

**Dissertação de Mestrado**

**INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE CLIMÁTICA  
NA ESTABILIDADE DE TALUDES EM  
VOÇOROCAS NO COMPLEXO  
METAMÓRFICO DO BAÇÃO.**

**AUTOR: YESSER MARIN RODRIGUEZ HERNANDEZ**

**ESCOLA DE MINAS / UFOP**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar  
(UFOP)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP**

**OURO PRETO – NOVEMBRO DE 2020**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

H557i Hernandez, Yesser Marin Rodriguez.  
Influência da sazonalidade climática na estabilidade de taludes em  
voçorocas no Complexo Metamórfico do Bação. [manuscrito] / Yesser  
Marin Rodriguez Hernandez. - 2020.  
129 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar.  
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro  
Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós-  
Graduação em Geotecnia.  
Área de Concentração: Geotecnia.

1. Voçorocas. 2. Simulação (Computadores). 3. Taludes (Mecânica do  
solo) - Estabilidade. I. Bacellar, Luis de Almeida Prado. II. Universidade  
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.137

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



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Yesser Marin Rodriguez Hernandez**

**INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE CLIMÁTICA NA ESTABILIDADE DE TALUDES EM VOÇOROCAS NO COMPLEXO METAMÓRFICO DO BAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

Membros da banca

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar (UFOP)

Prof. Dr. Guilherme de José Cunha Gomes (UFOP)

Prof. Dr. Marcos Barreto de Mendonça (UFRJ)

Versão final

Aprovado em 5 de novembro de 2020

De acordo

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar - Orientador



Documento assinado eletronicamente por **Luis de Almeida Prado Bacellar**, COORDENADOR(A) DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTÉCNIA, em 22/12/2020, às 18:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0118798** e o código CRC **7ABD3AA8**.

***“Life is what happens to you while you’re busy making other plans.”***

***(John Lennon)***

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir desenvolver este trabalho através de tempos confusos como os atuais. Em seguida a minha família, meu pilar essencial ao longo da minha vida e especialmente nesta etapa, graças pela confiança, apoio e companhia constante, com esse apoio o céu é o único limite. À Eblin pelo apoio e principalmente por me suportar todos os dias nesta etapa.

Agradeço também a todo o corpo docente do NUGEO, pelo conhecimento transmitido através das aulas, sempre muito curtas, devido a importância de cada uma delas. Ao Professor Bacellar, por toda a ajuda brindada no desenvolvimento desta pesquisa, por essas conversas e dicas sem as quais esta pesquisa não teria andado da mesma maneira, ordenando todas essas ideias espalhadas no começo, até torna-las este produto final.

Agradeço também ao Christ, Lina e Ivon por me receber e me deixar ser mais um dessa família estrangeira em Ouro Preto. Como também à Betania, Charmante, Manuel, Keirom e Humberto por compartilhar essa viagem com tantos bons momentos e risos juntos.

Renata e Bruno muito obrigado pela ajuda e por todos esses bons momentos compartilhados na nossa sala. Muito obrigado Renata por me fazer parte da sua família, por todos esses convites no momento certo, e todas essas tardes de estudo no NUGEO.

Tambem a Mariana, Diogo, Whilisson, Luiz por toda a ajuda e os bons papos nesses dias nos laboratórios e no campo. Talita e Maria além de toda a ajuda oferecida, obrigado por todos os sorrisos compartilhados.

Obrigado a minha turma do NUGEO, cada um de vocês tem meu agradecimento, por toda a ajuda fornecida. À galera dos estrangeiros, vocês ao longo desses anos, viraram meus amigos e junto com todas as pessoas que conheci aqui, fizeram que este processo fosse inesquecível.

Agradeço à GeoSlope International Ltd. pela concessão da licença acadêmica do sistema computacional GeoStudio 2020, que permitiu o desenvolvimento dos estudos numéricos. Também agradeço o apoio da GeoFast, em especial ao professor Saulo Ribeiro, que com a sua intermediação junto à GeoSlope, possibilitou a concessão desta licença.

## RESUMO

A região de rochas gnáissicas e graníticas do Complexo do Bação, no interior do Quadrilátero Ferrífero (MG), é conhecida historicamente pela existência de alta densidade de voçorocas de grandes dimensões, alcançando até 50m de profundidade, configurando uma situação de elevado risco geotécnico para moradores e construções no entorno. Embora as causas que provocam tais erosões sejam variadas, é sabido que, ao atingir o nível freático, o avanço é controlado por condições complexas de erosão subsuperficial e, sobretudo, por escorregamentos rotacionais. Dados históricos mostram que os escorregamentos nos taludes destas voçorocas ocorrem não somente na estação chuvosa, como também na estação seca. Objetivando entender melhor a dinâmica destes taludes, foi elaborado um modelo conceitual detalhado de uma voçoroca instável baseando-se em grande volume de dados prévios e de novos levantamentos de campo geofísicos e de aerofotogrametria, além de novos ensaios de laboratório de caracterização dos solos. Com este modelo conceitual, fez-se pelo período de um ano hidrológico a análise de estabilidade do talude mais crítico desta voçoroca por equilíbrio-limite acoplada a uma simulação numérica de fluxo por elementos finitos. Os resultados mostraram duas variações cíclicas do nível freático ao longo do ano hidrológico, 2,97m no sopé do talude e 1,24m no interior do talude, atingindo o nível máximo geral no período de estiagem devido a recarga atrasada em consequência da espessa zona não saturada. Também foi constatada a existência de fluxos ascendentes no sopé do talude com elevados gradientes de saída. O fator de segurança do talude apresentou um comportamento cíclico e pouco variável, com valores baixos ao longo do ano hidrológico, com uma diminuição de 3% no período de estiagem. Comprovou-se, portanto, que os taludes das voçorocas apresentam condição metaestável e que podem se instabilizar tanto no período úmido, quando as águas recarregam o sopé do talude, como no período seco, por recarga atrasada. Acredita-se que com estes resultados seja mais fácil dimensionar métodos de estabilização destas feições.

**PALAVRAS CHAVE:** Voçorocas; simulação numérica; solos tropicais; estabilidade de taludes.

## ABSTRACT

The gneissic and granitic rocks of the Bação Complex region, in the “Quadrilátero Ferrífero (MG)”, are historically known for the existence of high density of gullies of great dimensions, reaching up to 50 meters in depth, leading to a situation of high geotechnical risk for people and buildings. Although the causes for such erosion vary, it is known that when the water table is reached, its development is controlled by complex conditions of subsurface erosion and mostly by rotational landslides. Historical data shows that landslides in the gullies’ slopes happened both in the rainy season and the dry season. To understand the dynamics of these slopes a detailed conceptual model of an unstable gully was developed based on an extensive volume of existing historical data, along with geophysical and aerophotogrammetry fieldwork. Additionally, a laboratory test for the characterization of soils was performed. The objective of this conceptual model was to develop a limit equilibrium stability analysis of the most critical slope of the gully throughout a hydrological year, along with numerical simulations of flow using finite elements. The results showed two cyclical variations in the groundwater table over the hydrological year; 2.97 meters at the toe of the slope, and 1.24 meters within the slope, reaching the general maximum level during the dry season as a result of late recharge due to the thickness of the unsaturated zone. The results also verified the existence of upward flows at the toe of the gully with high gradients of outflow. The safety factor of the slope presented a cyclical, slightly variable, behavior with low safety factors throughout the hydrological year, with a diminution of 3% in dry season. Therefore, the meta-stable condition of the gully slopes was verified, as well as its unstable condition during the wet season with the recharge at the toe of the slope, and during the dry season with late recharge. It is expected that with this result it will be easier to design stabilization methods for these erosive features.

