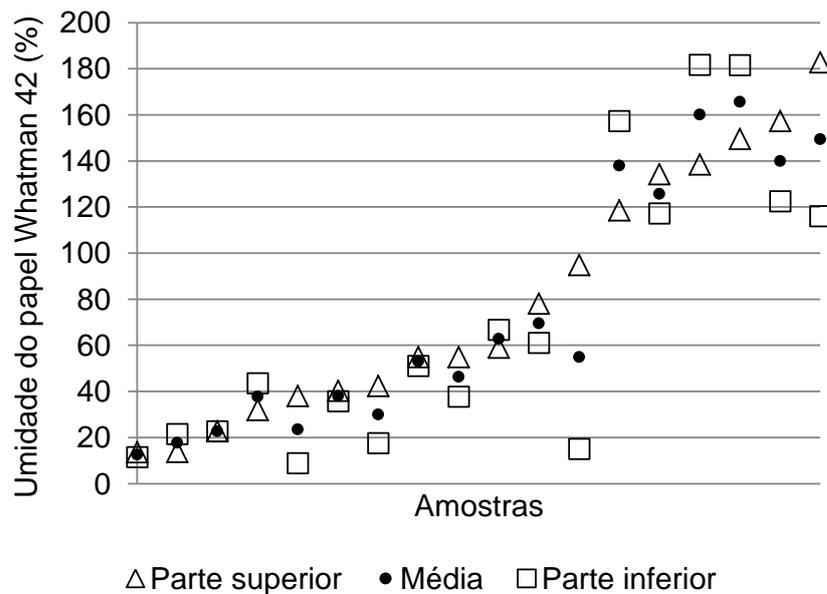
3.2.4 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO

Previamente a definição da curva de retenção, faz-se necessário a definição dos pares de pontos (umidade volumétrica; sucção matricial) mais representativos. Dessa forma, das 34 amostras originalmente obtidas, 28 foram consideradas para a obtenção da curva. Foram descartadas as amostras que apresentaram as seguintes características:

- Amostras com papéis filtros demasiadamente contaminados com partículas de solo;
- Amostras com umidades volumétricas próximas, porém com sucção matricial correspondente destoante, ou seja, pontos fora da curva.

No caso de amostras com sucções diferentes na parte superior e inferior do anel, o valor médio foi considerado, como ilustrado na Figura 30. Justifica-se esta situação, possivelmente, devido ao fato de o tempo reservado ao equilíbrio não ter sido suficiente.

Figura 30 – Umidades gravimétricas dos papéis filtros superiores e inferiores



Fonte: A autora (2017)

Uma vez definidos os pontos de umidade volumétrica e sucção matricial correspondente, utilizou-se o *software* brasileiro LABFIT, desenvolvido na Universidade Federal de Campina Grande (Paraíba – Brasil), para o ajuste de curva. De acordo com Silva *et al.* (2004), no LABFIT, os ajustes de funções são feitos através de regressão não-linear aplicada de forma iterativa, até que um critério de convergência seja atingido.

3.3 ANÁLISE NUMÉRICA

Para realização da análise numérica, utilizou-se o *software* GEOSTUDIO em suas extensões SEEP/W para análise hidrodinâmica e SLOPE/W para análise mecânica.

Na avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos, a pesquisa foi realizada com base na análise de fluxo transiente. Como destacado por Fredlund e Rahardjo (1993), em geral, o processo de infiltração é tratado desta maneira por responder de forma coerente às condições de contorno de variação de umidade do solo.

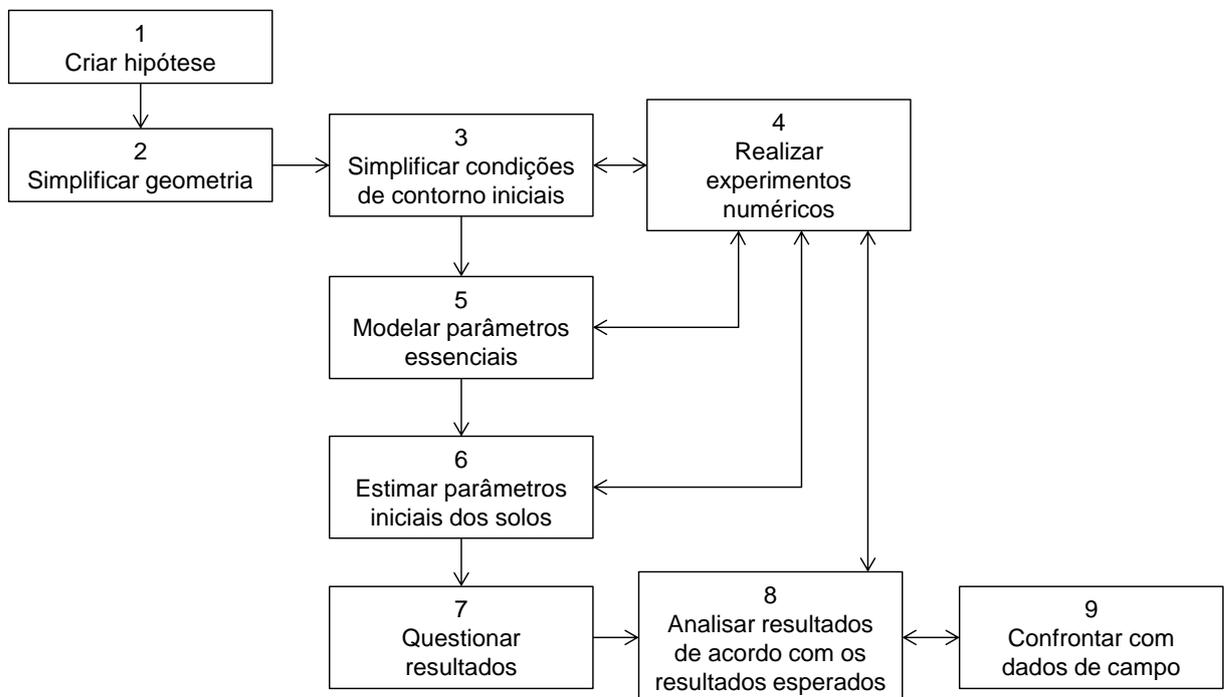
Na análise dos parâmetros de resistência, utilizaram-se os valores correspondentes aos ensaios realizados em laboratório. Procedeu-se então para o cálculo do fator de segurança através do método do equilíbrio limite com base na formulação de Bishop.

Para ambas as análises, Macari *et al.* (1996) *apud* Buback (2008) destacam que devido a heterogeneidade característica dos solos residuais, a determinação das propriedades de engenharia é normalmente problemática. Além disso, esses materiais quando próximos a superfície são facilmente afetados pela precipitação e infiltração da água, provocando uma rápida mudança na resistência dos solos, tornando-os altamente variáveis.

Dessa forma, procedeu-se também uma análise paramétrica a fim de se verificar a influência de fatores como poropressão inicial, poropressão máxima, coesão e ângulo de atrito nos resultados obtidos.

Durante o processo de modelagem numérica, seguiram-se práticas recomendadas no manual do *software*, esquematizadas na Figura 31, a fim de se desenvolver sensibilidade em relação aos resultados obtidos.

Figura 31 – Sequência executiva do processo de modelagem numérica



Fonte: Modificado de GEO-SLOPE (2012)

Como exemplificado na Figura 31, inicialmente supõe-se o resultado que se espera obter (1), quais são os valores limitantes dos parâmetros geotécnicos e as

situações que corresponderiam à realidade. Em seguida, simplifica-se a geometria do talude (2), objetiva-se assim permitir a interpretação e aquisição correta de dados. Um modelo muito complexo pode dificultar e até impedir estes processos.

A estimativa das condições de contorno (3), parâmetros geotécnicos a serem obtidos (5) e os iniciais (6) deve estar sempre alinhada com a execução de diversos experimentos numéricos (4) com objetivo de calibração do modelo. Nessa etapa, atenta-se ao número de iterações e especificação da malha que melhor se adequa ao problema correspondente.

Por fim, questionam-se os resultados obtidos (7) e os comparam com aqueles esperados (8). No caso de grande divergência, volta-se para o passo (4). Além disso, destaca-se a necessidade de se confrontar os resultados com o que acontece ou aconteceu em campo (9). Prováveis fatores externos que possam influenciar na criação de zonas de instabilidade como canaletas de drenagem subdimensionadas, cobertura vegetal, dentre outros.

4 RESULTADOS

4.1 ENSAIO DE PERDA AO FOGO

Esse ensaio foi realizado com o objetivo de verificar uniformidade em relação às amostras que definem a curva de retenção obtida para a amostra AI 13-A. No entanto, os resultados obtidos mostraram-se interessantes uma vez que são significativamente abaixo daqueles encontrados na literatura.

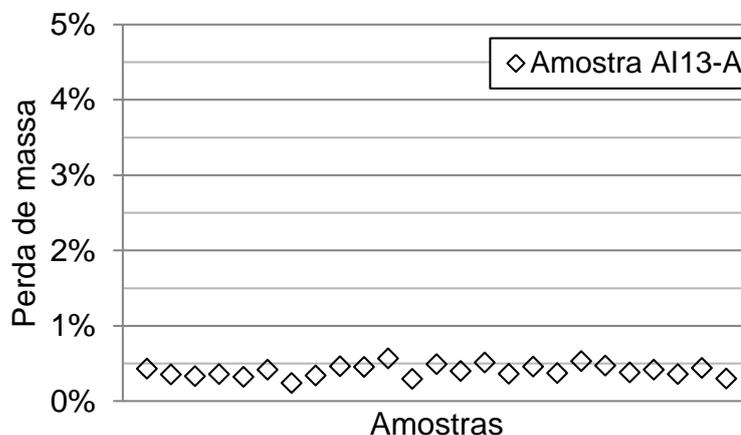
Scarin e Bernardes (2016) submeteram amostras previamente peneiradas na peneira #200 (diâmetro equivalente de 0,074 mm), a 600°C por 3 horas. Para solos residuais do período pré-cambriano da Serra da Mantiqueira, obtiveram índice de perda ao fogo (PF) em torno de 10 a 12% nos primeiros dois metros. Os valores se aproximam de 0% para amostras retiradas a 12 metros de profundidade.

Buback (2008) realizou o ensaio em amostras passadas na peneira #40 (diâmetro equivalente a 0,42 mm), submetida a 950°C por 30 minutos. As amostras foram retiradas do maciço de Tanguá (RJ) e pertencem ao período cretáceo-terciário. Os resultados obtidos foram em torno de 6 a 7% para solos residuais, e de 0,2 a 0,3% para as rochas alcalinas sãs ou pouco alteradas.

Em outro estudo realizado por Boszczowski e Ligocki (2012), os solos residuais maduros submetidos a 800°C por 24 horas mostraram perda de massa de até 25%, enquanto os solos residuais jovens, os valores foram menores que 5%.

Os valores obtidos para a amostra AI 13-A apresentaram boa consistência, com média em torno de 0,40% e desvio padrão de 0,08%, como mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Perda de massa resultante do ensaio de perda ao fogo



Fonte: A autora (2017)

Para a confirmação do resultado, foram executadas alternativas ao ensaio como, por exemplo, o aumento da temperatura de 600°C para 900°C por 5h e até por 24h. Foi também realizado o peneiramento prévio da amostra na peneira #40 (diâmetro equivalente a 42 mm). Nenhuma das alternativas alterou significativamente os resultados apresentados.

Na Figura 33 é possível observar a mudança de coloração das amostras nos três estágios, ou seja, (a) antes da queima, (b) imediatamente após a retirada da mufla e (c) após o resfriamento para pesagem.

Figura 33 – Amostras ao longo do ensaio de perda ao fogo. (a) antes da queima (b) imediatamente após a queima (c) após resfriamento.



Fonte: Autora (2017)

Esse resultado indicou, portanto, que a amostra possui baixo grau de intemperismo. A fim de verificar o resultado obtido, realizaram-se os ensaios de MEV e EDS para verificação da estrutura microscópica da amostra e a presença de compostos químicos característicos de uma amostra de solo residual pouco intemperizado.

4.2 ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DO SOLO (MEV/EDS)

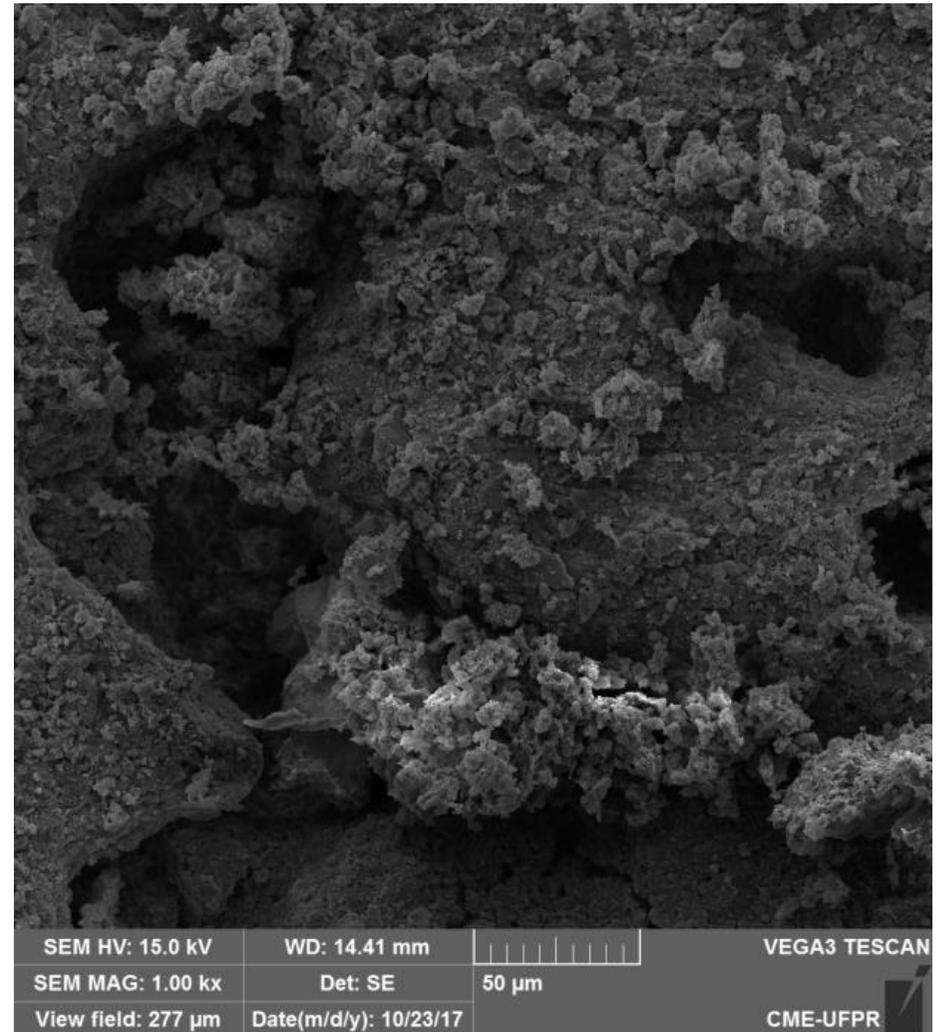
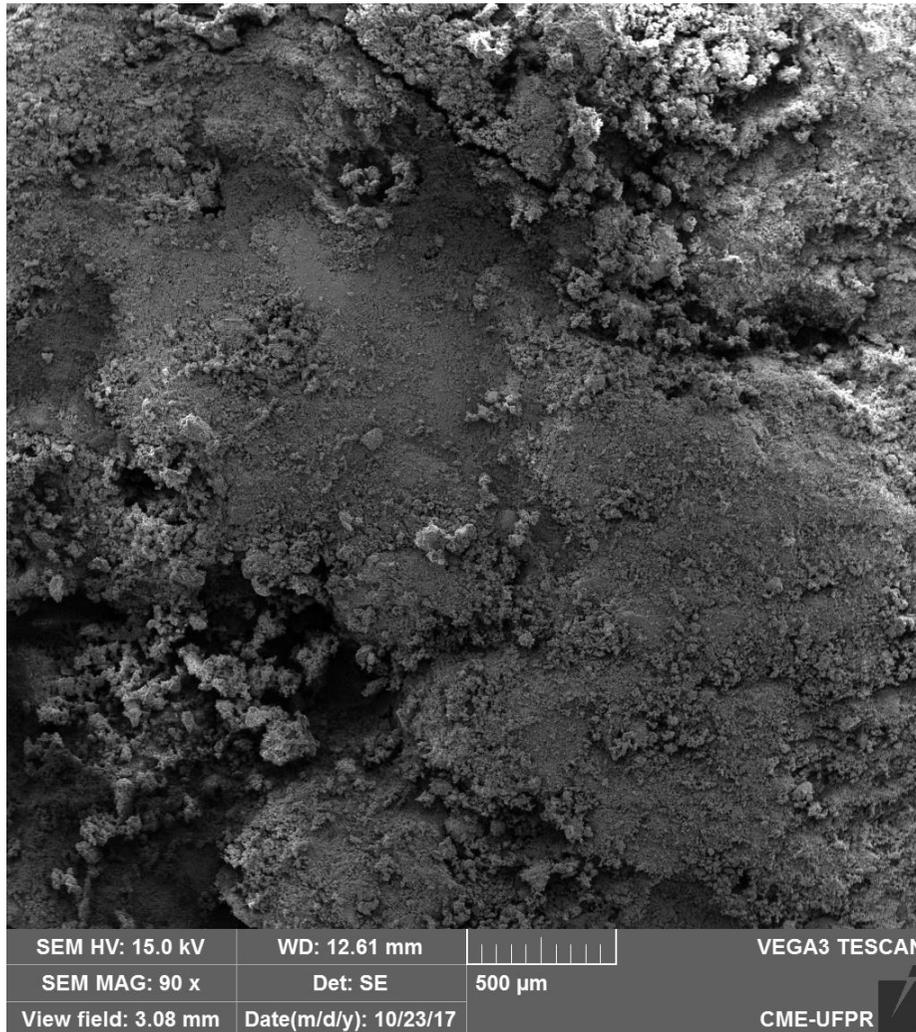
No ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi possível observar a estrutura do solo em diversos níveis de detalhamento. Foram escolhidas aproximações que permitissem a visualização de poros em diferentes proporções (500, 50, 20 e 5 μm).