**KEYWORDS:** Gullies; numerical simulation; tropical soils; slope stability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama trifásico do solo não saturado (Modificado de Fredlund et al., 2012).....	5
Figura 2.2 Elemento de solo com fase de ar continua (Modificado de Fredlund et al., 2012)..	5
Figura 2.3 Variação da tensão total, pressão de ar e sucção em um perfil de solo (Modificado de Fredlund et al., 2012). .....	6
Figura 2.4 Medidas de sucção total, mátrica e osmótica em um argila Regina compactada (Modificado de Fredlund et al., 2012). .....	8
Figura 2.5 Esquema do ensaio do papel filtro (Modificado de Bulut e Leong, 2008).....	11
Figura 2.6 Curva de retenção de vários tipos de solo (Modificado de Fredlund et al., 2012).	14
Figura 2.7 Curva de retenção de água no solo com efeito da histerese (Modificado de Menezes, 2013). .....	15
Figura 2.8 Estado de tensão para solos não saturados (Modificado de Fredlund et al., 2012). .....	20
Figura 2.9 Envoltória de resistência de solos não saturados (Adaptado de Fredlund et al., 2012). .....	21
Figura 2.10 Faixas de variações da resistividade em alguns solos e rochas (modificado de Braga, 2006).....	26
Figura 2.11 Relação entre a resistividade elétrica e teor de umidade (modificado de Pozdnyakov et al., 2006).....	27
Figura 2.12 Esquemas utilizados na medição de resistividade em laboratório (Modificado de López-Sánchez et al., 2017): a) Esquema similar ao utilizado por Martinho et al. (2006); b) Caixa Miller normatizado pela ASTM G57-06 utilizado por Pozdnyakova (1999); c) Esquema utilizado por Kalinski e Kelly (1993); d) Esquema utilizado por Rhoades et al. (1977) e Amidu; Dunbar (2007).....	28
Figura 2.13 Classificação dos métodos geoeletricos (Modificado de Braga, 2006).....	29
Figura 2.14 Configuração usual de 4 eletrodos (Modificado de Braga, 2006).....	30
Figura 2.15 Esquema de arranjos típicos da SEV (Modificado de Braga, 2006) .....	31
Figura 2.16 Forças atuando nas fatias da massa do solo ao longo da superfície de ruptura (adaptado de Fredlund et al., 2012). .....	34
Figura 2.17 Esquema representado fator de segurança vs $\lambda$ . (Adaptado de Krahn, 2003). .....	35
Figura 3.1 Localização da bacia do rio Maracujá (modificado de Bacellar et al., 2005) .....	41
Figura 3.2 Mapa Geológico da bacia do rio Maracujá (modificado de Bacellar et al., 2005).	42
Figura 3.3 Resultados da sondagens a percussão SPT (modificado de Bacellar, 2000).....	45



Figura 3.4 Situação atual do talude de jusante da voçoroca, com linha negra delimitando o horizonte B, pouco erodível, do C (saprolito), com muitos sulcos de erosão.....	46
Figura 3.5 Detalhe da transição abrupta entre os horizontes A, B e C em talude da voçoroca	46
Figura 3.6 Curvas granulométricas dos horizontes do solo da área com uso de agente defloculante no ensaio. Os solos coletados até 2 metros são do horizonte B e os mais profundos e o solo exposto são do horizonte C (Modificado de Futai, 2002). .....	47
Figura 3.7 Localização dos pontos de coleta de pesquisas anteriores na voçoroca da estação Holanda. ....	47
Figura 3.8 Perfis dos limites de Atterberg e composição granulométrica dos solos da área (Modificado de Futai, 2002). ....	48
Figura 3.9 Simulação de fluxo transiente sob condição estacionária de infiltração e carga de pressão zero na superfície, adotando os parâmetros hidráulicos de 1 m e 5 m de profundidade, para os horizontes B e C, respectivamente. É mostrada a variação da poropressão após essa situação hipotética (Adaptado de Futai, 2002). ....	52
Figura 3.10 Resultado da análise de estabilidade pela condição de fluxo da Figura 3.7, adotando os parâmetros de comportamento mecânico de pico definidos na Tabela 3.3 nos seus valores efetivos, considerando o efeito da sucção. A superfície de ruptura sob essa situação de fluxo está também representada (Adaptado de Futai, 2002).....	52
Figura 3.11 Precipitação média mensal em Itabirito de 1984 até 2000, dados da usina hidroelétrica rio das Pedras (adaptado de Drumond, 2006).....	53
Figura 4.1 Poço de coleta de amostras do horizonte B. ....	54
Figura 4.2 Coleta de amostras em anéis de PVC e em bloco. ....	55
Figura 4.3 Local de retirada das amostras do horizonte C, à distância (esquerda) e no detalhe (direita).....	55
Figura 4.4 Preparação do corpo de prova do ensaio de permeabilidade.....	57
Figura 4.5 Montagem do ensaio de permeabilidade. ....	57
Figura 4.6 Amostrador utilizado para a execução do ensaio da curva de retenção. ....	58
Figura 4.7 Moldagem dos corpos de prova para ensaio do papel filtro .....	59
Figura 4.8 Saturação dos corpos de prova por capilaridade. ....	59
Figura 4.9 Amostras após montagem e colocação do papel filtro. ....	60
Figura 4.10 Instrumentos necessários na abertura dos corpos de prova e montagem do ensaio de resistividade em laboratório. ....	62
Figura 4.11 Esquema do arranjo utilizado no ensaio de resistividade. ....	63

Figura 4.12 Realização do ensaio de resistividade nas amostras. Mostrando o arranjo de eletrodos utilizado na obtenção das leituras.....	63
Figura 4.13 Trenas por onde foi levantada a SEV 2.....	65
Figura 4.14 Localização das sondagens elétrica verticais (SEVs) na área de estudo. A voçoroca estudada foi a da direita, que apresenta o setor noroeste com os taludes mais instáveis. Os taludes na parte norte e nordeste da voçoroca se encontram mais estáveis, o que é evidenciado pela presença da vegetação. (Fonte: Google Earth).....	66
Figura 4.15 Localização da seção sob análise no talude NW da voçoroca e locais de amostragem realizados nesta pesquisa.....	67
Figura 4.16 Seção geológico-geotécnica em análise com malha de elementos finitos, exibindo o horizonte B (amarelo), horizonte C (verde), gnaiss funil (laranja). Para localização, ver Figura 4.15.....	69
Figura 4.17 Condições de contorno consideradas na análise transiente, como: vazão nula no divisor topográfico e no contato com o maciço rochoso, carga constante no pé da voçoroca e interação solo-atmosfera na superfície do terreno.....	70
Figura 4.18 Condições de estabilidade global adotadas, com a localização dos pontos de geração das superfícies de ruptura.....	72
Figura 5.1 Gráfico de plasticidade com resultados do solo do horizonte B.....	73
Figura 5.2 Curva granulométrica do solo do horizonte B com e sem uso de defloculante.....	74
Figura 5.3 Curva granulométrica do solo do horizonte C com e sem uso de defloculante.....	75
Figura 5.4 Curva de retenção para solo do horizonte B.....	79
Figura 5.5 Curva de distribuição de frequência acumulada de poros do horizonte B.....	79
Figura 5.6 Curva de condutividade hidráulica não saturada para solo do horizonte B.....	80
Figura 5.7 Curva de retenção de água do horizonte C.....	82
Figura 5.8 Curva de distribuição de frequência acumulada de poros do horizonte C.....	82
Figura 5.9 Curva de condutividade hidráulica não saturada do solo do horizonte C.....	83
Figura 5.10 Variação da resistividade com o teor de umidade do horizonte B.....	84
Figura 5.11 Variação da resistividade com o teor de umidade horizonte C.....	85
Figura 5.12 Comparativo da resistividade elétrica dos solos dos dois horizontes.....	85
Figura 5.13 Relação da sucção com a resistividade no horizonte B.....	87
Figura 5.14 Teste de Anderson-Darling dos valores do logaritmo da sucção do solo do horizonte B.....	88
Figura 5.15 Teste de Anderson-Darling dos valores da resistividade elétrica do solo do horizonte B.....	88

Figura 5.16 Relação da sucção com a resistividade do solo do horizonte C. ....	89
Figura 5.17 Teste de Anderson-Darling dos valores do logaritmo da sucção do solo do horizonte C.....	90
Figura 5.18 Teste de Anderson-Darling dos valores da resistividade elétrica do solo do horizonte C.....	90
Figura 5.19 Interpretação da SEV1 e camadas geoeletricas. ....	92
Figura 5.20 Interpretação da SEV2 e camadas geoeletricas. ....	93
Figura 5.21 Mapa topográfico da área da voçoroca estudada (voçoroca 1) na estação Holanda estendendo-se até o divisor topográfico seguindo o aclave topografico. Notar que há outra voçoroca se desenvolvendo a oeste (voçoroca 2). ....	94
Figura 5.22 Modelo digital de superfície da área da voçoroca, com seção em estudo marcada em amarelo no talude NW da voçoroca, exibindo ausência de vegetação e evidência de um pequeno escorregamento recente nesse talude.....	95
Figura 5.23 Resultados da simulação de fluxo em regime permanente, mostrando isolinhas dos valores iniciais de poropressão a cada 50 kpa, representando os valores para cada nó do modelo. ....	95
Figura 5.24 Resultado final da simulação de fluxo em regime transitório do ano 1. Notar que a zona não saturada é muito espessa e que o nível d'água aflora no sopé do talude, como identificado em campo, além de valores elevados de sucção próximos da superfície devido às condições climáticas. ....	96
Figura 5.25 Dados pluviométricos do ano hidrológico estudado. Fonte dos dados: CEMADEN. ....	96
Figura 5.26 Valores de evapotranspiração potencial no ano hidrológico analisado, estimados mensalmente através do metodo de Thornthwaite (1948). ....	97
Figura 5.27 Resumo do balanço hídricos do modelo completo, ilustrando o aumento da precipitação no período de chuvas com posterior estabilização na seca, além do aumento da evaporação e a variação do balanço hídrico no ano hidrológico. ....	97
Figura 5.28 Posição do nível de água (NA) no início da simulação 01/10/2018 (dia 365) e no dia 01/01/2019 (dia 456), representado pela linha tracejada. Notar elevação do NA próximo à face do talude. As duas linhas verticais pretas representam estações de avaliação de resultados (65m e 120m) representados nas Figuras 5.29 e 5.30.....	98
Figura 5.29 Variação anual do nível d'água na estação 65m (Figura 5.28). NA mínimo no dia 01/10/18 no final do período seco e o NA máximo no dia 01/01/19 no auge do periodo chuvoso. ....	99