A definição do tamanho de poro correspondente à macro, meso e microporos não é consenso em literatura. De acordo com Luxmoore (1981), esse fato pode levar à ambiguidade na interpretação dos resultados. Após o levantamento sobre diversos estudos e classificações existentes em âmbito internacional, Luxmoore (1981) sugere uma classificação de tamanho de poros baseada no comportamento da água e calculada por meio da equação de aumento da tensão capilar superficial desenvolvida por Marshall (1959).

Dessa forma, segundo Luxmoore (1981), microporos possuem diâmetros inferiores a 10 μm ; mesoporos, entre 10 e 1000 μm ; e, macroporos acima de 1000 μm . Por outro lado, a nível nacional, Embrapa (2011) classifica macroporos como sendo partículas de diâmetro superior a 50 μm .

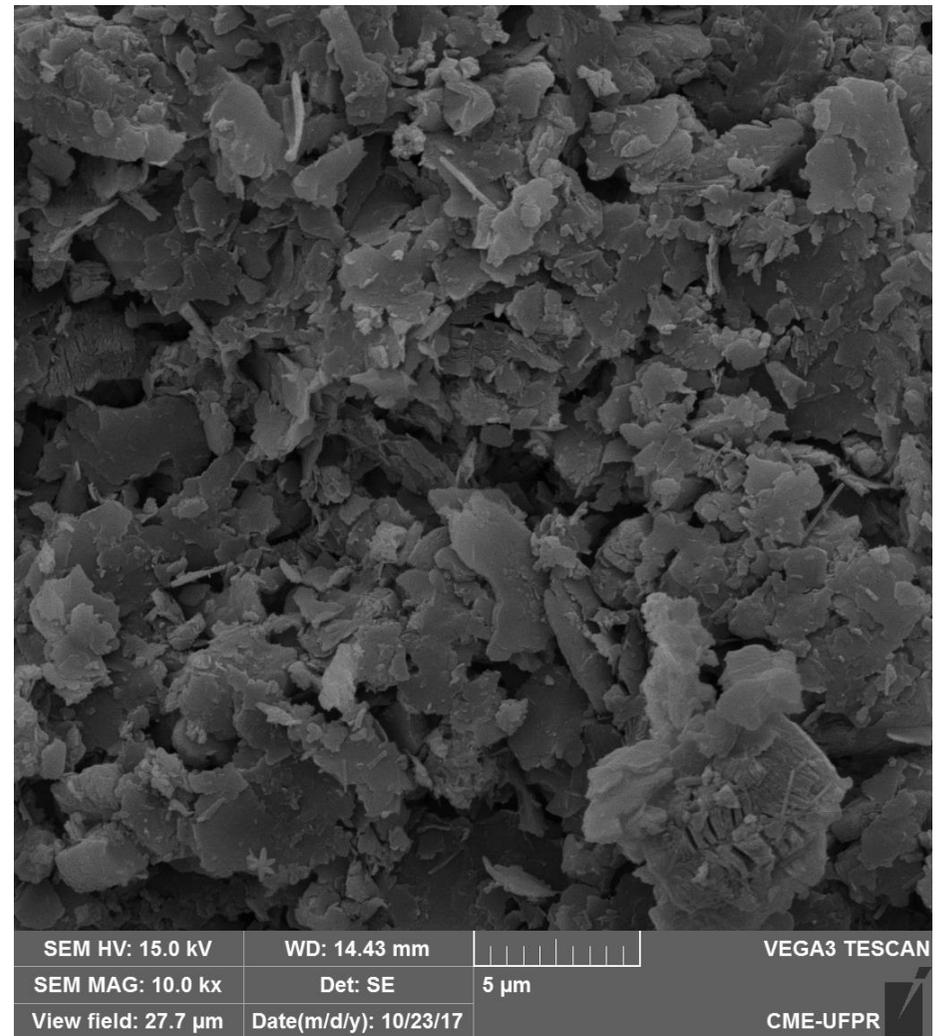
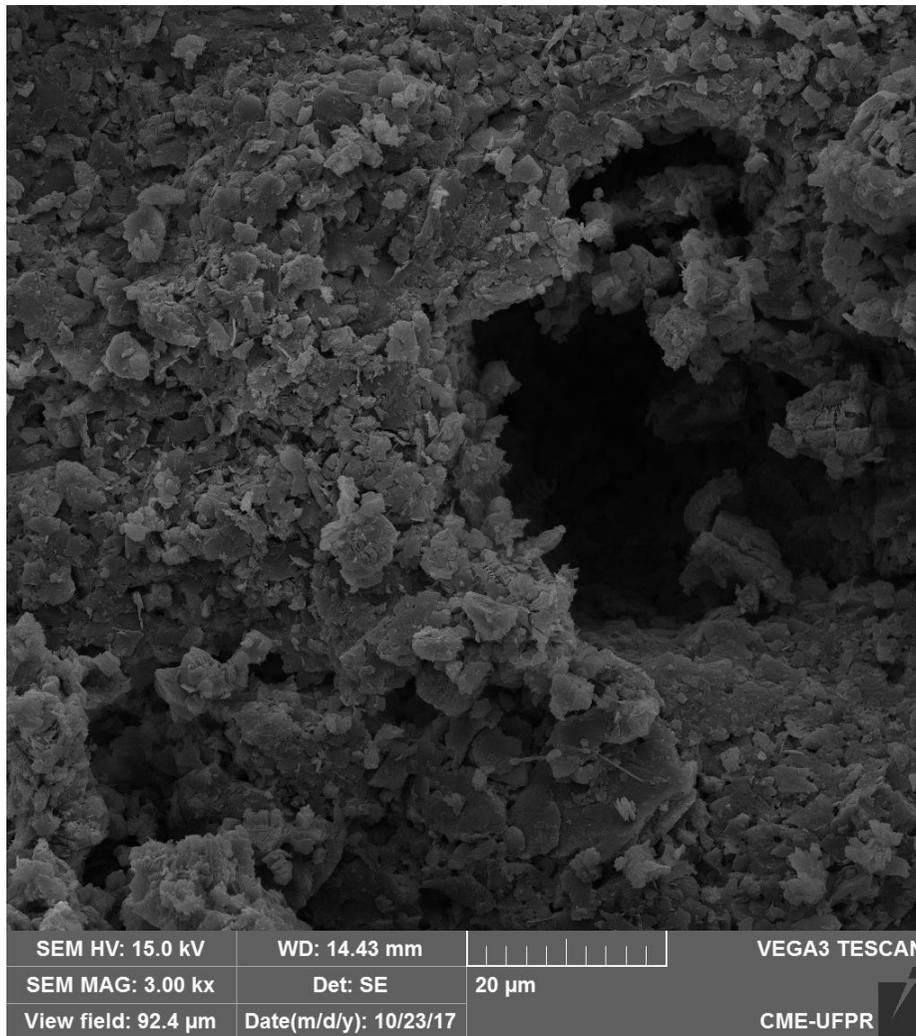
Nas Figuras 34 e 35 é possível observar a distribuição dos poros e das partículas. Além disso, nota-se uma distribuição em grumos, característico de um solo residual. A definição estabelecida por Carvalho (2012) sintetiza de forma coerente o que pode ser observado nas imagens obtidas pelo MEV: os solos residuais são compostos por grãos, agregados e cristais de minerais alterados, pontes estabelecidas por cimentos depositados, grumos de argilominerais e partículas de resistência variada, com uma tendência à quebra e/ou desarranjo quando submetidos a carregamentos, dando uma característica estruturada a estes solos.

Figura 34 – Microscópica eletrônica com aumentos de 90 e 1000 vezes, respectivamente



Fonte: A autora (2017)

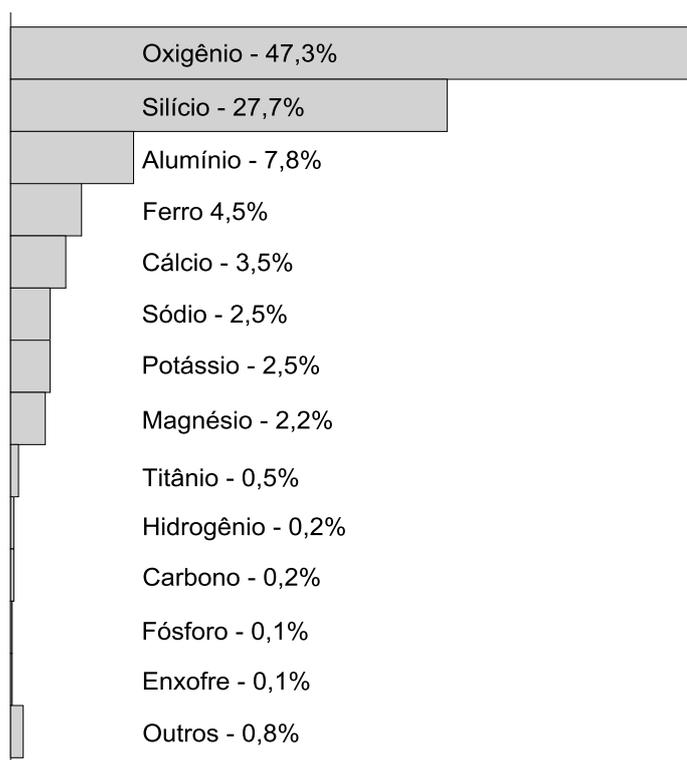
Figura 35 – Microscópica eletrônica com aumentos de 3000 e 10000 vezes, respectivamente



Fonte: A autora (2017)

O ensaio de EDS permitiu identificar na amostra a presença dos principais elementos químicos encontrados na crosta terrestre por Clarke (1920) *apud* Mitchell (1976). Os elementos estão apresentados na Figura 36 com suas respectivas proporções, as quais são por vezes muito similares às encontradas no ensaio.

Figura 36 – Composição da crosta terrestre



Fonte: Adaptado de Clarke (1920) *apud* Mitchell (1976)

Para o entendimento completo do mapeamento da composição química do solo, é necessária uma análise concomitante em macro e microescalas. Dessa forma, além dos resultados do ensaio EDS apresentados nas Figuras 38 a 40, apresenta-se também na Figura 41 fotos obtidas durante o ensaio de sucção, na qual é possível observar a estrutura indeformada do solo em diversos ângulos.

Pela análise, a presença de ferro indicada no resultado do ensaio é decorrente da composição do mineral biotita (um tipo de mica, de coloração preta). A composição da biotita, expressa por Waichel (2012), é $K(Fe, Mg)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$. Outro mineral que pode ser visto macroscopicamente é a caulinita - alteração do feldspato - que é expresso como $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, como descrito por Machado (2017). Este fato justifica, portanto, a alta presença de silício e alumínio.

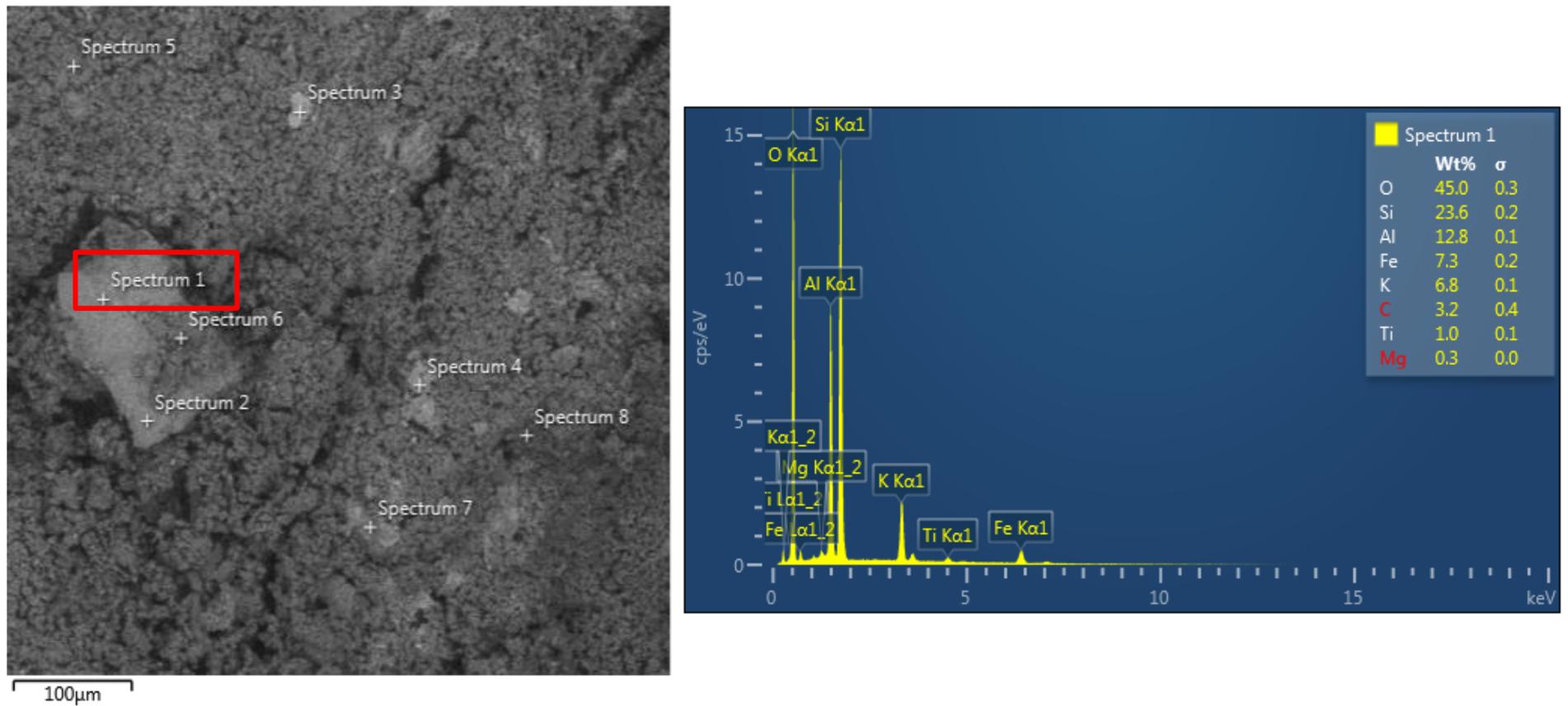
Conclui-se, portanto, que os componentes químicos como ferro e alumínio não estão ligados diretamente apenas aos produtos do intemperismo, mas também a composição da rocha a qual deu origem ao respectivo solo. No caso da amostra AI-13A, pode-se dizer que a característica principal que define o solo como residual, ou seja, a similaridade com a estrutura da rocha sã, nesse caso o gnaiss/migmatito, é ainda muito presente como observado na Figura 41. Nela podemos observar o possível bandamento da estrutura, característica inerente dessa rocha, como ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Estrutura bandada da rocha migmatito



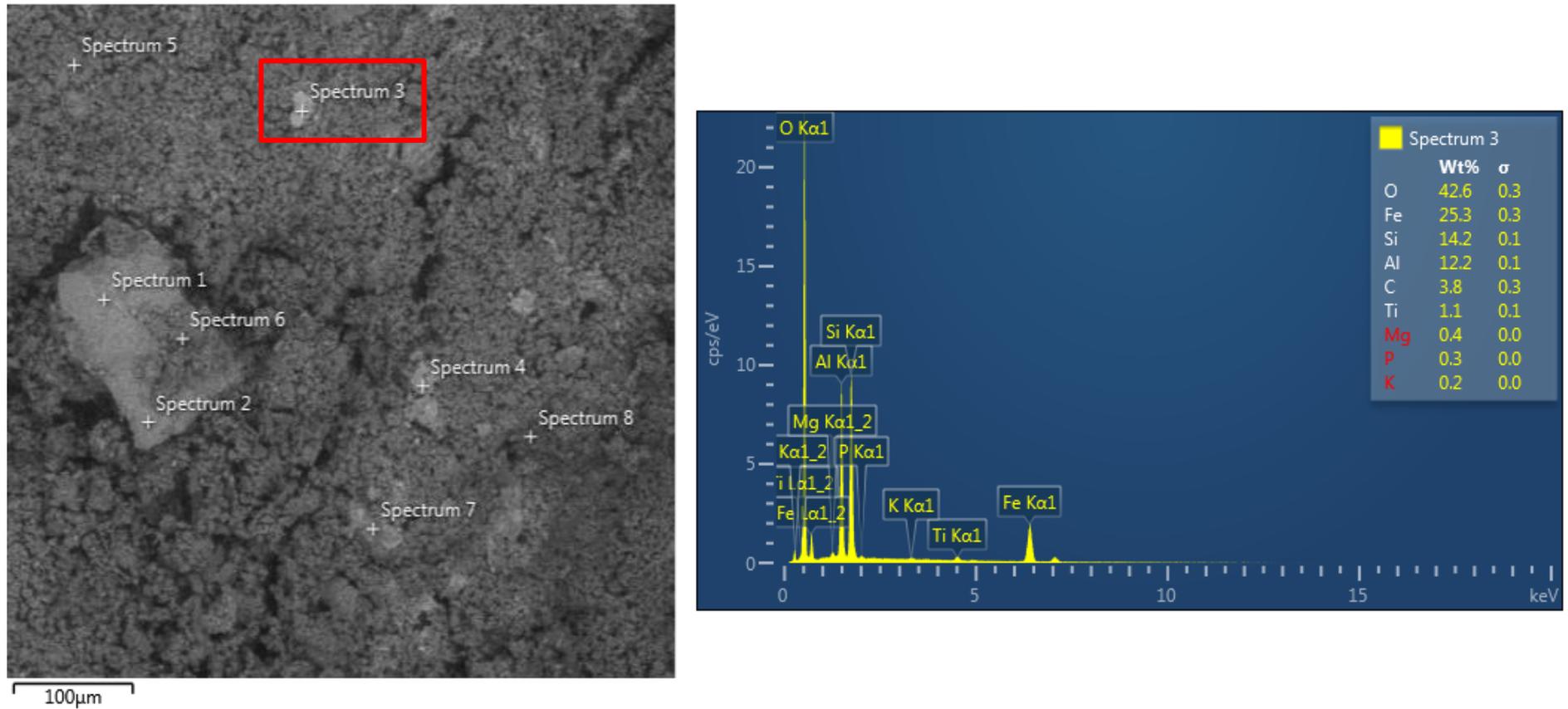
Fonte: Machado (2017)

Figura 38 – Resultado do EDS para o Spectrum 1 da amostra AI-13A



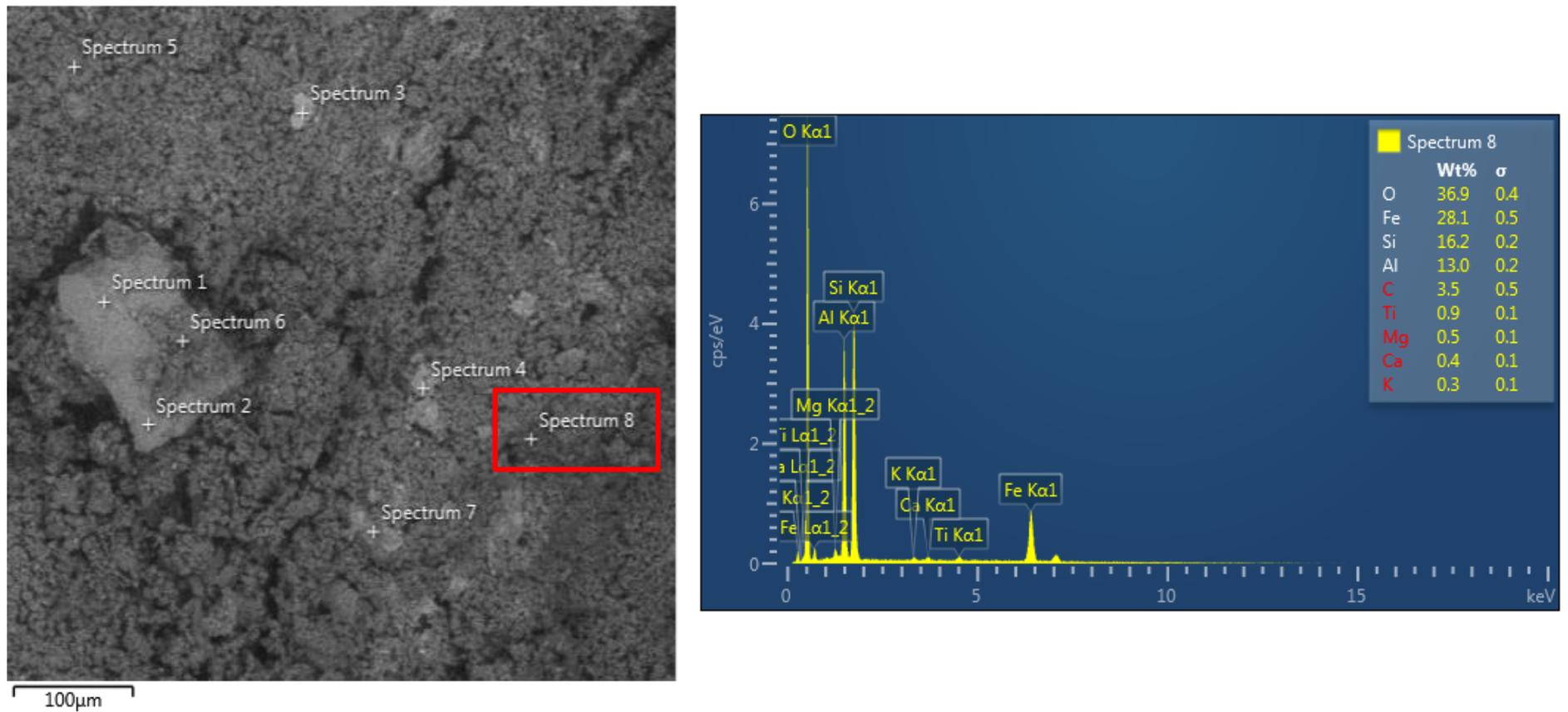
Fonte: A autora (2017)

Figura 39 – Resultado do EDS para o Spectrum 3 da amostra Al-13A



Fonte: A autora (2017)

Figura 40 – Resultado do EDS para o Spectrum 8 da amostra Al-13A



Fonte: A autora (2017)

Figura 41 – Estrutura indeformada do solo em macroescala



Fonte: A autora (2017)

4.3 CURVA DE RETENÇÃO

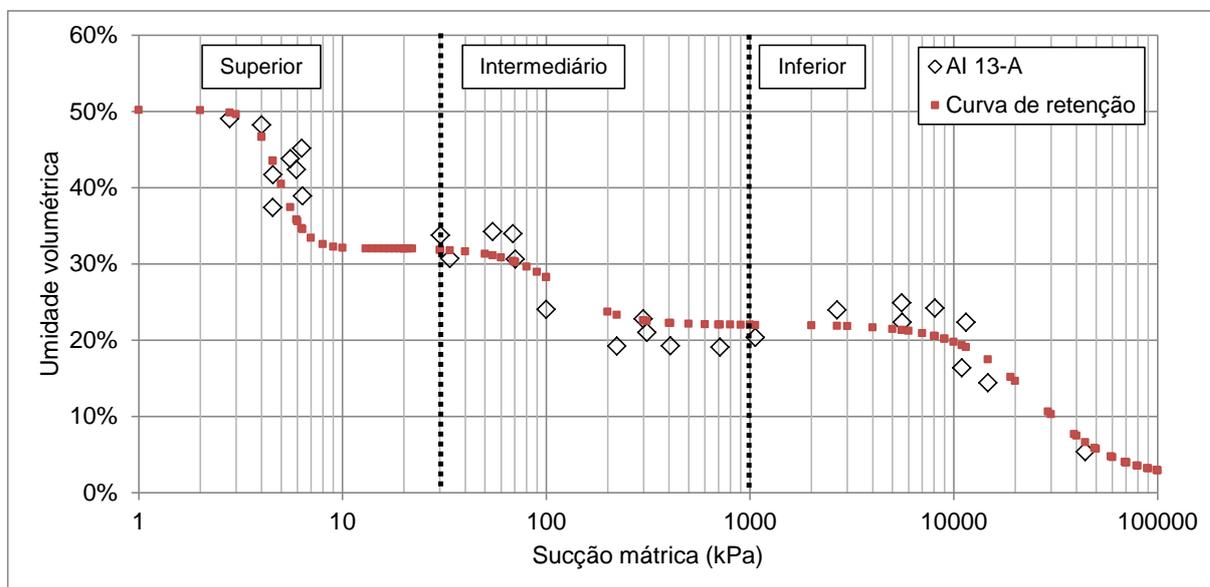
A curva de retenção obtida através do ensaio de papel filtro para a amostra AI 13-A é apresentada na Figura 42. Observa-se a existência de dois patamares que caracterizam a distribuição tri-modal dos poros. Devido a essa característica, não é possível adequá-la às relações empíricas consagradas na literatura, uma vez que essas apresentam caráter uni-modal.

Dessa forma, a curva de retenção é definida matematicamente por três equações (Equação 12 a Equação 14), divididas nos intervalos de patamares de sucção de 0 a 30 kPa, de 30 a 1000 kPa e de 1000 a 100000 kPa. Todas as equações derivam da formulação genérica denominada “Harris + c” apresentada na Equação 11, onde A, B, C e D são parâmetros de ajuste, os quais foram adequados para cada uma das partes da curva e encontrados com auxílio do *software* denominado LABFIT, desenvolvido por Silva *et al.* (2004).

$$Y = \frac{1}{A + BX^C} + D$$

Equação 11

Figura 42 – Curva de retenção em função da umidade volumétrica



Fonte: A autora (2017)

Na parte superior (0 a 30 kPa), tem-se a Equação 12:

$$Y = \frac{1}{5,5 + 8 \times 10^{-5} X^7} + 0,32$$

Equação 12

Na parte intermediária (30 a 1.000 kPa), tem-se a Equação 13:

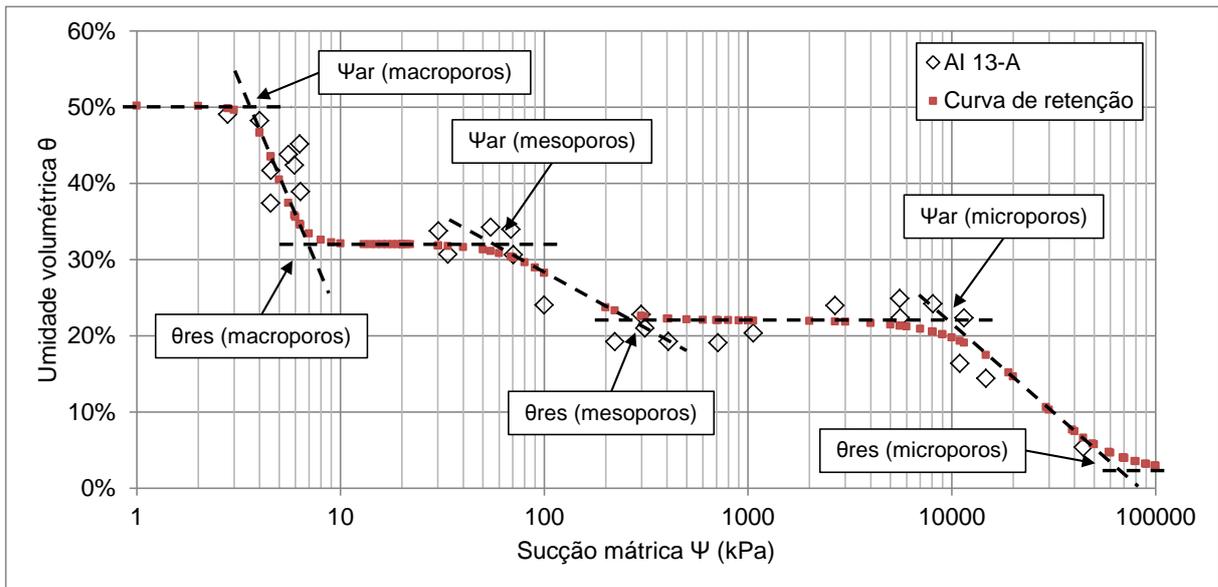
$$Y = \frac{1}{10 + 6 \times 10^{-6} X^3} + 0,22 \quad \text{Equação 13}$$

Na parte inferior (1.000 a 100.000 kPa), tem-se a Equação 14:

$$Y = \frac{1}{5 + 10^{-9} X^{2,2}} + 0,02 \quad \text{Equação 14}$$

Através da análise da curva de retenção é possível definir os teores de umidade residuais e as pressões de entrada de ar nos diversos poros. Todos os valores estão apresentados na Figura 43 e Tabela 17.

Figura 43 – Curva de retenção contendo definições



Fonte: A autora (2017)

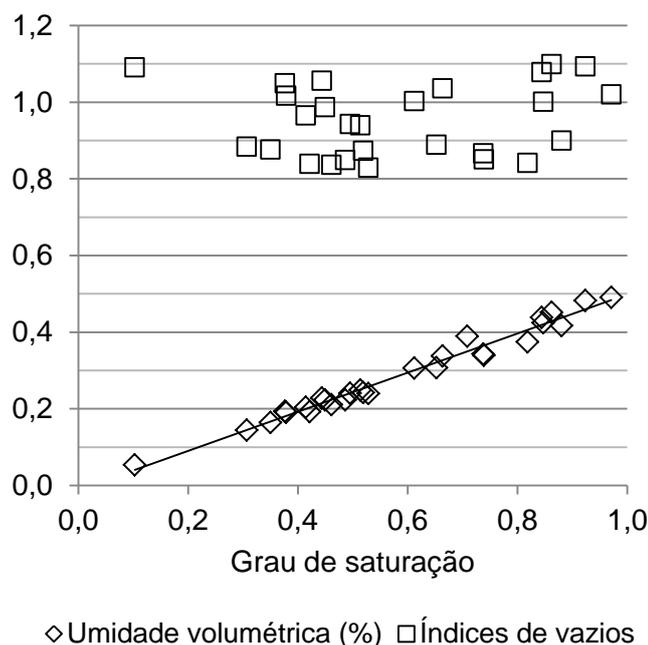
Tabela 17 – Pressões de entrada de ar e teores de umidade residual para cada tipo de poro

| POROS | PRESSÃO DE ENTRADA DE AR (Ψ_{ar}) | TEOR DE UMIDADE RESIDUAL (θ_{res}) |
|------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Macroporos | 3,8 kPa | 32% |
| Mesoporos | 55 kPa | 22% |
| Microporos | 10.000 kPa | 3% |

Fonte: A autora (2017)

Por meio da análise dos dados obtidos no ensaio de sucção ainda é possível obter a correlação entre grau de saturação das amostras e seus respectivos índices de vazio e umidades volumétricas, como mostrado na Figura 44. Dessa forma, a umidade volumétrica de saturação é de aproximadamente 50%, valor que pode ser observado também como ponto da curva de retenção, quando a sucção é igual a 1 kPa.