Figura 5.30 Variação anual do nível d'água na estação 120 m (Figura 5.28). NA mínimo no dia 01/03/19 no final da estação chuvosa e o NA máximo nos dias 01/10/18 e 01/06/19 e 01/07/19 no auge da estação seca.....	100
Figura 5.31 Exfiltração de água em direção à voçoroca durante o ano hidrológico, medidos nos nós correspondentes à face do talude na zona de exfiltração.....	100
Figura 5.32 Superfície de ruptura no início do ano hidrológico. Mostrando uma superfície de ruptura profunda e uma massa de solo grande, com valor do FS baixo. ....	101
Figura 5.33 Variação do fator de segurança no ano hidrológico. Mostrando pouca variação no valor do FS ao longo do ano hidrológico. Levemente maior no final da estação seca e menor tanto na estação chuvosa como na estação seca.....	102
Figura 5.34 Superfície de ruptura e fator de segurança no dia 371 (08/10/18). ....	102
Figura 5.35 Superfície de ruptura e fator de segurança no dia 562 (17/04/19). ....	103
Figura 5.36 a) Esquema do numero de fatias na superfície de ruptura. b) Variação da poropressão nos dias 371 (08/10/18) e 562 (17/04/19) da simulação.....	103
Figura 5.37 Gradiente hidráulico com forte componente ascendente no sopé do talude no dia 30/09/19. ....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Métodos de medida de sucção (Adaptado de Vilar (2006 apud Freitas Neto, 2008). .....	10
Tabela 2.2 Curvas de calibração para o papel filtro Whatman No 42 (Modificado de Bicalho et al., 2015). .....	12
Tabela 2.3 Modelos empíricos da curva de retenção.....	17
Tabela 2.4 Expressões para avaliação das tensões efetivas em solos não saturados (Adaptado de Freitas Neto, 2008). .....	19
Tabela 2.9 Constantes geométricas (K) dos arranjos utilizados nas SEVs.....	31
Tabela 2.10 Características dos métodos de equilíbrio limite (adaptado de Camapum et al., 2015). .....	33
Tabela 2.11 Principais fatores deflagradores dos escorregamentos (Adaptado de Camapum et al., 2015). .....	36
Tabela 3.1 Resumos dos índices físicos dos solos coletados numa trincheira e exposto num talude de voçoroca (Modificado de Futai, 2002). .....	49
Tabela 3.2 Parâmetros de compressão edométrica de solos coletados numa trincheira e exposto num talude de voçoroca (Modificado de Futai, 2002). .....	49
Tabela 3.3 Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos da área com variação de sucção controlada (Modificado de Futai, 2002). .....	50
Tabela 3.4 Resultados ensaios de determinação de condutividade hidráulica por carga variável (Modificado de Silva, 2000). .....	50
Tabela 4.1 Parâmetros de resistência ao cisalhamento (Adaptado de Futai, 2002). .....	71
Tabela 5.1 Resultados dos limites de Atterberg para os solos coletados.....	73
Tabela 5.2 Distribuição granulométrica do solo .....	74
Tabela 5.3 Resumo de resultados dos índices físicos dos solos. ....	76
Tabela 5.4 Resultados do coeficiente de condutividade hidráulica dos solos. ....	77
Tabela 5.5 Parâmetros do modelo Durner (1994) horizonte B.....	78
Tabela 5.6 Parâmetros do Modelo Gitirana e Fredlund (2004) horizonte B. ....	78
Tabela 5.7 Parâmetros do modelo Durner (1994) do solo do horizonte C. ....	81
Tabela 5.8 Parâmetros do modelo Gitirana e Fredlund (2004) do solo do horizonte C. ....	81
Tabela 5.9 Resumo das camadas geoeletricas da SEV1 .....	92
Tabela 5.10 Resumo das camadas geoeletricas da SEV2 .....	93

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

<i>ABNT</i> :	Associação Brasileira de Norma Técnica;
<i>ASTM</i> :	American Society for Testing and materials;
<i>INMET</i> :	Instituto Nacional de Meteorologia.
<i>CEMADEN</i> :	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais;
<i>LL</i> :	limite de liquidez;
<i>LP</i> :	limite de plasticidade;
$\gamma_{nat}$ :	massa específica natural do solo;
<i>w</i> :	teor de umidade gravimétrico;
$w_s$ :	teor de umidade saturado
$w_r$ :	teor de umidade residual
$\theta$ :	teor de umidade volumétrico;
<i>e</i> :	índices de vazios;
$G_s$ :	massa específica dos sólidos do solo;
<i>S</i> :	grau de saturação;
<i>k</i> :	coeficiente de condutividade hidráulica;
$C_c$ :	índice de compressão;
$e_0$ :	índice de vazios inicial;
$c'$ :	intercepto de coesão efetiva;
$\phi'$ :	ângulo de atrito efetivo;
$\phi^b$ :	parâmetro que quantifica aumento na resistência devido a sucção;
$\sigma'_1$ e $\sigma'_3$ :	tensão principal e secundária;
$\tau$ :	tensão de cisalhamento;
$\sigma$ :	tensão total;
$\sigma'$ :	tensão efetiva;
$u_a$ :	pressão de ar;
$u_w$ :	pressão de água nos poros do solo;
$\psi$ :	sucção total;
$\pi$ :	parcela da sucção osmótica;
$\lambda_{bc}$ :	índice de distribuição de poros;

$\psi_b$ : Pressão de entrada de ar;  
 $w_1$ : parâmetro de ponderação das sub curvas modelo Durner;  
 $\alpha_{vm}, n_{vm}, m_{vm}$ : parâmetros de ajuste ao solo do modelo Van Genuchten;  
 $a_f, n_f, m_f$ : parâmetros de ajuste ao solo do modelo Fredlund e Xing;  
 $\alpha_1, n_1, m_1, \alpha_2, n_2, m_2$ : parâmetros de ajuste do modelo Durner;  
 $d_j, \theta_i, r_i, \lambda_i$ : parâmetros do modelo Gitirana e Fredlund;  
 $\beta'$ : Fator de ligação de Croney et al.;  
 $\chi$ : parâmetro relacionado com o grau de saturação;  
 $a_m, a_a, a_w$ : área ocupada por sólidos, ar e água respectivamente;  
 $R', A$ : resultante das forças de atração e repulsão respectivamente;  
 $p''$ : deficiência de poropressão;  
 $\beta$ : Fator estatístico do mesmo tipo da área de contato;  
 $\chi_m$ : parâmetro de sucção efetiva para sucção matricial;  
 $\chi_s$ : parâmetro de tensão efetiva para sucção de soluto;  
 $\chi_{m1}$  e  $\chi_{s1}$ : parâmetros que variam de 0 a 1 que dependem da trajetória de tensões;  
 $R_e$ : resistência elétrica;  
 $V$ : diferença de potencial;  
 $I$ : intensidade da corrente elétrica;  
 $\rho$ : resistividade elétrica do solo;  
 $\sigma_c$ : condutividade elétrica;  
 $FF$ : Fator de formação;  
 $\rho_w$ : Resistividade do fluido intersticial;  
 $m$ : constante que depende da cimentação das partículas;  
 $a, b$ : parâmetros que dependem do tipo de solo;  
 $K$ : constante geométrica do arranjo de eletrodos;  
 $F_s$ : fator de segurança;  
 $\tau_f$ : tensão média ao cisalhamento do solo;  
 $\tau_f$ : tensão média ao cisalhamento mobilizada ao longo da superfície de ruptura;  
 $X$ : força de cisalhamento entre fatias;  
 $E$ : força normal entre fatias;  
 $f(x)$ : função que descreve a variação X/E ao longo da superfície de ruptura;

$\lambda$ :	Constante escalar que representa a porcentagem de $f(x)$ utilizada para resolver o fator de segurança
$P$ :	precipitação;
$EVR$ :	evapotranspiração real;
$EVP$ :	evapotranspiração potencial;
$R$ :	descarga superficial;
$R_g$ :	descarga subterrânea;
$\Delta S$ :	água armazenada no solo;
$e_{0p}$ :	pressão de vapor da superfície do solo;
$e_a$ :	pressão de vapor do ar;
$e_s$ :	pressão de vapor de saturação à temperatura da superfície de água;
$L_d$ :	fotoperíodo do dia;
$I_t$ :	índice térmico imposto pelo regime climático total;
$a_t$ :	variável função do índice térmico;
$T_a$ :	temperatura média mensal do ar;
$S_s$ :	armazenamento específico;
$R_v$ :	volume d'água introduzido ou retirado do sistema;
$h$ :	carga hidráulica.



## SUMARIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivos .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1. Solos Não Saturados.....	4
2.1.1. Fases Constitutivas .....	4
2.1.2. Sucção.....	6
2.1.3. Métodos de medição da sucção .....	9
2.1.4. Curva de retenção .....	13
2.1.5. Resistência dos solos não saturados .....	18
2.2. Resistividade Elétrica.....	23
2.2.1. Princípios básicos da resistividade elétrica .....	23
2.2.2. Resistividade elétrica em solos .....	24
2.2.3. Resistividade em laboratório .....	28
2.2.4. Tipos de levantamentos de resistividade elétrica .....	29
2.3. Análises de estabilidade .....	32
2.4. Análise de Fluxo.....	37
3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	41
3.1. Localização da área de Estudo .....	41
3.2. Caracterização e parâmetros geotécnicos.....	44
3.3. Clima da região .....	53
4. MATERIAIS E METODOS .....	54
4.1. Etapa 1: Coleta de Amostras no Campo.....	54
4.2. Etapa 2: Ensaio de Laboratório.....	56
4.2.1. Caracterização Física do solo .....	56
4.2.2. Ensaio de Permeabilidade do solo .....	56
4.2.3. Ensaio de determinação da sucção .....	57

4.2.4. Ensaio de resistividade elétrica .....	62
4.3. Etapa 3: Resistividade elétrica <i>in situ</i> . .....	65
4.4. Etapa 4: Simulações Numericas .....	67
5. RESULTADOS E ANÁLISES .....	73
5.1. Resultados dos ensaios de caracterização .....	73
5.1.1. Limites de Atterberg .....	73
5.1.2. Análise granulométrica.....	74
5.1.3. Resumo dos índices físicos e Classificação do solo. ....	76
5.1.4. Ensaio de permeabilidade do solo .....	76
5.2. Determinação da curva de retenção .....	78
5.3. Resistividade elétrica.....	84
5.4. Relação Sucção - Resistividade elétrica.....	87
5.5. Sondagem Elétrica Vertical em Campo .....	91
5.6. Simulação de fluxo e análise de estabilidade .....	94
7. CONCLUSÕES .....	105
7.1. Sugestões para futuras pesquisas .....	107
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	108

# Capítulo 1

---

## 1. INTRODUÇÃO

A região de rochas do embasamento do Complexo do Bação, no interior do Quadrilátero Ferrífero (MG), é muito afetada por voçorocas de grandes dimensões, que configuram uma situação de risco geotécnico pelos danos que podem causar em benfeitorias e aos moradores que vivem em seu entorno. Sabe-se que o avanço dos processos do voçorocamento na região é fortemente governado por movimentos de massa, especialmente por escorregamentos rotacionais (Bacellar, 2000). Estes escorregamentos ocorrem em taludes com uma espessura grande de material não saturado, já que o nível d'água subterrânea somente ocorre na base, próximo ao contato do saprolito (horizonte C) com a rocha subjacente (gnaisse). Para a estabilização destas voçorocas é preciso controlar os escorregamentos, porém há ainda muita controvérsia sobre os fatores condicionantes destes movimentos de massa. Futai (2002), por exemplo, explica que tais escorregamentos ocorreriam por perda de coesão aparente devido à saturação dos solos na estação chuvosa. Contudo, evidências de campo mostram que estes taludes se instabilizam tanto na estação chuvosa como também na estação seca, que se estende de abril a setembro (Drumond e Bacellar, 2006). Estes autores argumentam que os escorregamentos na estação seca, poderiam ser consequência da subida atrasada da superfície freática, que seria recarregada pela frente de saturação lenta na zona não saturada. Desta forma, fica claro que para dirimir estas dúvidas e melhor entendimento do fator de segurança destes taludes é preciso entender suas reais condições de fluxo.

Portanto, neste trabalho pretende-se estudar o talude de uma voçoroca muito instável no Complexo do Bação. Em vez da tradicional incorporação da superfície freática na análise de equilíbrio-limite, pretende-se elaborar uma análise prévia das condições de fluxo não saturado e saturado por simulação com o método de elementos finitos e acoplar estes resultados à análise de estabilidade por equilíbrio-limite. Acredita-se que assim será possível melhor entender o comportamento atípico destes taludes.

Uma das dificuldades de se fazer uma análise de fluxo acoplada a estabilidade de taludes é a carência de dados de campo e de monitoramento para calibrar os resultados. Nesta pesquisa, pretende-se recorrer ao expressivo volume de dados prévios existentes na região,

complementados por métodos indiretos de investigação, como o método geofísico da eletrorresistividade.

Acredita-se que uma vez entendida a dinâmica de evolução destas voçorocas, tornar -se mais fácil posteriormente propor medidas de remediação.

## 1.1. Objetivos

Esta dissertação teve como objetivo geral avaliar a influência da sazonalidade climática na estabilidade de taludes, como estudo de caso, de uma voçoroca no distrito de Santo Antônio do Leite, município Ouro Preto (MG), com uma análise por equilíbrio-limite acoplada à simulação numérica de fluxo hídrico. Pretende-se entender porque os taludes destas voçorocas se instabilizam não só no período chuvoso como também no período seco.

Os objetivos específicos foram:

- Elaborar as curvas de retenção e de resistividade elétrica dos solos do perfil em laboratório e relacioná-las com os valores da resistividade elétrica obtidos *in situ*.
- Levantar perfis geoeletricos em campo de eletrorresistividade (sondagens elétricas verticais) na crista do talude da voçoroca para incrementar o conhecimento das unidades geológicas e a real posição do nível d'água.
- Procurar quantificar a sucção dos solos indiretamente por determinação de resistividade elétrica.

# Capítulo 2

---

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Solos Não Saturados

A mecânica dos solos é uma ciência aplicada relativamente nova, que foi contextualizada cientificamente por Terzaghi em 1943, com uma análise do comportamento físico dos solos saturados (Fredlund et al., 2012). Embora existam muitos trabalhos anteriores tentando descrever o comportamento dos solos, esse é considerado o início da mecânica dos solos.

Segundo Fredlund et al. (2012), a mecânica dos solos clássica foi desenvolvida para alguns solos específicos (areias saturadas e secas, siltes e argilas,) e para condições de clima temperado. Contudo, na prática da engenharia, os solos são comumente encontrados parcialmente saturados (solos não saturados), a depender das condições geológicas, geomorfológicas e climáticas locais. Materiais não saturados, com poropressão negativa (sucção), podem se desenvolver essencialmente em quase qualquer contexto geológico, como: solos residuais, depósitos lacustres ou qualquer outro tipo de solo ou rocha (Fredlund et al., 2012).

O Brasil, com clima majoritariamente tropical, possui solos tanto residuais quanto transportados (coluviais e aluviais) regidos pelas propriedades dos solos tropicais. Muitas vezes, encontram-se em estado não saturado, possuindo uma espessura considerável e com o nível de água em profundidade, desenvolvendo poropressões negativas, que é fundamental no entendimento do comportamento destes solos (Fredlund et al., 2012).

#### 2.1.1. Fases Constitutivas

Segundo Fredlund et al. (2012), uma fase independente deve ter as seguintes características: diferentes propriedades dos materiais contíguos e superfícies de contorno bem definidas. Essas duas condições devem ser cumpridas, para uma porção de um sistema multifásico qualificar como uma fase independente. Assim é fácil entender como o solo saturado consiste de duas fases (sólidos do solo e água), e o não saturado três fases (sólidos do solo, água e ar).