Figura 44 – Correlação entre grau de saturação e umidade volumétrica e índice de vazios



Fonte: A autora (2017)

Além disso, pela análise da Figura 44 percebe-se que há certa variação do índice de vazios entre as amostras. No entanto, considerando a heterogeneidade inerente da amostra, essa variação não é significativa e corrobora a representatividade da curva de retenção.

4.4 ANÁLISE HIDROMECÂNICA

Rahardjo, Leong e Rezaur (2008), ao estudarem a influência da chuva tropical antecedente na distribuição de poropressões de um talude composto por solo residual, concluíram que o valor da poropressão anterior ao evento de chuva intensa, provocada pela intensidade da chuva antecedente exerce papel determinante na condição de estabilidade do talude.

Dessa forma, para a análise de fluxo e estabilidade, foram definidos três cenários. Estes têm por base o período mais chuvoso registrado, entre os dias 29/12/2015 a 02/01/2016, e respectivas condições iniciais estabelecidas, a fim de propiciar diferentes valores de poropressão antecedente à chuva intensa.

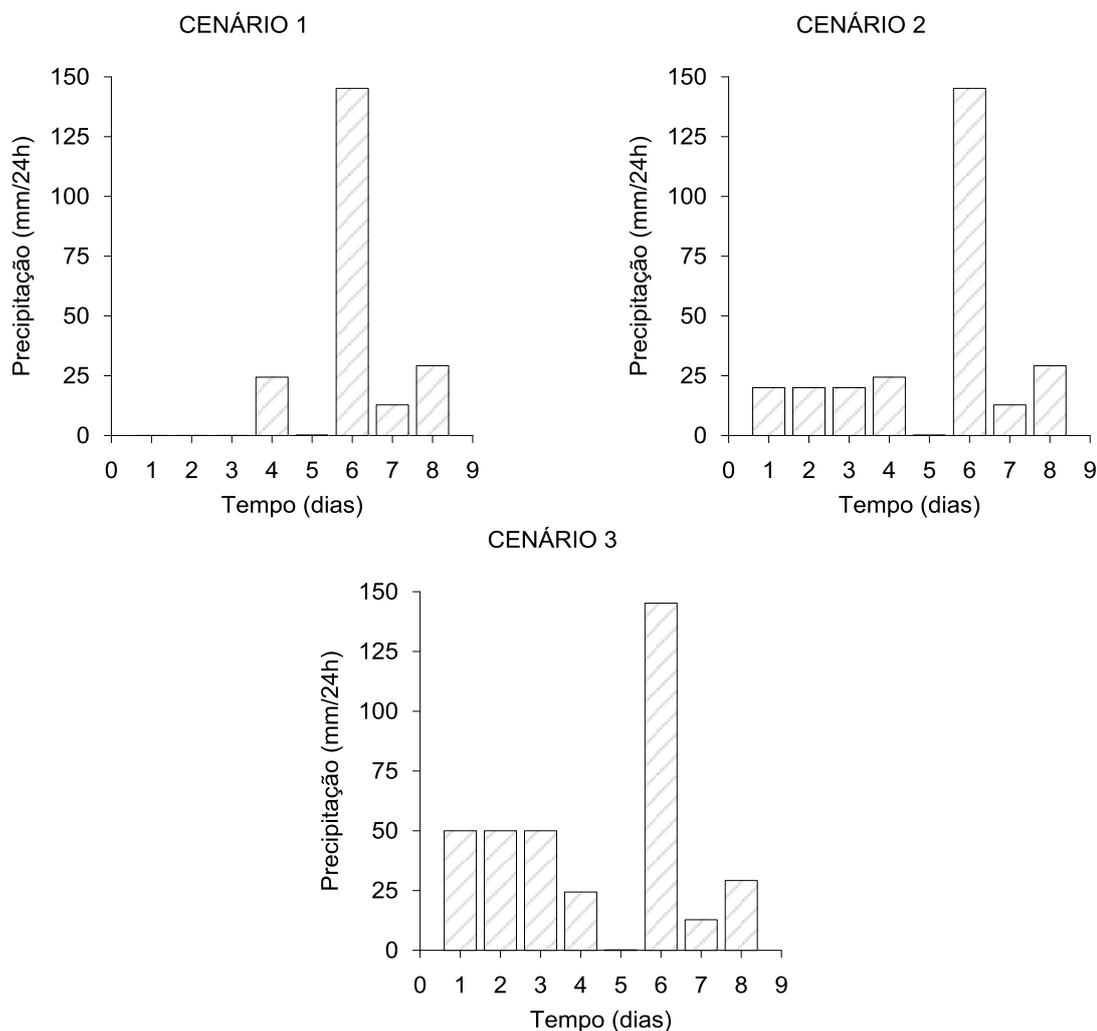
Os cenários são detalhados na Tabela 18 e ilustrados na Figura 45. O CENÁRIO 1 corresponde a chuva original antecedida por 3 dias sem chuva. Já no CENÁRIO 2, a chuva constante diária antecedente é igual a 20 mm. Por fim, no CENÁRIO 3, essa chuva equivale a 50 mm.

Tabela 18 – Cenários de precipitação considerados na análise numérica

| DIA | DATA | PRECIPITAÇÃO DIÁRIA (mm) | | |
|-----|------------------|--------------------------|-----------|-----------|
| | | CENÁRIO 1 | CENÁRIO 2 | CENÁRIO 3 |
| 1 | | 0 | 20 | 50 |
| 2 | Condição inicial | 0 | 20 | 50 |
| 3 | | 0 | 20 | 50 |
| 4 | 29/12/2015 | 24,4 | 24,4 | 24,4 |
| 5 | 30/12/2015 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 6 | 31/12/2015 | 145,2 | 145,2 | 145,2 |
| 7 | 01/01/2016 | 12,8 | 12,8 | 12,8 |
| 8 | 02/01/2016 | 29,2 | 29,2 | 29,2 |

Fonte: A autora (2017)

Figura 45 – Cenários de precipitação considerados na análise numérica



Fonte: A autora (2017)

4.4.1 ANÁLISE DE FLUXO

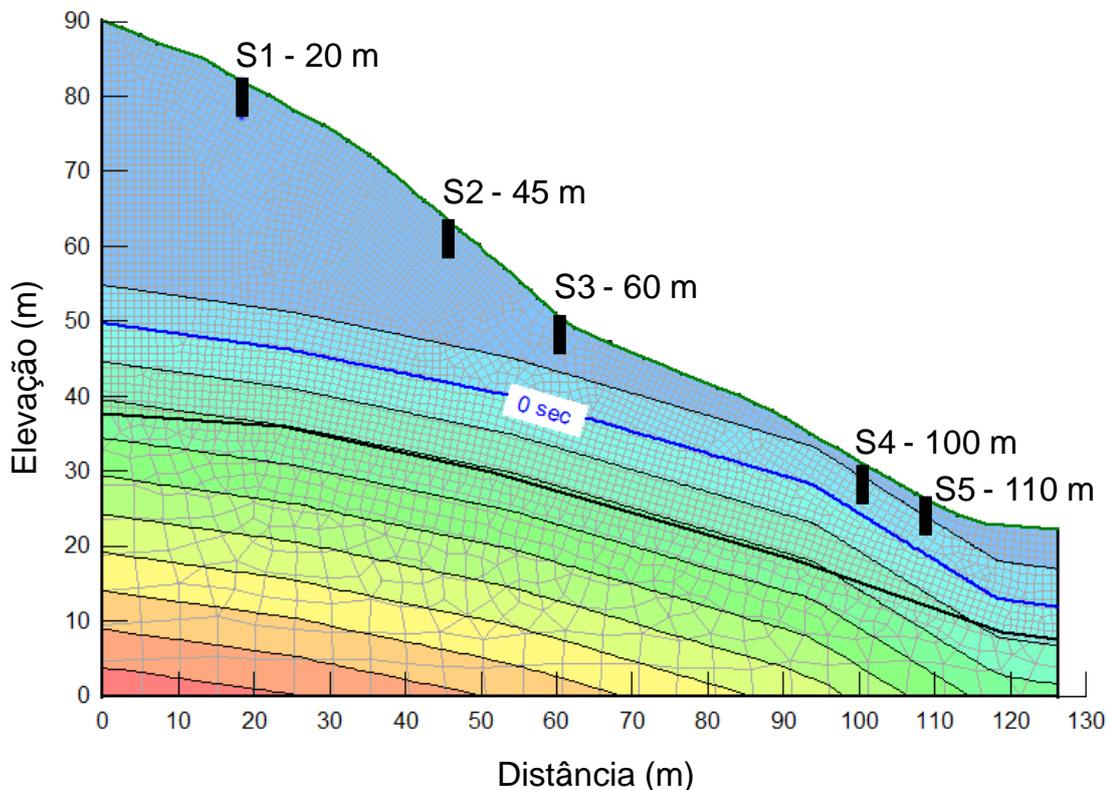
Para análise de fluxo foram realizadas algumas considerações importantes que possibilitaram resultados mais coerentes e confiáveis. São elas:

- Análise de fluxo transiente;
- Número máximo de iterações para convergência: 2000;
- Tolerância de divergência: 0,1;
- Tempos de análise: 6 etapas de 86400 s (1 dia) em 0 a 691200 s (8 dias);
- Condição inicial de poropressão: interpolação linear a partir da linha freática (poropressão igual a 0 kPa);
- Discretização da malha: 0,5 m na primeira camada (superior) e 3 m na segunda (inferior);

- Condição de contorno à montante: pressão de 50 m.c.a.;
- Condição de contorno à jusante: pressão de 12 m.c.a.;
- Máxima poropressão negativa: 100 kPa. Este valor justifica-se, pois:
 - Corresponde à sucção equivalente à umidade natural, segundo a curva de retenção estimada para amostra;
 - Garante que os resultados obtidos de variação de poropressão sejam exclusivamente devido à precipitação aplicada no modelo;
 - Correspondem a valores máximos registrados por equipamentos de campo como os tensiômetros.

Foram escolhidas cinco seções, representadas na Figura 46, para análise da variação de poropressão nos respectivos cenários de chuva detalhados anteriormente. Essas seções visam à representação nos diferentes ângulos de inclinação e distanciamento do lençol freático ao longo do talude. As distâncias destacadas para cada seção são referentes ao deslocamento em relação à origem do plano cartesiano que define o talude.

Figura 46 – Seções para análise da variação da poropressão



Fonte: A autora (2017)

As Figuras 47 a 49 apresentam a variação da poropressão nas cinco seções, em até 5 metros de profundidade, nos três cenários correspondentes.

No CENÁRIO 1, nas seções S1, S2 e S3, a infiltração ocorre apenas até 3 metros de profundidade. Já nas seções S4 e S5, a infiltração é até pouco mais de 5 metros. Não ocorre saturação completa no primeiro metro da camada de solo, a exceção das seções S4 e S5, quando isso ocorre ao final do 7º dia.

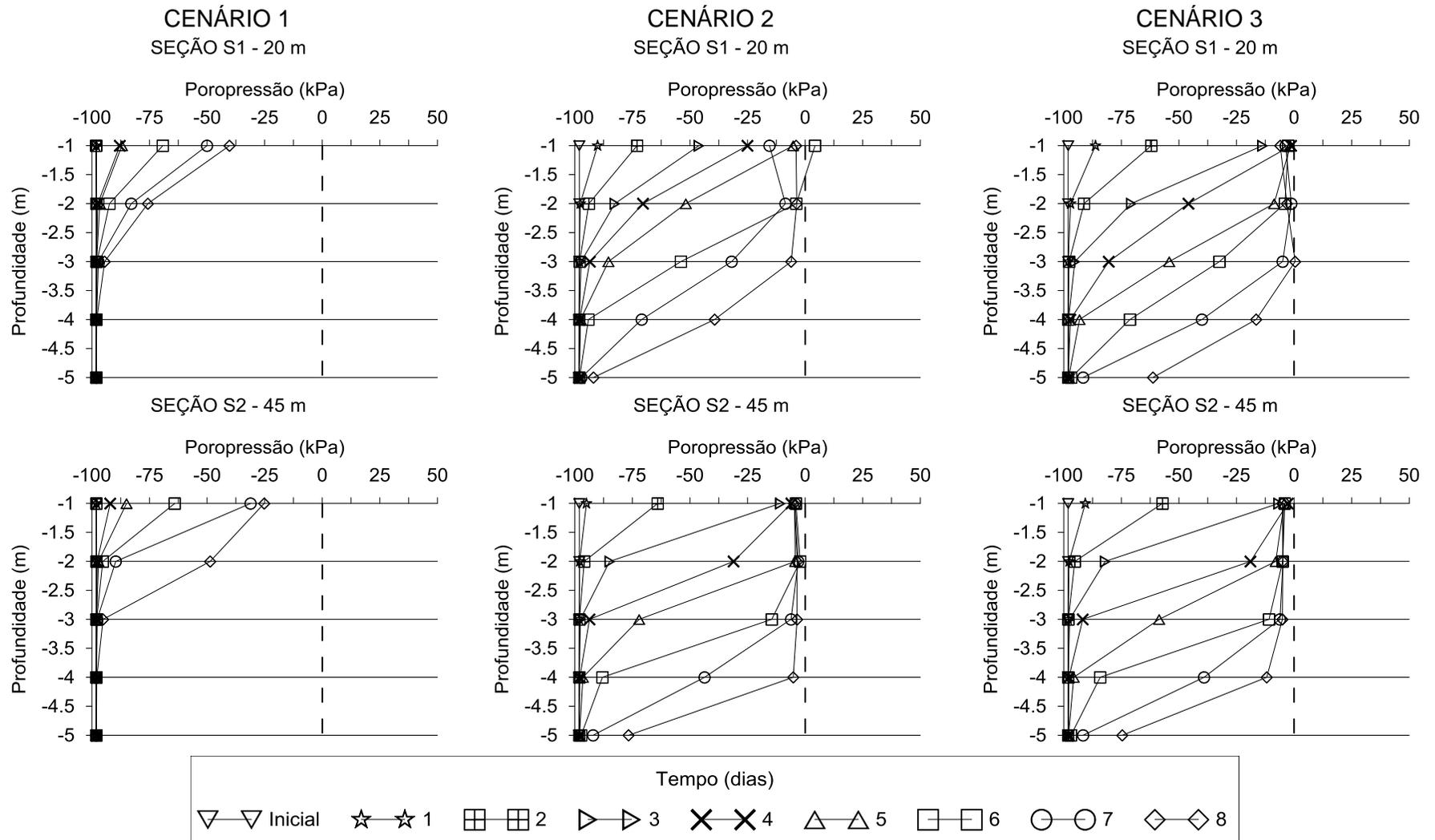
No CENÁRIO 2, a infiltração é de até 5 metros na seção S1 e alcança profundidades maiores nas outras seções (S2, S3, S4 e S5). O primeiro metro de camada de solo fica completamente saturado no 6º dia de análise na seção S1. Por outro lado, não ocorre saturação completa da primeira camada na seção S2. Já na seção S3, essa saturação ocorre entre os dias 5º e 6º. Por fim, o fluxo de água promove a saturação completa do primeiro um metro de solo nas seções S4 e S5 no 7º dia de análise.

No CENÁRIO 3, a infiltração alcança profundidades superiores a 5 metros em todas as seções analisadas. Além disso, na seção S1, o primeiro metro de camada de solo fica próximo à completa saturação no 4º dia, enquanto que nas outras seções esse período é reduzido para 3º dias.

Nota-se que, em relação à formação de coluna d'água, ou seja, saturação completa do solo acima do ponto analisado, esta ocorre em alguns momentos como nas seções S4 e S5 do CENÁRIO 3 (Figuras 48 e 49). Neste caso, ao final da análise, houve um acúmulo próximo a 1,25 metros de coluna d'água a uma profundidade de 5 metros.

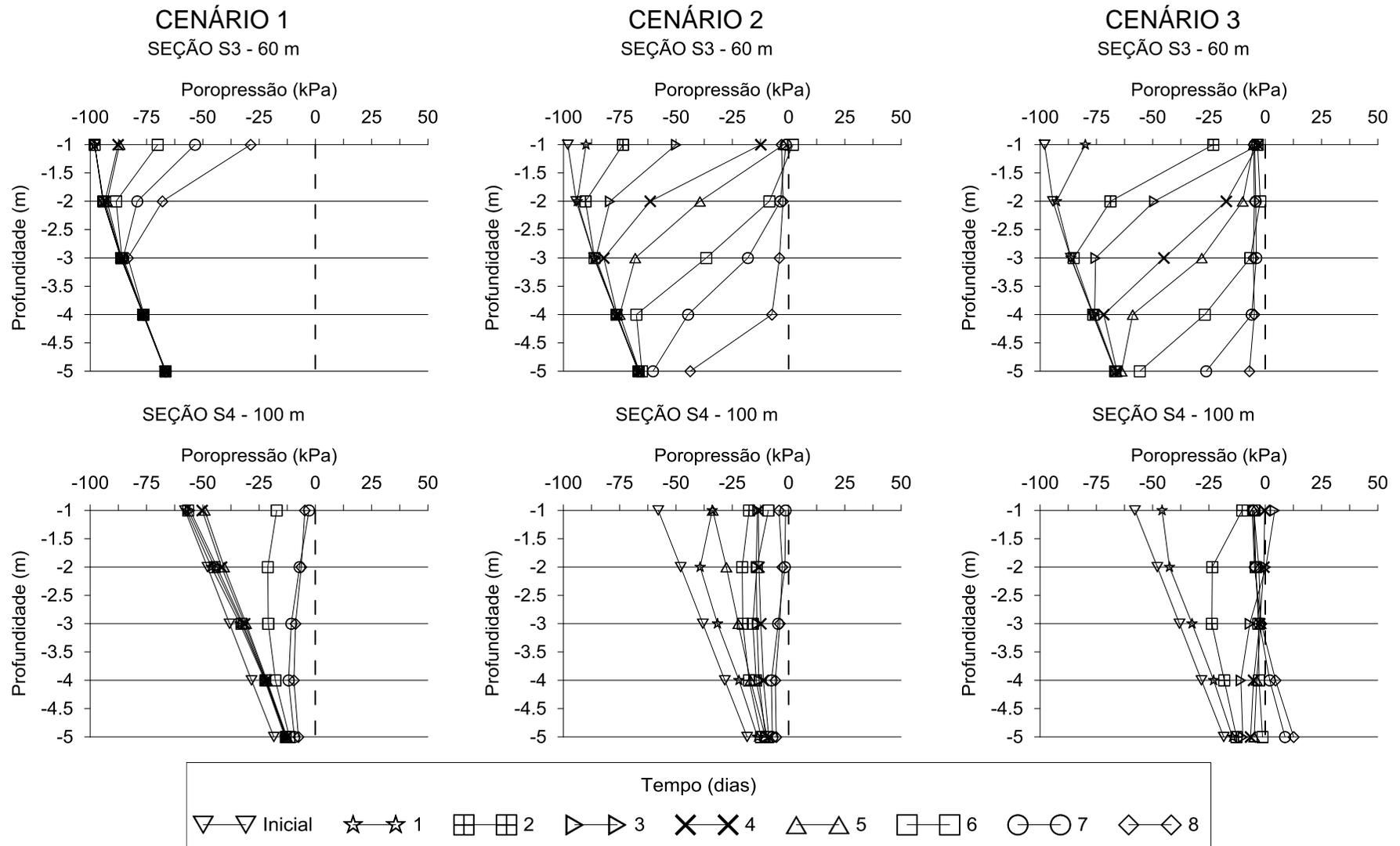
O detalhamento dos valores de poropressão, ao longo do tempo, nos três cenários correspondentes a cada seção analisada, encontra-se no Apêndice 3 apresentado ao final deste trabalho.

Figura 47 – Poropressões nas seções S1 e S2 relativas aos CENÁRIOS 1, 2 e 3



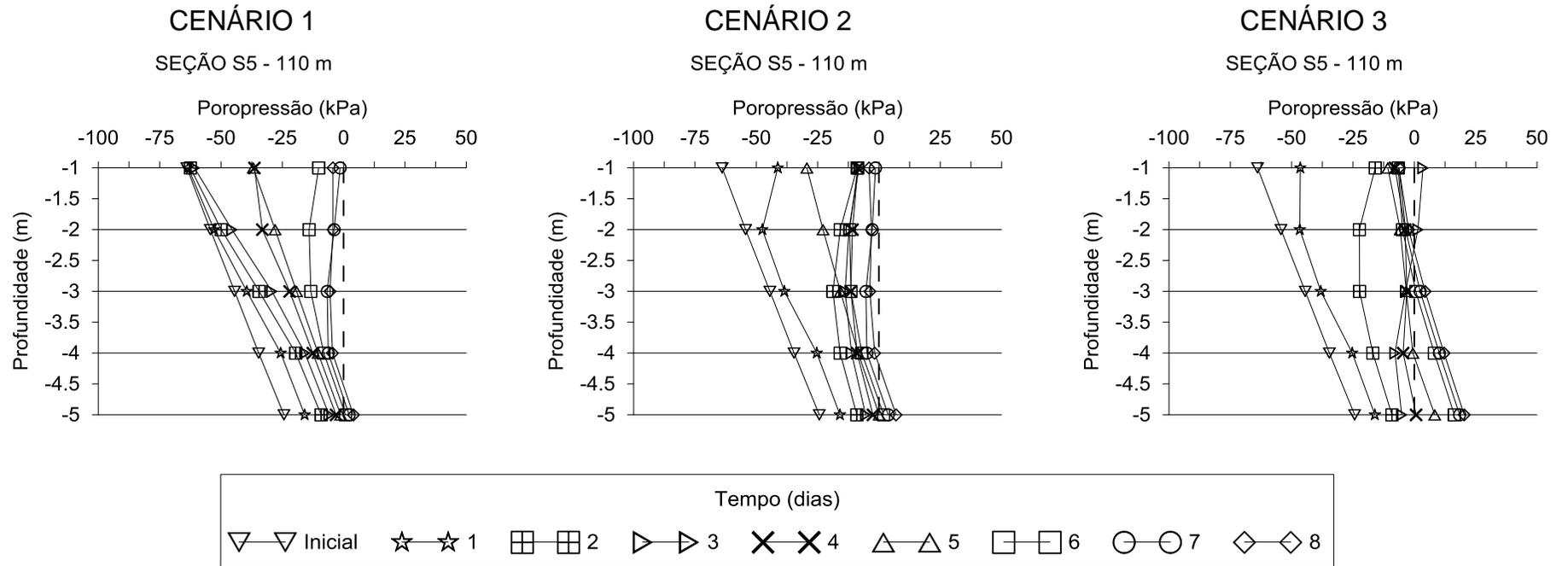
Fonte: A autora (2017)

Figura 48 – Poropressões nas seções S3 e S4 relativas aos CENÁRIOS 1, 2 e 3



Fonte: A autora (2017)

Figura 49 – Poropressões na seção S5 relativas aos CENÁRIOS 1, 2 e 3



Fonte: A autora (2017)

4.4.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Para a análise de estabilidade, foram feitas as seguintes considerações ao longo da modelagem numérica:

- Método de análise da estabilidade de talude: Bishop;
- Definição da superfície de ruptura: dimensão máxima igual a 10 metros e mínima, 1 metro;
- Análise determinística em relação ao fator de segurança;
- Número máximo de fatias: 50;
- Número máximo de iterações para convergência: 2000;
- Tolerância de divergência: 10^{-7} .

A análise de estabilidade sucedeu-se para cada cenário de chuva por meio da variação do ângulo de atrito, uma vez que a coesão considerada na camada superior foi igual a 0 kPa. Dessa forma, utilizaram-se três valores de referência para análise paramétrica do fator de segurança em relação ao ângulo de atrito da primeira camada:

- Ângulo de atrito pico: encontrado em ensaio laboratorial e igual a 38° ;
- Ângulo de atrito pico reduzido: sintetizado por Tonus (2009) por meio de diversos valores referenciados em literatura (Tabela 19) para solos residuais com características semelhantes aos da Serra do Mar paranaense.
- Ângulo de atrito mínimo: responsável pela instabilização do talude.

Tabela 19 – Análises estatísticas dos dados apresentados em literatura

| PARÂMETRO ESTATÍSTICO | ÂNGULO DE ATRITO ($^{\circ}$) |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Média | 32,33 |
| Desvio padrão | 6,73 |
| Coeficiente de variação | 21 |
| 97,5% probabilidade de ocorrência | 29 - 36 |
| Valores a serem adotados | 29 |

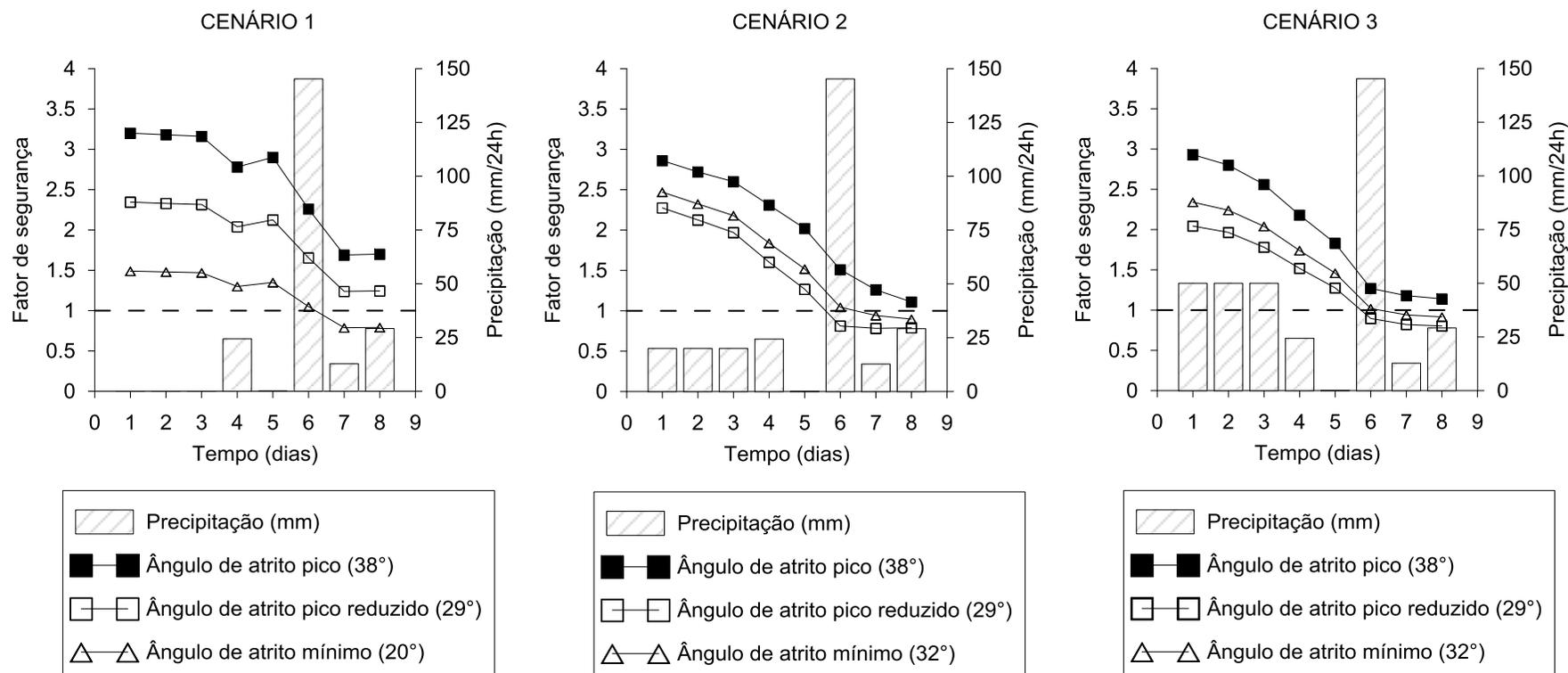
Fonte: Adaptado de Tonus (2009)

A Figura 50 apresenta a variação do fator de segurança nas diversas condições de ângulo de atrito apresentadas. Dessa forma, nota-se que o ângulo de

atrito pico reduzido já ocasionaria a ruptura nos CENÁRIOS 2 e 3. No CENÁRIO 1, a instabilidade é alcançada com a redução o ângulo de atrito a 20°. Dessa forma, faz-se necessária uma redução em torno de 47% para que ocorra a instabilidade no cenário de chuva intensa porém de curta duração. No entanto, quando precedida por valores pluviométricos moderados ou fortes, a redução necessária é de, apenas, 15%.

A variação do fator de segurança ao longo do tempo é apresentada em detalhes no Apêndice 4 encontrado ao final deste trabalho.

Figura 50 – Variação do fator de segurança com os diversos ângulos de atrito relativos à primeira camada do talude



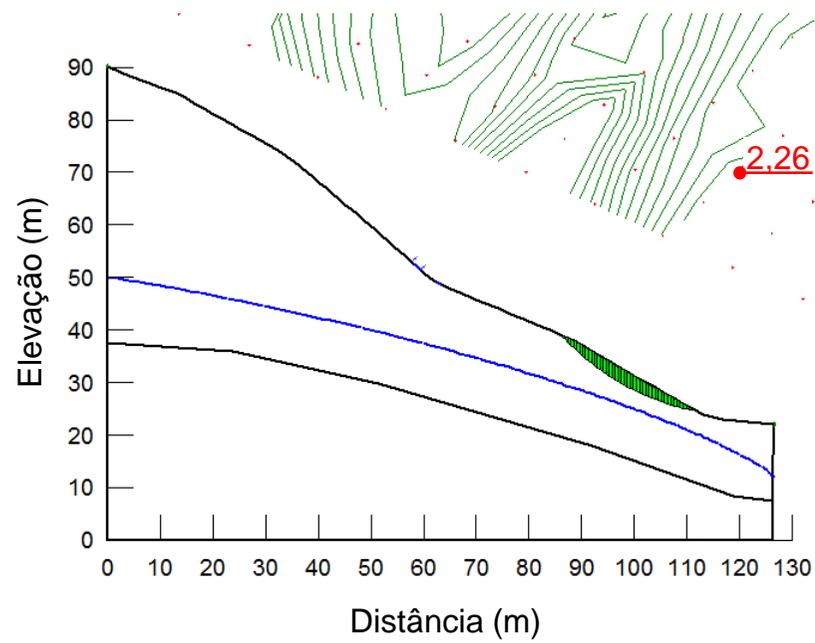
Fonte: A autora (2017)

As respectivas superfícies de ruptura são apresentas nas Figuras 51 a 53 para cada cenário, com destaque para os fatores de segurança correspondentes ao 6º dia, o qual possui o valor máximo de pluviometria associada.