Os solos não saturados podem ser considerados como um sistema trifásico com respeito às propriedades e às relações da massa e o volume (Figura 2.1), embora seja conhecida a existência da membrana contráctil na interface ar-água, considerada uma quarta fase constitutiva (Figura 2.2). Porém, a espessura dela é da ordem de poucas camadas moleculares, assim, para fins de uma subdivisão física não é necessária a consideração dessa membrana na definição das relações do volume e da massa dos solos não saturados (Fredlund et al., 2012).

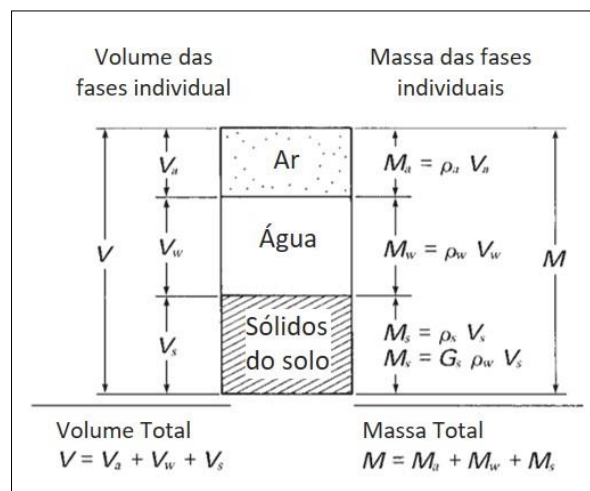


Figura 2.1 Diagrama trifásico do solo não saturado (Modificado de Fredlund et al., 2012).

No entanto, embora a definição anterior seja válida para a definição das relações volumétricas, o solo não saturado precisa ser considerado um sistema de quatro fases devido à grande importância que essa quarta fase tem no ponto de vista das condições do estado de tensões, como será definido nas próximas seções.

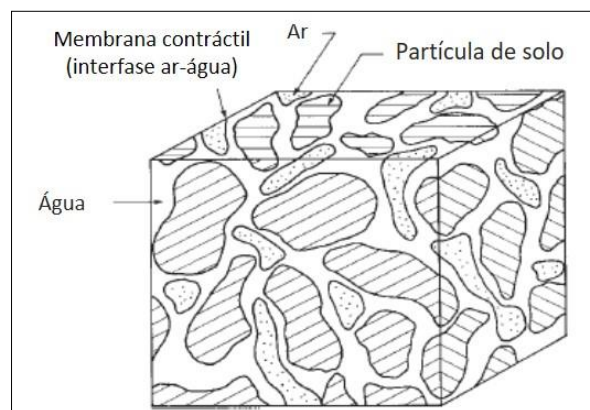


Figura 2.2 Elemento de solo com fase de ar contínua (Modificado de Fredlund et al., 2012)

### 2.1.2. Sucção

A sucção é uma das propriedades mais importantes da mecânica dos solos não saturados, que possuem um comportamento que varia de acordo com a umidade ou saturação do solo. Essa poropressão negativa (ou sucção) quando menor que a pressão atmosférica acima do nível de água subterrânea dá início aos processos de adensamento e posterior dessaturação dos solo e sedimentos (Fredlund, 1979).

Acima do nível d'água subterrâneo, a sucção tende a crescer, a depender das características intrínsecas do solo, como a granulometria, índice de vazios, mineralogia, saturação e a distribuição dos poros no solo. Os fatores extrínsecos, como a infiltração e a variação do nível d'água subterrâneo são fatores igualmente importantes. Na Figura 2.3 é possível observar de forma ilustrativa a variação na sucção e da tensão total num perfil de solo.

Segundo Fredlund (1979), o solo pode ser submetido a mudanças nas condições ambientais sazonais ou de longo prazo, que poderão causar modificações nele, como expansão e contração, mudanças no nível de água e no estado de tensões (Figura 2.3).

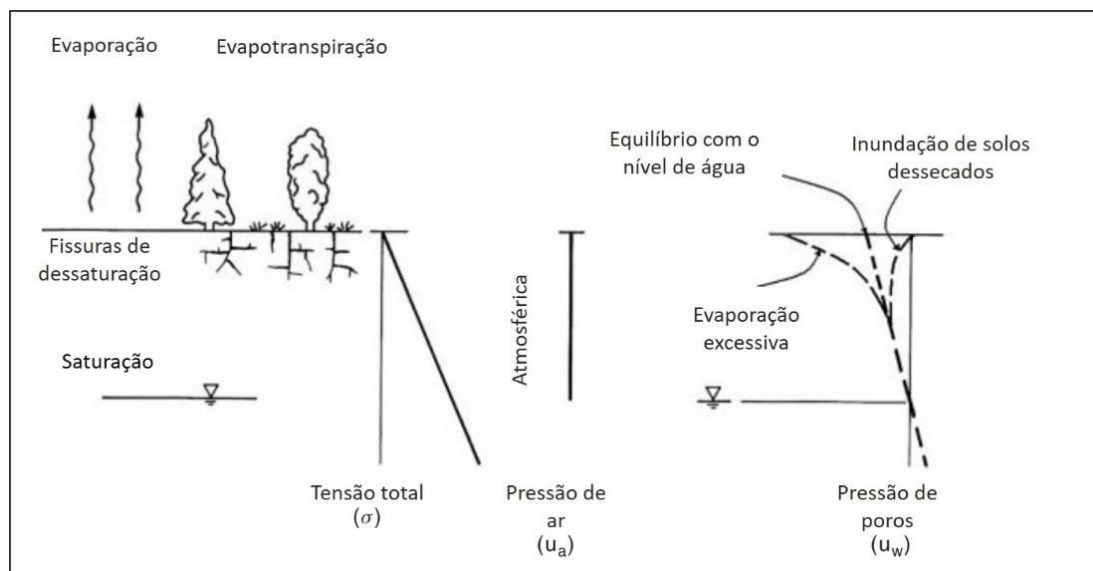


Figura 2.3 Variação da tensão total, pressão de ar e sucção em um perfil de solo (Modificado de Fredlund et al., 2012).



Segundo Bulut e Leong (2008), a sucção do solo é o resultado da ação capilar, das propriedades energéticas da superfície das partículas sólidas e da concentração iônica da água nos seus vazios. A sucção é composta por duas parcelas, a sucção mátrica e a sucção osmótica (Aitchinson e Richard, 1965; Fredlund, 1979), segundo a equação 2.1:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.1)$$

Onde,  $\psi$ : Sucção total;

$u_a$ : Pressão do ar nos poros;

$u_w$ : Pressão de água nos poros;

$\pi$ : Parcela da sucção osmótica;

$(u_a - u_w)$ : Parcela da sucção mátrica.

Fredlund et al. (2012) definiram a sucção mátrica pela diferença entre a pressão do ar ( $u_a$ ) e a pressão da água nos poros ( $u_w$ ), enquanto a sucção osmótica corresponde à parcela da sucção relacionada com a salinidade da água nos poros. Essas parcelas são independentes, podendo possuir comportamentos diferentes no solo. O uso de cada tipo de sucção (mátrica, osmótica ou total) depende das condições do local e das análises a serem realizadas (Fredlund et al., 2012).

A sucção total varia no tempo principalmente como resultado das mudanças nas condições climáticas, que afeta sobretudo a parcela da sucção mátrica. Isto, porque para pequenos valores de umidade os mecanismos de contribuição da sucção são governados pelas propriedades das superfícies dos sólidos e para valores de umidade altos a sucção é governada pelos mecanismos da capilaridade. Entretanto, a sucção osmótica mantém-se constante na maior parte da faixa de umidade, se não houver mudanças nos solutos diluídos (Lu e Likos, 2004).

No entanto, segundo Fredlund et al. (2012), mudanças na sucção osmótica podem também afetar o comportamento mecânico de um solo. Podem-se ter mudanças no volume total assim como na tensão cisalhante se a salinidade variar. Porém, as mudanças na sucção osmótica são geralmente menos afetadas por mudanças ambientais e, por tal razão, recebem uma menor

atenção. Essa parcela apresenta maior importância somente quando há uma mudança na salinidade do solo, que pode provocar mudança nas suas propriedades físicas.

O comportamento da sucção mátrica é relativamente menor do que a sucção total, embora seguindo uma trajetória similar, e esse comportamento é relativamente maior quanto maior for o teor de umidade do solo (Krahn e Fredlund, 1972; Edil et al., 1981; Fredlund et al., 2012) (Figura 2.4). Assim, qualquer mudança na sucção total é equivalente à sucção mátrica, e por essa razão na maior parte dos problemas de engenharia que envolvem solos não saturados a sucção mátrica pode ser considerada semelhante a sucção total quando não há mudanças na salinidade dos solos.