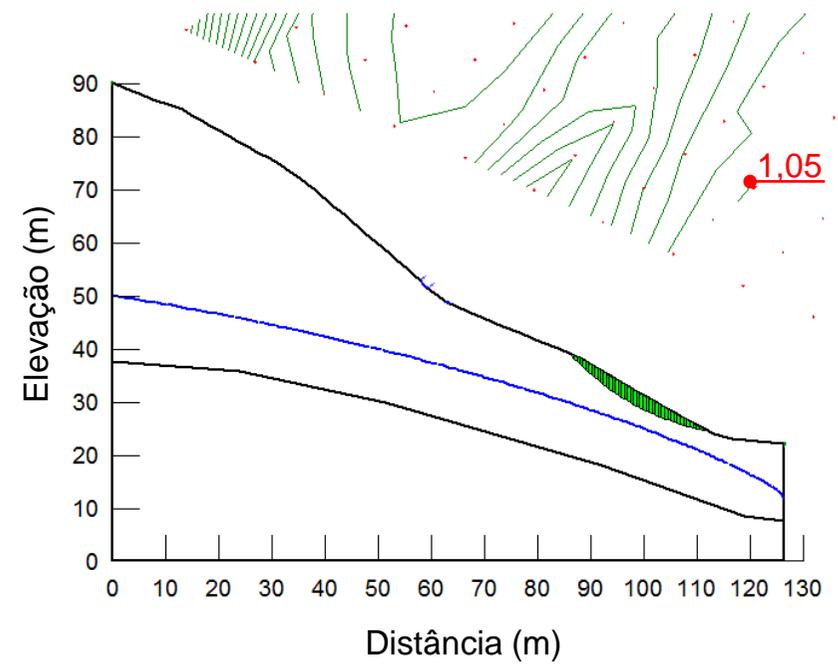
Destaca-se que a superfície de ruptura no CENÁRIO 1 encontra-se na parte mais inferior do talude, já nos CENÁRIOS 2 e 3, a superfície mais instável é a superior. Isso decorre do fato de que o intervalo de variação de poropressão à jusante do talude é muito mais baixo propiciando elevações de poropressão mais intensas que na parte superior.

Conclui-se, portanto, que a condição inicial do CENÁRIO 1, definida por um período mais seco quando comparada aos demais, não é suficiente para reduzir a sucção na parte superior do talude, culminando em uma desestabilização retrogressiva ao longo do talude, com base nos parâmetros analisados.

Figura 51 – Superfícies de ruptura no 6º dia para ângulo de atrito pico (a) e ângulo de atrito mínimo (b) no CENÁRIO 1



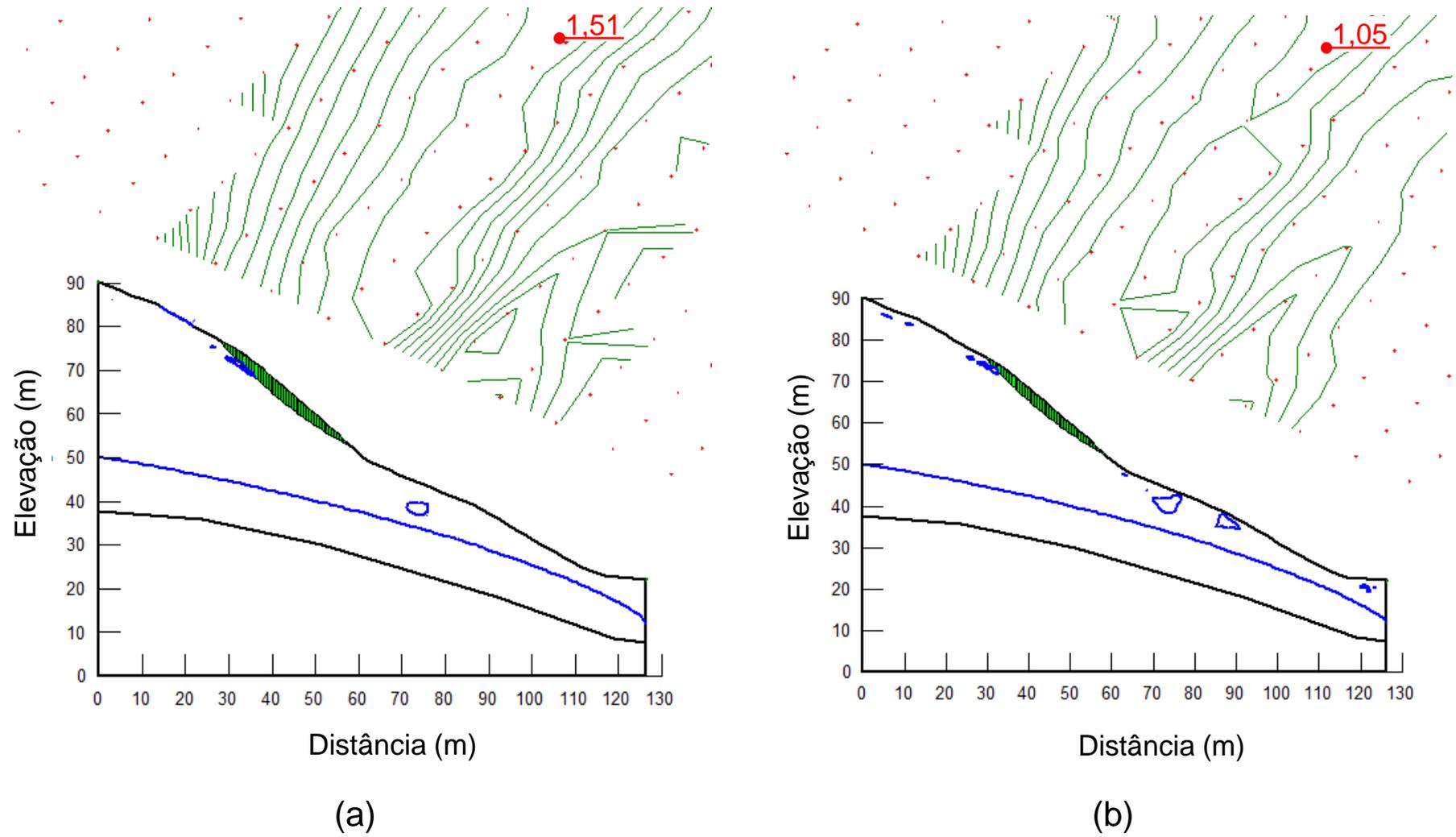
(a)



(b)

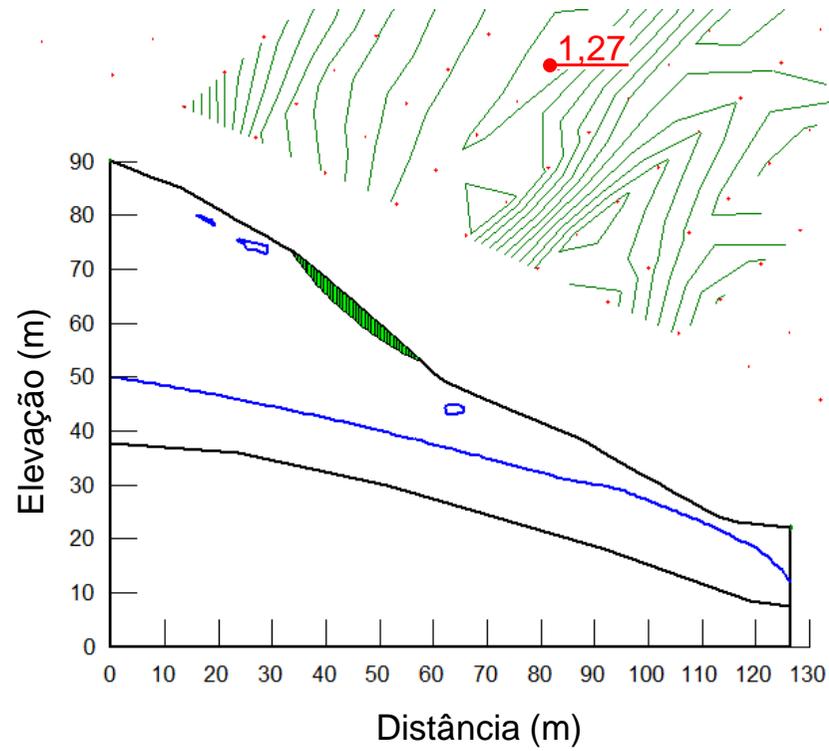
Fonte: A autora (2017)

Figura 52 – Superfícies de ruptura no 6º dia para ângulo de atrito pico (a) e ângulo de atrito mínimo (b) no CENÁRIO 2

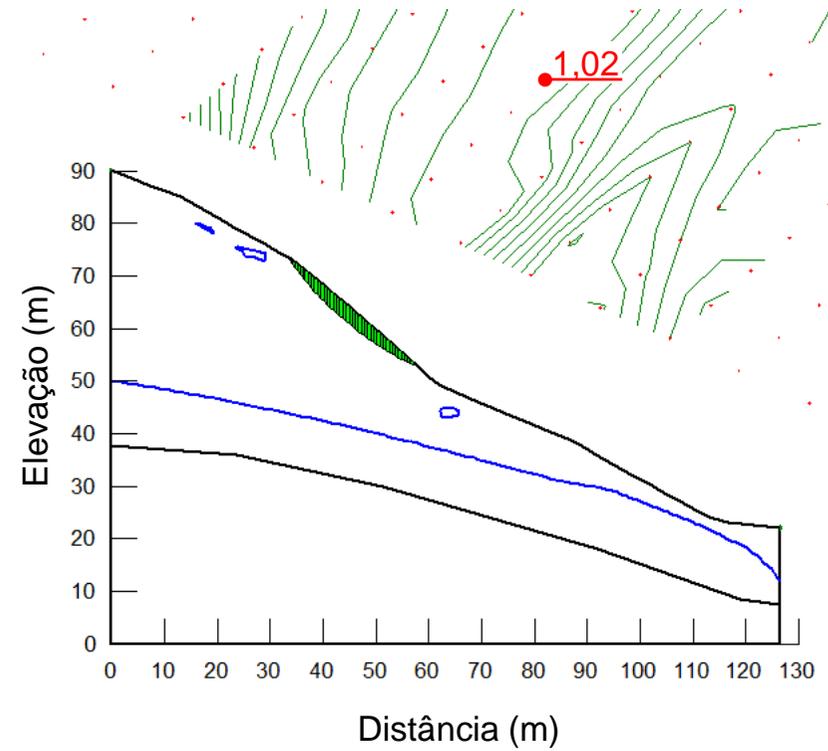


Fonte: A autora (2017)

Figura 53 – Superfícies de ruptura no 6º dia para ângulo de atrito pico (a) e ângulo de atrito mínimo (b) no CENÁRIO 3



(a)



(b)

Fonte: A autora (2017)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise hidromecânica consistiu em uma avaliação dos parâmetros hidráulicos e de resistência mecânica, mais especificamente poropressão e ângulo de atrito de um talude rodoviário localizado na BR-376/PR, no km 667+120 m.

O talude possui perfil estratigráfico simplificado em duas camadas homogêneas compostas por solo residual de migmatito, com a altura do lençol freático estimada pela extrapolação de dois pontos onde há instalado medidores de nível d'água que apontaram profundidade de 5 metros a 40 metros da rodovia e de 9 metros na região mais próxima a rodovia.

As amostras que caracterizam ambas as camadas foram submetidas a ensaios pretéritos de caracterização e resistência, além do ensaio de permeabilidade *in situ*. As amostras indicaram composição silto arenosa, com limite de liquidez em torno de 23% e limite de plasticidade de 20%. Além disso, as massas específicas correspondentes variam entre 2,6 e 2,7 g/cm³. A camada superior possui permeabilidade saturada menor do que a camada inferior e equivalente a $2,88 \times 10^{-4}$ cm/s.

Os ensaios especiais realizados na amostra correspondente à camada superior indicam que a amostra é residual e ainda guarda resquícios da rocha sã, possuindo minerais como biotita e caulinita e estrutura bandada, característico do migmatito, indicação visual e microscópica que também foi corroborada com o ensaio de perda ao fogo, no qual se obteve valor de perda de massa próximo a 0,4%. A curva de retenção indicou ainda a presença de três tamanhos diferentes e marcantes de poros, denominados macro, meso e microporos. Apesar de no ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) ter sido possível visualizar tamanhos variados de poros, este se mostrou pouco conclusivo, sendo necessária a realização do ensaio de porosimetria de mercúrio para confirmação da configuração trimodal da curva de retenção.

Pela análise de fluxo transiente, observou-se o tempo de infiltração e a formação de frentes de saturação para três diferentes cenários de chuva, além da influência nas condições de estabilidade, por meio da modelagem numérica. Os três cenários visaram avaliar a influência de chuva antecedente (0 mm, 20 mm e 50 mm por 3 dias) ao evento de chuva intensa (145 mm/dia). No primeiro caso, a infiltração alcançou 3 a 5 metros de profundidade, porém, sem saturação completa do primeiro

metro de solo. Nos segundo e terceiro cenários, as chuvas antecedentes de 20 mm/dia e 50 mm/dia por 3 dias propiciaram infiltração superior a 5 metros e a saturação do primeiro metro de solo ocorreu no quinto e terceiro dias, respectivamente.

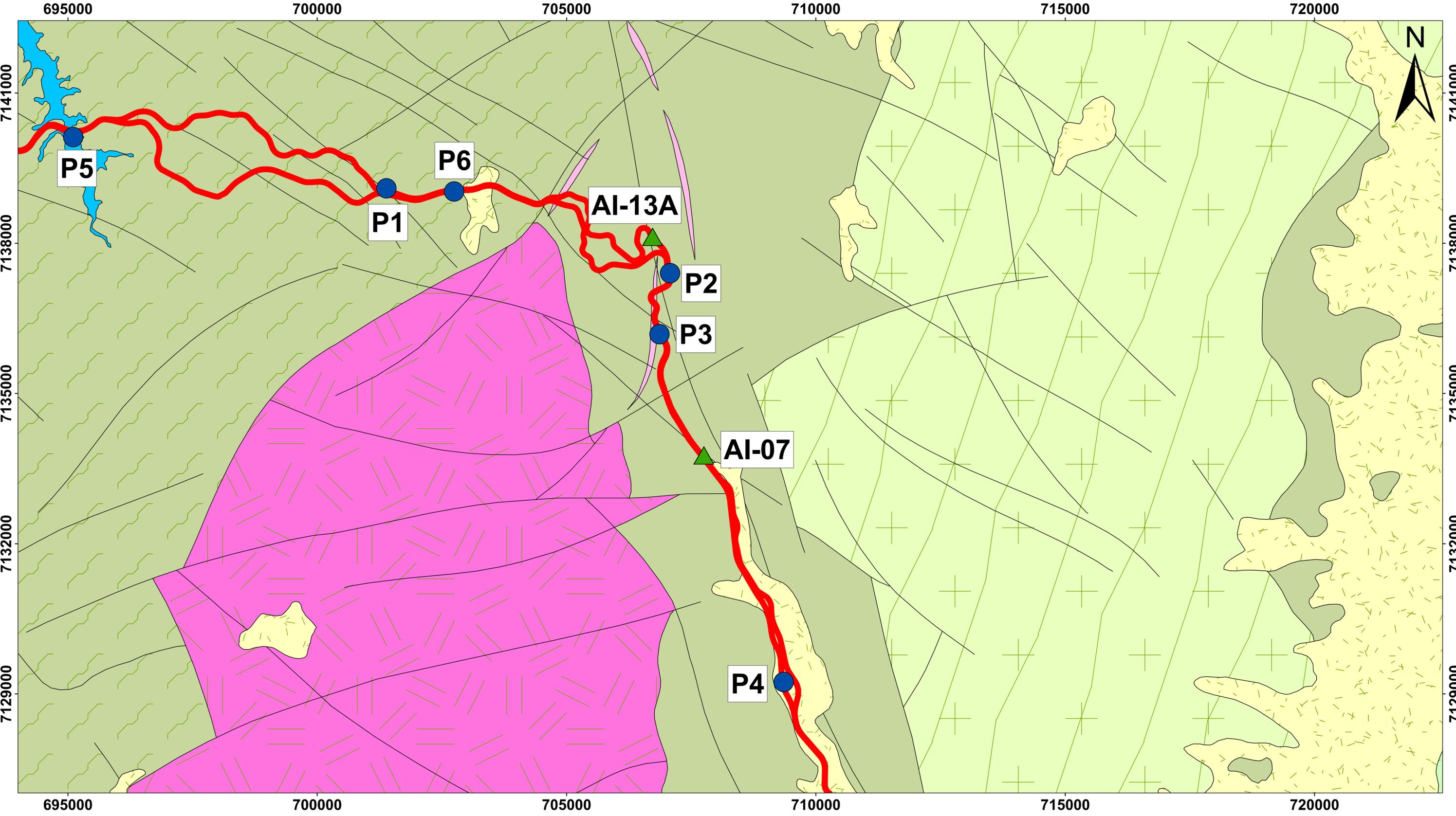
Na análise de estabilidade, o cenário pluviométrico menos intenso ocasionou instabilidade na parte inferior do talude devido à inclinação e proximidade freática, resultando em uma redução de sucção mais acentuada no local. Por meio da retroanálise, a redução do ângulo de atrito necessária neste caso foi de 38° para 20° , ou seja, equivalente a 47%. Nos outros dois cenários, a instabilidade ocorreu primeiramente na parte superior e a redução do ângulo de atrito necessária foi de 15%, ou seja, de 38° para 32° .