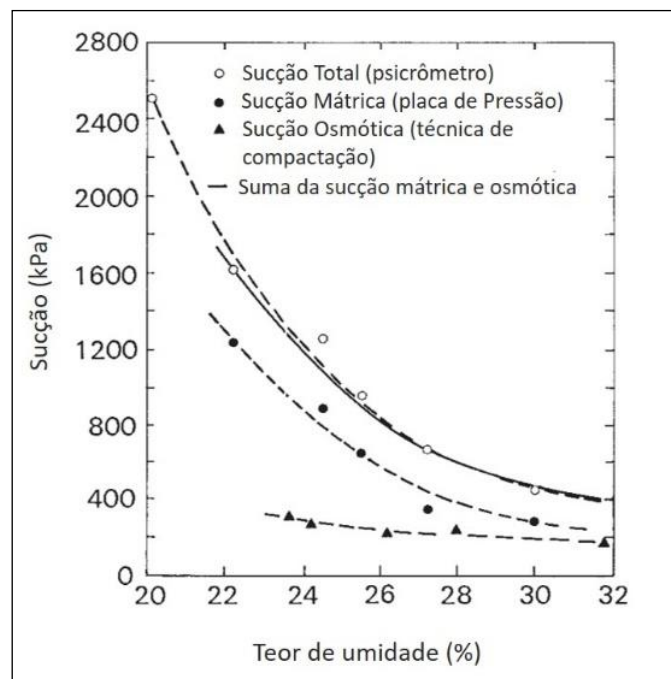


Figura 2.4 Medidas de sucção total, mátrica e osmótica em um argila Regina compactada (Modificado de Fredlund et al., 2012).

A sucção mátrica é um parâmetro intrínseco que reflete o efeito conjugado do tipo de solo, clima e profundidade do nível de água que reflete o comportamento mecânico melhor que outros índices do solo (Edil et al., 1981). É importante lembrar que é possível ter fluxo de água num sentido e fluxo de ar em outro sentido, portanto não é recomendável empregar a sucção total na modelagem do processo de fluxo de água. As componentes da sucção mátrica ( $u_a$ ,  $u_w$ ) são usadas para calcular o fluxo de cada fase independente. Na fase líquida, as ações conjuntas

da pressão da água com o nível piezométrico produzem esse fluxo (Fredlund et al., 2012). Assim, o interesse no presente trabalho se dará na parcela de sucção mátrica.

### **2.1.3. Métodos de medição da sucção**

Existem diversos métodos para medir este parâmetro, que não é trivial de se obter, por requer muito tempo e cuidados durante a execução. Esses métodos se dividem em duas classes, de medidas diretas e indiretas. Segundo Freitas Neto (2008), os equipamentos utilizados para obter medidas diretas de sucção estão baseados na medição da energia que possui a água nos poros do solo, um exemplo seriam os tensiômetros. As medidas indiretas, por outro lado, baseiam-se na calibração de um parâmetro relacionado com a sucção, esse é o caso da umidade, e um exemplo seria o método do papel filtro.

Assim, na Tabela 2.1 estão apresentados alguns dos métodos mais utilizados para obtenção da sucção no solo, tanto diretos quanto indiretos, com as suas faixas de medição e observações para sua utilização. Na literatura existem diversos trabalhos que utilizam os métodos diretos (Ridley e Burland, 1993; Freitas Neto, 2008), mas aqui serão melhor descritos os métodos indiretos, mais precisamente o do papel filtro, utilizado neste trabalho.

Os métodos indiretos foram desenvolvidos com o conhecimento de que a sucção pode ser obtida através de outro parâmetro correlacionável, normalmente medindo as condições de equilíbrio da umidade no lugar da sucção. Bulut e Leong (2008) dividiram os métodos indiretos de acordo ao meio de obtenção, em meios primários, quando o equilíbrio é determinado na pressão de vapor, e meios secundários, quando é medido através de outro meio poroso (ex.: papel filtro) e ainda meios terciários, quando é medida outra propriedade física que indica a condição de equilíbrio.

Tabela 2.1 Métodos de medida de sucção (Adaptado de Vilar (2006 apud Freitas Neto, 2008).

Método de medida / Tipo de sucção	Faixa de medida (kPa)	Observações
Blocos porosos (Matricial)	10 a 1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baseia-se na condutividade elétrica de materiais porosos como o gesso, a fibra de vidro e etc., bem como da resistência elétrica (ohms x sucção);</li> <li>• Desvantagens: Solubilidade do gesso, histerese pronunciada, mais sensível às altas sucções;</li> <li>• Tempo de equilíbrio: semanas</li> </ul>
Equilíbrio da fase vapor (Total)	Toda a faixa acima de 400	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solução com concentração conhecida; umidade relativa; sucção total;</li> <li>• Amostra de solo em dessecador sem contato com a solução até o equilíbrio de peso; Tempo de equilíbrio demorado</li> </ul>
Extrato da solução do solo (Osmótica)	Todos os valores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condutividade elétrica do extrato da solução;</li> <li>• Concentração de solutos;</li> <li>• Extrato + psicrômetros: resultados precários</li> </ul>
Funil de pedra porosa (Matricial)	0 a 90	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solução aplicada diretamente à amostra;</li> <li>• Indicado para determinar baixas sucções (Libardi, 1995);</li> <li>• Tempo de equilíbrio: Horas</li> </ul>
Membrana de pressão	Até 10000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emprega a técnica de translação de eixos;</li> <li>• Emprega membrana de celulose.</li> <li>• Tempo de equilíbrio: Dias</li> </ul>
Papel filtro com e sem contato (Matricial/Total)	30 a 30000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependendo do contato com o solo, que por sinal deve ser garantido;</li> <li>• Necessita da calibração do papel;</li> <li>• Evitar formação de fungos nos papéis mais umedecidos;</li> <li>• Pesagem com precisão de 0,0001 gr;</li> <li>• Tempo de equilíbrio de 7 a 30 dias.</li> </ul>
Placa de pressão (Matricial)	0 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emprega a técnica da translação de eixos;</li> <li>• Depende da pressão de entrada de ar da pedra porosa;</li> <li>• Continuidade da fase ar;</li> <li>• Tempo de equilíbrio: Horas.</li> </ul>
Princípios Osmóticos (Matricial)	200 a 1600 (PEG 20000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solo em contato com solução com concentração conhecida (umidade relativa conhecida) através de membrana seletiva;</li> <li>• Solução de Polietileno Glicol (PEG), peso molecular 20000;</li> <li>• Útil para instalar e controlar sucção em ensaios;</li> <li>• Tempo de equilíbrio: Horas.</li> </ul>
Psicrômetros (Total/Osmótica)	100 a 8000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende de rigoroso controle de temperatura, principalmente nas baixas sucções; mais recomendado para laboratório;</li> <li>• Sucção osmótica; mede sucção de extrato da solução do solo (confiabilidade precária) (Fredlund e Rahardjo, 1993).</li> <li>• Tempo de equilíbrio: Minutos.</li> </ul>
Tensiômetro Padrão (Matricial)	0 a 100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de resposta: Depende da condutância da pedra porosa e sensibilidade do elemento de medida;</li> <li>• Existem tensiômetros baseados em princípios osmóticos;</li> <li>• Tempo de equilíbrio: Minutos.</li> </ul>
Tensiômetro de alta capacidade (TAC) (Matricial)	0 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medem sucção abaixo de -1 atm., até uma sucção de 1500 kPa;</li> <li>• Tiram partido da elevada resistência à tração da água (Ridley e Burland, 1993) e tem curto tempo de resposta.</li> </ul>

- **Método do papel filtro.**

O primeiro trabalho detalhando o método do papel filtro na medição da sucção foi desenvolvido por Gardner (1937) e posteriormente surgiram muitos outros com adaptações desse método. O método de determinação da umidade com papel filtro é classificado, segundo Bulut e Leong (2008), como um método secundário, ao utilizar um meio poroso separado na medição da sucção. Assim, este método baseia-se no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso, no caso o solo, com certa umidade é colocado em contato com o papel filtro. Mede-se a umidade gravimétrica ( $w$ ) do papel filtro após atingir esse equilíbrio.

Este método é o único que permite medir tanto a sucção total quanto a sucção matricial, a depender do tipo de contato entre o papel filtro e o solo. Quando o papel filtro encontra-se totalmente em contato com o solo, a água absorvida pelo papel tem a mesma concentração que a água no solo, assim, a sucção medida é a sucção mátrica. No entanto, quando o papel filtro não se encontra em contato direto com o solo, a transferência da água acontece através do vapor, e nesse caso é medida a sucção total (Marinho e Oliveira, 2006). Na Figura 2.5 é mostrado um esquema típico das duas configurações possíveis deste método.

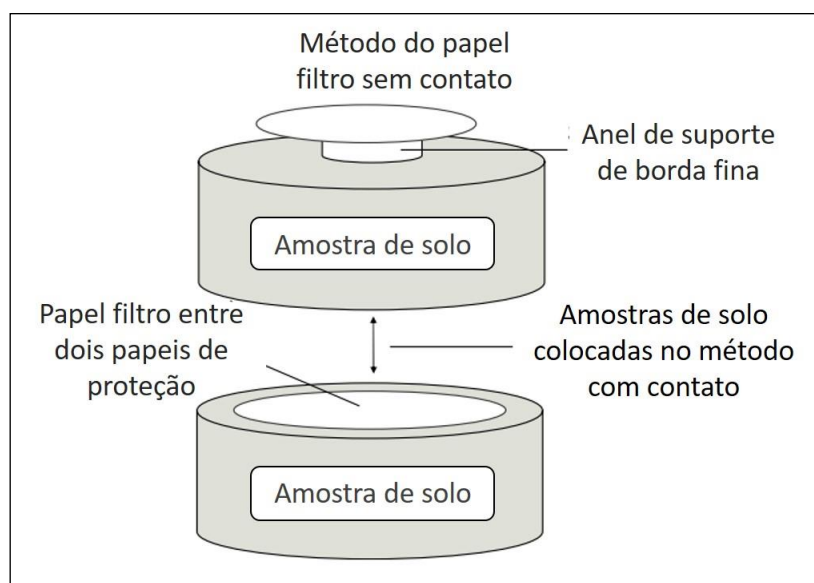


Figura 2.5 Esquema do ensaio do papel filtro (Modificado de Bulut e Leong, 2008).

Quando é medida a sucção total, o fluxo do vapor é afetado tanto pelas forças capilares que retêm as moléculas de água no solo quanto pelas forças osmóticas que também afetam o fluxo de vapor ao não fluírem junto com o vapor. De forma diferente, quando se mede diretamente o fluxo de água do solo para o papel filtro sem continuidade física, este é regido pelas forças capilares, assim, o componente osmótico da sucção não interfere como força adicional.

A acurácia do método do papel filtro depende dos cuidados realizados durante a execução. Também tem uma importância grande os materiais e ferramentas utilizadas, especialmente o tipo de papel filtro, sendo os mais recomendados o papel filtro “Whatman No. 42” e “Schleicher and Schuell 589 White ribbon”. Inúmeras curvas de calibração são apresentadas na literatura, e cada tipo de papel filtro apresenta suas próprias curvas. Na Tabela 2.2 são apresentadas as curvas de calibração mais usadas com o papel filtro Whatman No 42.

Tabela 2.2 Curvas de calibração para o papel filtro Whatman No 42 (Modificado de Bicalho et al., 2015).

Referencias	w (%)	Log <sub>10</sub> (sucção) (kPa)
Chandler et al. (1992)	$w \leq 47$	$4,842 - 0,0622w$
	$w > 47$	$6,050 - 2,48\log_{10}w$
Leong et al. (2002)	$w < 47$	$4,945 - 0,0673w$
	$w > 47$	$2,909 - 0,0229w$
ASTM (2016)	$w < 45,3$	$5,327 - 0,0779w$
	$w > 45,3$	$2,412 - 0,0135w$

A maior parte dessas calibrações apresenta um comportamento bilinear, com uma tendência linear para grandes sucções e outra para sucções menores, com um ponto de inflexão entre 40% – 50% do teor de umidade. A tendência para grandes sucções é relacionada com a água adsorvida, enquanto a tendência para baixas sucções é associada às forças capilares (Bicalho et al., 2015).

#### 2.1.4. Curva de retenção

A curva de retenção de água no solo é definida como a relação entre seu conteúdo de água e sua sucção. O conteúdo de água pode ser expresso como umidade gravimétrica ( $w$ ), comum na geotecnia, ou umidade volumétrica ( $\theta$ ) ou ainda pelo grau saturação ( $S$ ) do solo. Segundo Fredlund et al. (2012), a curva de retenção dá uma compreensão conceitual entre a massa (e/ou volume) da água em um solo e o estado da energia da fase água.

Na literatura, não existe uma padronização da forma de representar a curva de retenção, apresentando-se às vezes a sucção no eixo das abscissas e outras no eixo das ordenadas, variando de escala logarítmica (mais usual) para escala linear. O conteúdo de água é sempre apresentado em escala linear, na forma de teor de umidade gravimétrica ou volumétrica ou grau de saturação.

No desenvolvimento da mecânica de solos não saturados, a curva de retenção do solo, tem se tornado a base na estimativa de suas propriedades, assim, como a função da condutividade hidráulica não saturada e a função do armazenamento de água definida como a inclinação da curva de retenção de água do solo (Zhang et al., 2016).

Segundo Zhang et al. (2016), quando a variação da sucção não provoca mudanças no volume do solo, os quatro tipos de expressões de umidade utilizados na representação da curva de retenção, fornecem a mesma informação do ponto de vista geotécnico na estimação das propriedades dos solos não saturados.

De acordo com Fredlund e Xing (1994), na curva de retenção pode-se usar tanto a sucção mátrica quanto a total, porque especialmente para grandes valores de sucção, a componente mátrica e a total podem ser assumidas como equivalentes. Na Figura 2.6 está apresentado um esquema de curvas de retenção para 3 tipos de solo com granulometrias distintas. Essa figura ilustra também o comportamento geral da curva de retenção, a qual apresenta um aumento no valor da sucção quanto menor o teor de umidade. A diferença no comportamento nas três curvas se deve à capacidade diferente de cada tipo de solo de reter água nos poros.

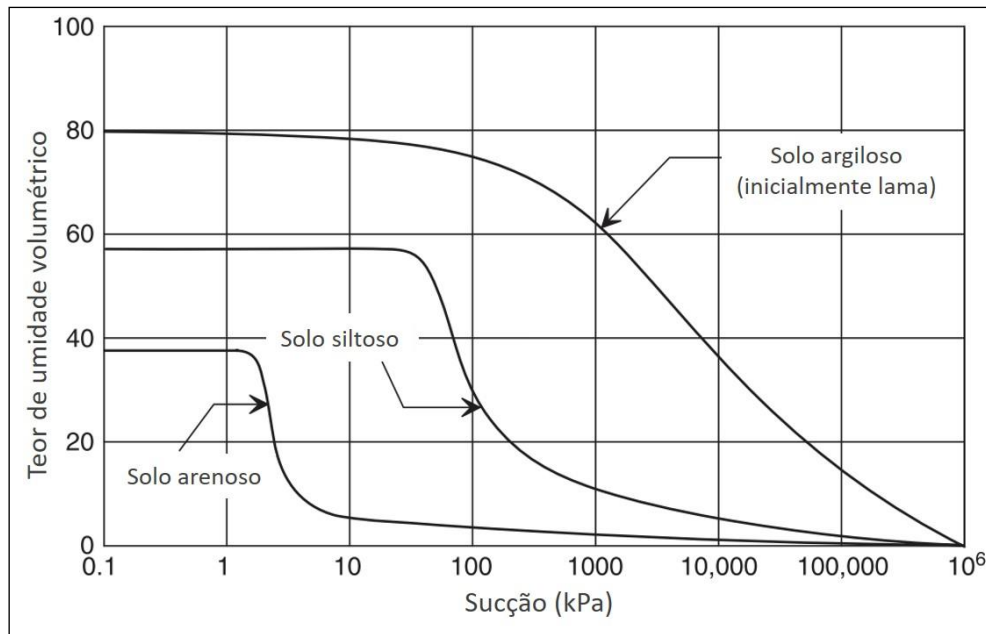


Figura 2.6 Curva de retenção de vários tipos de solo (Modificado de Fredlund et al., 2012).

As curvas de retenção são obtidas em ensaios de laboratório, e com dois procedimentos diferentes, nas trajetórias de secagem ou de umedecimento. Cada um desses procedimentos gera uma curva de retenção diferente, provocado por um fenômeno chamado “histerese” (Figura 2.7). As curvas de retenção de cada procedimento não se superpõem, devido ao efeito da histerese, demonstrando que não existe um equilíbrio único entre o teor de umidade e a sucção do solo (Lu e Likos, 2004).