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros que propiciem a extensão do estudo apresentado até o presente momento, destaca-se:

- Validação dos valores de poropressão obtidos com aqueles provenientes de instrumentação geotécnica, por meio de tensiômetros ou piezômetros instalados no local;
- Estudo utilizando metodologia semelhante, porém para cenários de chuva menos intensa e de longa duração;
- Retroanálise dos fatores de segurança para diferentes valores de coesão no caso de chuvas de diferentes intensidades.

APÊNDICE 1 - MAPA GEOLÓGICO



Legenda

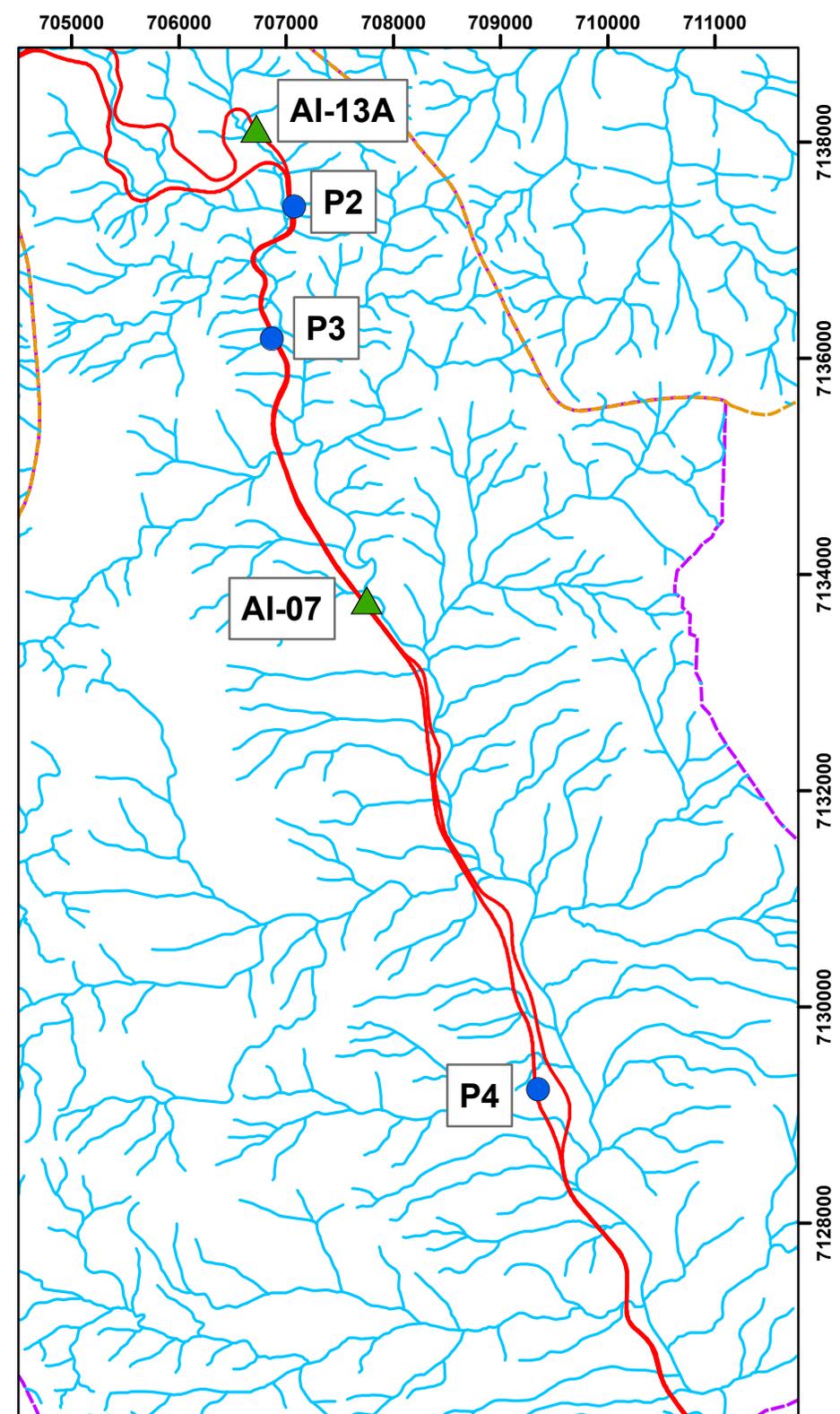
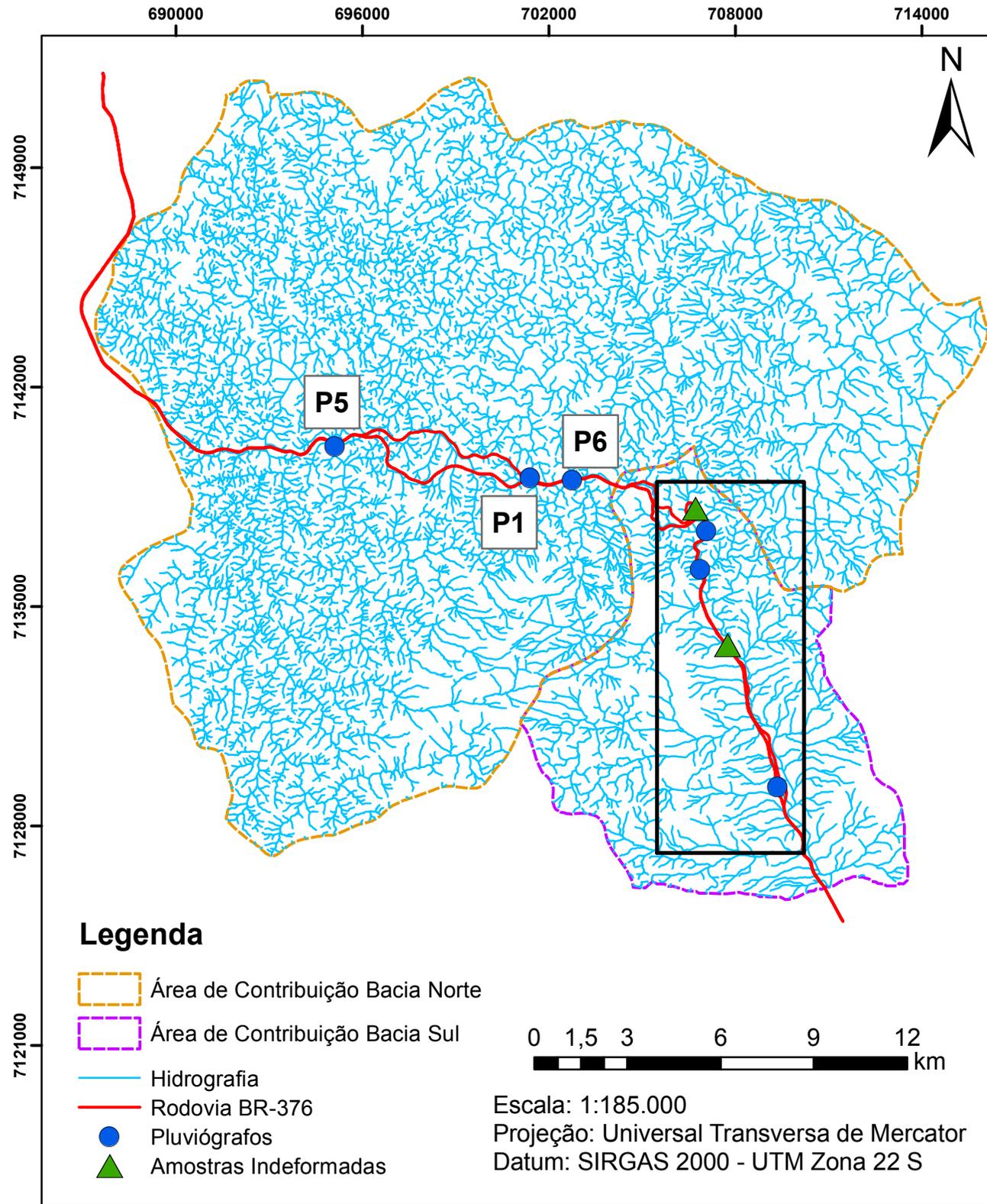
- Rodovia BR-376
- Pluviógrafos
- Amostras Indeformadas
- Represa da Voçoroca
- Estruturas Geológicas

Unidades litológicas

- Sedimentos Recentes
- Formação Guaratubinha
- Suíte Álcali-granitos
- Complexo Granítico Gnáissico
- Complexo Gnáissico Migmatítico

Folha de Curitiba
Escala: 1:250.000
Sistema: UTM
Datum: SAD 69
Fonte: MINEROPAR (2005)

APÊNDICE 2 - MAPA HIDROGRÁFICO



APÊNDICE 3 – POROPRESSÕES: CENÁRIOS 1, 2 E 3

| CENÁRIO 1 – POROPRESSÕES (kPa) | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Tempo (dias) | | | | | | | | | |
| | Prof. (m) | Inicial | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| Seção S1 | 0 | -98,1 | -98,4 | -98,7 | -99,0 | -37,3 | -47,8 | 0,0 | -33,5 | -29,8 | |
| | -1 | -98,1 | -98,1 | -98,2 | -98,2 | -87,9 | -87,0 | -69,3 | -50,0 | -40,3 | |
| | -2 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -97,5 | -96,6 | -92,4 | -82,9 | -75,7 | |
| | -3 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -97,8 | -97,2 | -94,5 | |
| | -4 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -97,9 |
| | -5 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 |
| Seção S2 | 0 | -98,1 | -98,4 | -98,7 | -99,1 | -8,4 | -57,0 | 0,0 | -19,8 | -22,7 | |
| | -1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -92,1 | -85,0 | -64,1 | -31,1 | -25,2 | |
| | -2 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -97,8 | -97,2 | -95,3 | -89,7 | -48,7 | |
| | -3 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -98,0 | -97,7 | -95,2 | |
| | -4 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -97,9 |
| | -5 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 |
| Seção S3 | 0 | -98,1 | -98,4 | -98,6 | -98,9 | -36,7 | -47,7 | 0,0 | -33,7 | -20,2 | |
| | -1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -87,6 | -87,0 | -70,1 | -53,5 | -28,8 | |
| | -2 | -94,3 | -94,3 | -94,2 | -94,1 | -93,5 | -92,5 | -88,5 | -79,1 | -67,9 | |
| | -3 | -86,4 | -86,4 | -86,3 | -86,3 | -86,2 | -86,1 | -85,9 | -85,4 | -83,3 | |
| | -4 | -76,5 | -76,5 | -76,5 | -76,5 | -76,4 | -76,4 | -76,4 | -76,3 | -76,2 | |
| | -5 | -66,7 | -66,7 | -66,7 | -66,6 | -66,6 | -66,6 | -66,6 | -66,5 | -66,5 | -66,5 |
| Seção S4 | 0 | -67,8 | -67,1 | -66,3 | -65,6 | -50,3 | -51,7 | 0,0 | -2,0 | -7,3 | |
| | -1 | -57,9 | -57,3 | -56,5 | -55,6 | -50,3 | -49,1 | -17,2 | -2,8 | -4,7 | |
| | -2 | -47,9 | -46,2 | -44,7 | -43,7 | -41,7 | -40,5 | -21,1 | -7,0 | -6,2 | |
| | -3 | -38,1 | -33,5 | -32,7 | -32,2 | -31,4 | -30,8 | -20,9 | -10,7 | -8,8 | |
| | -4 | -28,3 | -22,5 | -22,2 | -22,1 | -21,8 | -21,5 | -17,7 | -11,9 | -9,5 | |
| | -5 | -18,4 | -13,5 | -13,1 | -13,0 | -12,8 | -12,6 | -11,5 | -9,3 | -7,5 | |
| Seção S5 | 0 | -73,7 | -73,1 | -72,4 | -71,5 | -6,0 | -42,1 | 0,0 | -2,2 | -6,5 | |
| | -1 | -63,9 | -63,4 | -62,5 | -60,8 | -36,4 | -36,8 | -10,1 | -1,4 | -4,3 | |
| | -2 | -54,4 | -52,8 | -49,9 | -45,5 | -33,1 | -27,9 | -14,1 | -3,8 | -4,3 | |
| | -3 | -44,5 | -39,5 | -34,5 | -29,2 | -22,0 | -19,2 | -13,4 | -6,7 | -5,5 | |
| | -4 | -34,6 | -25,7 | -19,5 | -15,8 | -12,6 | -10,4 | -8,1 | -6,3 | -4,5 | |
| | -5 | -24,3 | -15,9 | -9,2 | -6,0 | -3,1 | -1,2 | 0,8 | 2,3 | 4,0 | |

| CENÁRIO 2 – POROPRESSÕES (kPa) | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Tempo (dias) | | | | | | | | |
| | Prof. (m) | Inicial | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Seção S1 | 0 | -98,1 | -50,0 | 0,0 | -14,0 | 0,0 | -2,3 | -0,4 | -22,7 | 0,0 |
| | -1 | -98,1 | -90,1 | -73,0 | -46,2 | -25,1 | -5,2 | 4,3 | -15,5 | -4,0 |
| | -2 | -98,1 | -97,7 | -93,9 | -82,6 | -70,4 | -51,8 | -3,9 | -8,6 | -3,7 |
| | -3 | -98,1 | -98,1 | -97,9 | -97,3 | -93,5 | -85,4 | -53,9 | -31,9 | -6,1 |
| | -4 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -97,9 | -97,5 | -94,1 | -71,0 | -39,3 |
| | -5 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -97,2 | -91,9 |
| Seção S2 | 0 | -98,1 | -34,7 | 0,3 | -2,9 | -4,7 | -6,7 | -3,3 | -5,6 | -6,4 |
| | -1 | -98,1 | -95,0 | -64,0 | -10,9 | -6,0 | -4,6 | -4,0 | -4,4 | -4,8 |
| | -2 | -98,1 | -97,9 | -95,9 | -84,9 | -31,1 | -4,3 | -2,2 | -3,0 | -3,5 |
| | -3 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -97,6 | -93,6 | -72,1 | -14,5 | -6,1 | -3,5 |
| | -4 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -97,8 | -96,5 | -88,0 | -43,7 | -5,2 |
| | -5 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -97,2 | -92,1 | -76,7 |
| Seção S3 | 0 | -98,1 | -49,4 | 0,0 | -11,9 | 0,0 | -3,1 | -3,4 | -5,2 | -6,1 |
| | -1 | -98,1 | -90,0 | -73,6 | -50,0 | -12,4 | -2,2 | 1,9 | -1,2 | -3,1 |
| | -2 | -94,3 | -93,9 | -90,2 | -79,4 | -61,5 | -39,4 | -8,6 | -3,6 | -2,5 |
| | -3 | -86,4 | -86,4 | -86,2 | -85,6 | -82,1 | -68,1 | -36,6 | -18,1 | -4,1 |
| | -4 | -76,5 | -76,5 | -76,5 | -76,4 | -76,2 | -75,0 | -67,6 | -44,7 | -7,4 |
| | -5 | -66,7 | -66,7 | -66,7 | -66,6 | -66,5 | -66,3 | -65,2 | -60,2 | -43,7 |
| Seção S4 | 0 | -67,8 | 0,0 | -6,1 | -11,5 | -15,3 | -40,5 | 0,0 | -2,4 | -5,9 |
| | -1 | -57,9 | -33,9 | -17,6 | -13,8 | -13,5 | -33,7 | -9,0 | -1,3 | -4,3 |
| | -2 | -47,9 | -39,3 | -20,6 | -14,4 | -13,2 | -27,7 | -14,1 | -1,7 | -2,8 |
| | -3 | -38,1 | -31,6 | -20,3 | -14,1 | -12,3 | -22,3 | -15,9 | -4,7 | -3,9 |
| | -4 | -28,3 | -22,1 | -17,6 | -13,2 | -11,2 | -16,9 | -14,4 | -7,6 | -5,9 |
| | -5 | -18,4 | -13,8 | -12,3 | -10,3 | -8,8 | -10,4 | -9,6 | -7,2 | -5,5 |
| Seção S5 | 0 | -73,7 | 0,0 | -2,8 | -5,9 | -8,0 | -35,7 | 0,0 | -2,4 | -5,9 |
| | -1 | -63,9 | -41,2 | -8,9 | -8,2 | -8,6 | -29,4 | -8,6 | -1,4 | -4,0 |
| | -2 | -54,4 | -47,5 | -15,8 | -12,2 | -10,8 | -22,8 | -12,0 | -2,7 | -3,1 |
| | -3 | -44,5 | -38,6 | -18,8 | -13,8 | -11,5 | -15,7 | -11,4 | -5,3 | -3,7 |
| | -4 | -34,6 | -25,3 | -15,8 | -11,2 | -8,9 | -8,5 | -7,0 | -4,9 | -1,7 |
| | -5 | -24,3 | -15,9 | -9,0 | -5,4 | -2,5 | 0,1 | 1,9 | 3,8 | 7,0 |

| CENÁRIO 3 – POROPRESSÕES (kPa) | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Tempo (dias) | | | | | | | | |
| | Prof. (m) | Inicial | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Seção S1 | 0 | -98,1 | -31,8 | 0,0 | 0,0 | -1,7 | -5,9 | -4,0 | -6,0 | -7,4 |
| | -1 | -98,1 | -86,2 | -62,0 | -13,7 | -1,3 | -1,6 | -2,6 | -3,7 | -6,0 |
| | -2 | -98,1 | -97,1 | -91,2 | -70,7 | -45,8 | -8,6 | -4,0 | -1,2 | -3,1 |
| | -3 | -98,1 | -98,0 | -97,7 | -95,2 | -80,5 | -54,2 | -32,4 | -5,0 | 0,5 |
| | -4 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -97,9 | -97,1 | -93,2 | -71,2 | -40,0 | -16,4 |
| | -5 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -97,9 | -96,8 | -91,6 | -61,3 |
| Seção S2 | 0 | -98,1 | -33,9 | 0,0 | 0,0 | -4,0 | -6,7 | -3,3 | -5,7 | -6,5 |
| | -1 | -98,1 | -90,7 | -57,1 | -6,7 | -2,7 | -4,3 | -4,0 | -4,6 | -5,1 |
| | -2 | -98,1 | -97,7 | -95,2 | -82,0 | -18,9 | -8,0 | -4,9 | -4,8 | -4,9 |
| | -3 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -97,5 | -91,8 | -58,6 | -10,9 | -6,1 | -5,0 |
| | -4 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,0 | -97,7 | -95,7 | -84,2 | -39,1 | -11,9 |
| | -5 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -98,1 | -97,9 | -96,9 | -91,6 | -74,6 |
| Seção S3 | 0 | -98,1 | 0,0 | -1,9 | 0,0 | -8,3 | -10,6 | -3,4 | -5,5 | -6,5 |
| | -1 | -98,1 | -80,0 | -23,1 | -2,8 | -3,2 | -5,1 | -3,4 | -4,7 | -5,2 |
| | -2 | -94,3 | -92,8 | -68,8 | -49,3 | -17,3 | -10,0 | -2,2 | -4,2 | -4,9 |
| | -3 | -86,4 | -86,3 | -85,1 | -75,4 | -45,0 | -28,2 | -6,6 | -4,0 | -5,3 |
| | -4 | -76,5 | -76,5 | -76,4 | -75,8 | -71,8 | -58,9 | -26,9 | -6,0 | -4,9 |
| | -5 | -66,7 | -66,7 | -66,6 | -66,5 | -65,9 | -63,8 | -55,7 | -26,3 | -7,0 |
| Seção S4 | 0 | -67,8 | -21,7 | 0,0 | 3,3 | -3,0 | -7,5 | -4,4 | -6,2 | -7,2 |
| | -1 | -57,9 | -45,8 | -10,2 | 4,2 | -0,3 | -5,0 | -4,9 | -5,3 | -5,8 |
| | -2 | -47,9 | -42,5 | -23,5 | 0,3 | -0,6 | -2,8 | -4,2 | -4,5 | -4,8 |
| | -3 | -38,1 | -32,5 | -23,7 | -6,8 | -2,4 | -2,0 | -3,1 | -2,5 | -1,8 |
| | -4 | -28,3 | -22,9 | -18,2 | -10,8 | -5,2 | -3,8 | -2,7 | 2,0 | 4,6 |
| | -5 | -18,4 | -14,5 | -12,8 | -9,9 | -6,5 | -4,9 | -1,2 | 8,8 | 12,6 |
| Seção S5 | 0 | -73,8 | -25,9 | 0,0 | 0,8 | -11,0 | -17,9 | -2,7 | -5,3 | -6,5 |
| | -1 | -63,9 | -46,5 | -15,9 | 3,5 | -7,9 | -10,8 | -6,6 | -6,3 | -6,3 |
| | -2 | -54,4 | -46,7 | -22,4 | 1,5 | -3,8 | -5,7 | -4,8 | -3,6 | -2,3 |
| | -3 | -44,5 | -38,1 | -22,3 | -3,6 | -3,0 | -3,3 | 0,6 | 2,4 | 4,4 |
| | -4 | -34,6 | -25,3 | -16,9 | -7,9 | -4,5 | -0,6 | 8,2 | 10,2 | 12,1 |
| | -5 | -24,3 | -16,1 | -9,1 | -5,2 | 0,7 | 8,3 | 16,3 | 18,4 | 20,3 |

APÊNDICE 4 – FATORES DE SEGURANÇA

| CENÁRIO 1 | | | |
|-----------|------------|---------------------|--------------|
| Dia | Pico (38°) | Pico reduzido (29°) | Mínimo (20°) |
| 1 | 3,20 | 2,35 | 1,49 |
| 2 | 3,18 | 2,33 | 1,48 |
| 3 | 3,16 | 2,32 | 1,47 |
| 4 | 2,78 | 2,04 | 1,30 |
| 5 | 2,90 | 2,12 | 1,35 |
| 6 | 2,26 | 1,65 | 1,05 |
| 7 | 1,69 | 1,24 | 0,79 |
| 8 | 1,70 | 1,24 | 0,79 |

| CENÁRIO 2 | | | |
|-----------|------------|---------------------|--------------|
| Dia | Pico (38°) | Pico reduzido (29°) | Mínimo (32°) |
| 1 | 2,86 | 2,28 | 2,47 |
| 2 | 2,72 | 2,13 | 2,32 |
| 3 | 2,60 | 1,97 | 2,18 |
| 4 | 2,31 | 1,60 | 1,84 |
| 5 | 2,02 | 1,27 | 1,52 |
| 6 | 1,51 | 0,81 | 1,05 |
| 7 | 1,26 | 0,78 | 0,94 |
| 8 | 1,11 | 0,79 | 0,90 |

| CENÁRIO 3 | | | |
|-----------|------------|---------------------|--------------|
| Dia | Pico (38°) | Pico reduzido (29°) | Mínimo (32°) |
| 1 | 2,93 | 2,04 | 2,34 |
| 2 | 2,80 | 1,97 | 2,24 |
| 3 | 2,56 | 1,78 | 2,04 |
| 4 | 2,18 | 1,52 | 1,74 |
| 5 | 1,83 | 1,28 | 1,46 |
| 6 | 1,27 | 0,90 | 1,02 |
| 7 | 1,18 | 0,82 | 0,94 |
| 8 | 1,14 | 0,80 | 0,92 |

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180:2016 – Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181:2016 – Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

ACEVEDO, A. M. G, VICTORINO, M. M., SESTREM, L. P., PASSINI, L. B., FIORI, A. P., KORMANN, A. C. M., BOSZCZOWSKI, R. B. **Relatório de Acompanhamento**. Pesquisa e Desenvolvimento UFPR-Autopista Litoral Sul. Curitiba, 2017.

ASTM D5298-10. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. Annual Book of ASTM Standards, 2010.

BAVER, L. D., GARNER, W. H. & GARNER, W. R. **Soils Physics**. 4 ed. London, Inc., 1972. Cap. 7-9.

BICALHO, K. V. et al. **Effect of the filter paper calibration on the soil-water retention curve of an unsaturated compacted silt sand** IN CORREIA, A. Gomes ; LEMOS, Luís Leal, ed. lit. – “A geotecnia portuguesa e os desafios da globalização: actas do Congresso Nacional de Geotecnia, 11, Coimbra, Portugal, 2008”. Coimbra : S.P.G., 2008. ISBN 978-989-95740-2-1. p. 181-188.

BISHOP, A. W., 1955 **The use of the slip circle in the stability analysis of slopes**. Geotechnique, 5, pp. 7 – 17.

BOSZCZOWSKI, R. B. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR**. Rio de Janeiro, 2008.

577p. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

BOSZCZOWSKI, R. B. e LIGOCKI, L. P. **Características geotécnicas dos solos residuais de Curitiba e RMC**. In: Twin Cities – Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba. São Paulo, 2012.

BROOKS, R. H. & COREY, A. T. **Properties of porous media affecting fluid flow**. Journal of the Irrigation and Drainage Division. Proceeding of the American Society of the Civil Engineers, New York, 92 (IR2): 61-88, June 1996.

BUBACK, J. A. **Caracterização físico-química-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de rocha alcalina do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2008. 122p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CALLE, J. A. C. **Análise de ruptura de talude em solo não saturado**. São Carlos, 2000. 156p Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos**. Vol. 1. 6ª ed. LTC Ed. Rio de Janeiro, 1988.

CARDOSO JR., C. R. **Estudo do comportamento de um solo residual de gnaiss não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes**. São Paulo, 2006. 172 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.

CARVALHO, T. M. O. **Desenvolvimento de um sistema de medição de variação de volume total de amostras triaxiais não-saturadas e avaliação do efeito de processos de saturação no comportamento de solos saprolítico**. Rio de Janeiro, 2012. 401 p. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CHANDLER, R. J. AND GUTIERREZ, C. I. (1986). **The filter paper method of suction measurement**. Geotechnique 36, No. 2,265-268.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. **Atlas do transporte**. 1. Ed– Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2006. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/atlas-do-transporte>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2016: relatório gerencial**. 20. Ed. – Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2016. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

DNER-ME 093/94 **Solos – Determinação da densidade real**. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Norma rodoviária.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos** / organizadores, Guilherme Kangussú Donagema... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2011. 230 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627; 132)

FELLENIOUS, W. **Calculations of the stability of earth dams**. Transaction of the 2nd Congress on Large Dams, 4, Washington, D.C, 1936.

FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for unsaturated soils**. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1993.

FREDLUND, D. G., XING, A. & HUANG, S. **Prediction the permeability functions for unsaturated soil using the soil water characteristics curve**. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, N° 4, pp. 533-546, 1994.

GEOSLOPE **Seepage Modeling with SEEP/W – An Engineering Methodology**. Ed. Jun 2012. Geo-slope International Ltd.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 1ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GITIRANA Jr., G. F. N., MARINHO, F. A. M. e SOTO, M. A. A. **A curva de retenção de água de materiais porosos.** In: CARVALHO, J. C et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** Cap. 9., p. 205-229. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

LACERDA, W. A.; SANDRONI, S. **Movimentos de massas coluviais.** In: Mesa Redonda Sobre Aspectos Geotécnicos de Encostas. Rio de Janeiro, 1985. Clube de Engenharia.

LISBOA, R. L. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório.** Viçosa: UFV, 2005. Xi, 89f: il.

LUXMOORE, R. J. **Comments and letters to the editor – Micro, meso and macroporosity of soil.** Soil Science Society of America Journal. Publicado em maio de 1981. Disponível em <<https://goo.gl/tFdSRb>>. Acesso em: 24 out. 2017.

MACHADO, F. B. **Banco de dados do museu de minerais e rochas “Heinz Ebert”.** Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Departamento de Petrologia e Metalogenia. Rio Claro (SP), 2017. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm>>. Acesso em: 26 out. 2017.

MARINHO, F. A. M. **Medição de sucção em solos não saturados.** Vol. 2, pp. 373-397, 1997.

MARINHO, F. A. M. **Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados.** São Paulo, 2005. Livre docência – Universidade de São Paulo.

MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A.; GITIRANA Jr., G. F. N. **Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção.** In: CARVALHO, J. C et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** Cap. 9., p. 231-256. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

MASSAD, F. **Obras de terra – Curso básico de Geotecnia**. 2ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2003

MENDES, R. M. **Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais tropicais não saturados de Ubatuba (SP)**. São Paulo, 2008. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

MENEZES, M. B. M. **Análise da influência de teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade**. São Carlos, 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.

MINEROPAR – Minerais do Paraná. **Atlas comentado da Geologia e dos Recursos Minerais do Estado do Paraná – Geológico do Estado do Paraná**. Curitiba, 2001.

MINEROPAR – Minerais do Paraná. **Folha Curitiba**. 2005. Disponível em: <<https://goo.gl/z673ng>>. Acesso em: 05 out. 2017.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. John Wiley & Sons, Inc. 1976. University of California, Berkeley.

MONCADA, M. P. H. **Avaliação de propriedades hidráulicas de solos tropicais não saturados**. Rio de Janeiro, 2008. 324p. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3.ed São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PONTES FILHO, G. **Estradas de rodagem: projeto geométrico**. São Carlos, 1998. GP Engenharia Bidim.

RAHARDJO, H, LEONG, E. C., REZAUR, R. B. **Effect of antecedent rainfall on pore-water pressure distribution characteristics in residual soil slopes under tropical rainfall**. Hydrological Processes Hydrol. Process. 22, 506–523 (2008).

Disponível em: <www.interscience.wiley.com>. DOI: 10.1002/hyp.6880. Acesso em: 22 out. 2017.

SCARIN, P. B. R., BERNARDES, G. P. **Utilização do índice de perda ao fogo para caracterização de perfil de intemperismo de solo residual e de horizontes de deposição do terciário de Taubaté, SP.** Belo Horizonte, MG. 2016. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG.

SILVA, W.P. et al. **“LAB Fit Ajuste de Curvas”:** Um software em português para tratamento de dados experimentais. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 4, p. 419 - 427, (2004).

SPANNENBERG, M. G. **Caracterização geotécnica de um depósito de argila mole da baixa fluminense.** Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2003.

SUDERHSA – Atual IAP – Instituto de Águas do Paraná. **Unidades Hidrográficas do Paraná 2006.** Disponível em: <<https://goo.gl/zccXHv>>. Acesso em: 05 out. 2017.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar Paranaense.** Curitiba, 2009. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

UNIVERSIDADE DE WAIKATO (2010). **Weka 3 – Machine Learning Software in Java.** Disponível em: <<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka>>. Acesso em: 19 nov. 2017.

VAN GENUCHTEN, M. Th., 1980. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898.

VARGAS, M. (1953). **Some engineering properties of residual clay soils occurring in Southern Brazil.** ICSMFE, 3, v. 1, Zurich.

VARNES, D. J. **Slope movement types and processes**. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. Washington D. C., 1978. Ed. Schuster, R. L. & Krizek, R. J. Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, 11-33.

VICTORINO, M. M. **Influência da chuva nas poropressões e estabilidade dos taludes rodoviários de um trecho da BR376 na Serra do Mar paranaense**. Curitiba, 2015. 124 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

VILAR, O.M. et al. **Solos não saturados**. São Carlos, 2004. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Universidade de São Paulo.

VILAR, O. M. **Notas de aula**. Departamento de Geotecnia. EESC, USP. São Carlos, 2000.

WAICHEL, B. L. **Notas de aula**. Departamento de Geociência. Curso de Geologia. UFSC. Florianópolis, 2012.