Devido à histerese, o processo de secagem ou drenagem apresenta sempre valores maiores de umidade para um valor de sucção determinado que no processo de umedecimento ou infiltração. De acordo com Huang et al. (2005), as mudanças dinâmicas do teor de umidade no solo aliado à histerese, fazem com que não exista uma única tendência de secagem ou umedecimento da curva de retenção, dependendo do estado inicial de umidade da amostra e do intercâmbio interativo desta.

Segundo Lu e Likos (2004), são cinco os mecanismos principais causadores da histerese da curva de retenção, tanto em escala microscópica (partículas) quanto macroscópica (interpartículas):

- Os efeitos geométricos, associados à distribuição não homogênea dos poros;
- A condensação capilar, que leva um processo de umedecimento a relativamente pequenos valores de teor de umidade;



- Ar ocluso, refere à formação de bolhas de ar preso nos poros, sem saída, durante o umedecimento;
- Contração e expansão do solo, que podem alterar os poros no estado inicial dos solos de granulação fina durante os processos de secagem e umedecimento, respectivamente;
- O ângulo de contato da histerese, relacionado à diferença intrínseca do ângulo de contato da interface partícula de solo-água na secagem e umedecimento.

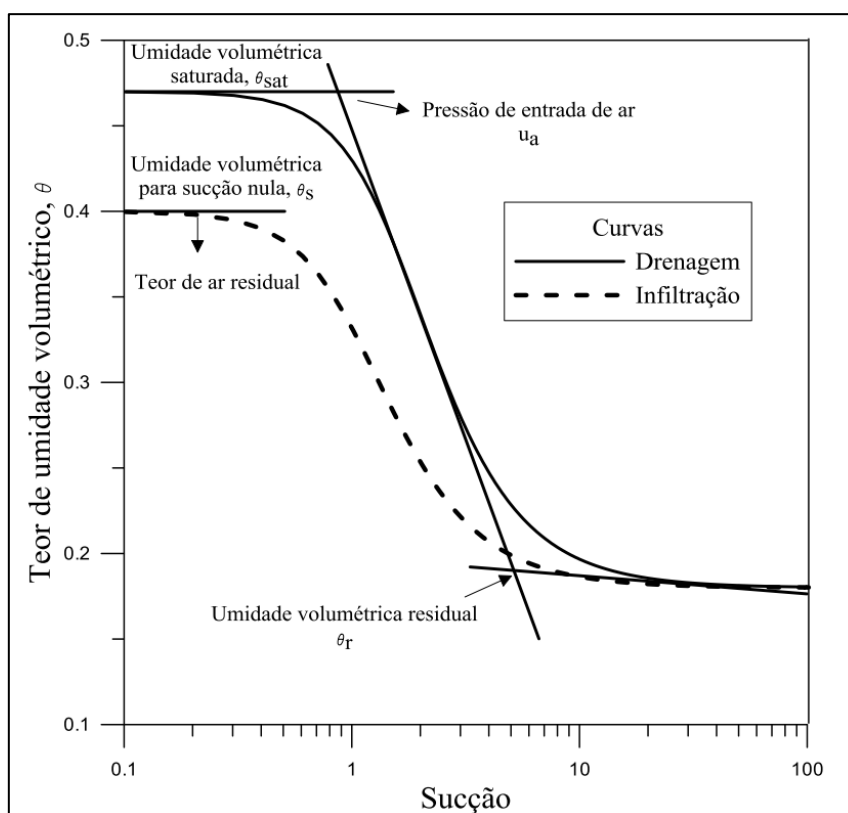


Figura 2.7 Curva de retenção de água no solo com efeito da histerese (Modificado de Menezes, 2013).

Na Figura 2.7 também são apresentados os pontos de maior importância na curva de retenção, a pressão de entrada de ar e o valor do teor de umidade residual. Esses valores dividem a curva de retenção em três distintas zonas que são denominadas (Fredlund et al., 2012): zona de efeito limite na esquerda da pressão de entrada de ar, tendo a característica que praticamente todos os poros estão preenchidos de água; zona de transição localizada entre a pressão de entrada de ar e o valor do teor de umidade residual, onde o fluxo de água ocorre na fase líquida e apresenta presença considerável de bolhas de ar; finalmente a zona residual, caracterizada por uma menor

continuidade da fase água com acréscimo na fase ar levando a valores elevados de sucção com pequenas variações no teor de umidade.

Na literatura existe um número considerável de equações empíricas propostas para melhor ajustar os dados obtidos no laboratório com os diversos métodos de medição da sucção. Segundo Fredlund et al. (2012), essas equações podem ser classificadas como de dois ou três parâmetros. De acordo à heterogeneidade do solo tanto em sua composição mineralógica quanto na distribuição dos tamanhos dos poros, comportamento recorrente nos solos tropicais, existem equações propostas tanto para comportamento unimodal quanto para comportamento bimodal e também aquelas adaptadas para comportamento multimodal. Alguns dos modelos mais usados estão listados na Tabela 2.3.

Com o ajuste obtido com esses modelos matemáticos é possível estimar outros parâmetros dos solos não saturados. Dentre os mais importantes se inclui a condutividade hidráulica não saturada. Existem diferentes modelos matemáticos para estimar a condutividade hidráulica, que podem ser divididos em quatro categorias (Fredlund et al., 2012): modelos empíricos, modelos estatísticos, modelos de correlação e modelos de regressão.

Segundo estes autores, os modelos empíricos reconhecem uma relação entre o comportamento da curva de retenção e a função da condutividade hidráulica, como, por exemplo, na proposta de Brooks e Corey (1964). Os modelos estatísticos se baseiam num modelo físico que represente o conjunto de poros nos quais a água pode fluir, como, por exemplo, nos dos métodos estatísticos de Van Genuchten (1980) e Fredlund et al. (1994). Os modelos de correlação reconhecem uma aparente correlação entre a curva de retenção e a função da condutividade hidráulica, usando essa correlação com um outro parâmetro de solo para adaptá-lo para um solo em particular. Os modelos de regressão usam uma série de coeficientes de condutividade hidráulica de laboratório ou estimados para efetuar o cálculo da função de condutividade.

Cabe ressaltar que os modelos empíricos e estatísticos de estimação da função de condutividade hidráulica são os mais usados na geotecnia, e, portanto, são os de maior interesse no presente trabalho. Maiores informações sobre estes modelos podem ser encontradas em Fredlund et al. (2012).

Tabela 2.3 Modelos empíricos da curva de retenção

Referencia	Equação	Descrição
Brooks e Corey (1964)	$\theta_n = \begin{cases} 1, & \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda, & \psi \geq \psi_b \end{cases}$	<p><math>\lambda</math> = índice de distribuição de poros</p> <p><math>\psi_b</math> = pressão de entrada de ar</p> $\theta_n = \frac{w(\psi) - w_r}{w_s - w_r}$
Van Genuchten (1980)	$\theta_n = \frac{1}{[1 + (\alpha_{vm}\psi)^{n_{vm}}]^{m_{vm}}}$ $m_{vm} = 1 - \frac{1}{n_{vm}}$	<p><math>\alpha_{vm}, n_{vm}, m_{vm}</math>, parâmetros de ajuste relacionados ao solo.</p> $\theta_n = \frac{w(\psi) - w_r}{w_s - w_r}$
Fredlund e Xing (1994)	$w(\psi) = C(\psi) \frac{w_s}{\{\ln[e + (\psi/a_f)^{n_f}]\}^{m_f}}$ $C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (10^6/\psi_r)]}$ $\theta_d = \frac{w(\psi)}{w_s}$	<p><math>a_f, n_f, m_f</math> = Parâmetros de ajuste relacionados ao solo.</p> <p><math>C(\psi)</math> = Fator de correção função da sucção na umidade residual.</p>
Durner (1994)	$\theta_n = w_1 \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_1 \psi)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_2 \psi)^{n_2}} \right]^{m_2}$	<p><math>\alpha_1, n_1, m_1, \alpha_2, n_2, m_2</math> = Parâmetros de ajuste relacionados ao solo</p> <p><math>w_1</math> = Fator de ponderação das subcurvas</p> $\theta_n = \frac{w(\psi) - w_r}{w_s - w_r}$
Gitirana e Fredlund (2004)	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_{b1}\psi_{res1}})^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_{res1}\psi_{b2}})^{d_2}} + \frac{S_3 - S_4}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_{b2}\psi_{res2}})^{d_3}} + S_4$ $S_i = \frac{\tan \theta_i (1 + r_i^2) \ln(\psi/\psi_i^a)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)}$ $+ (-1)^i x \frac{(1 + \tan^2 \theta_i)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} \sqrt{r_i^2 \ln^2(\psi/\psi_i^a) + \frac{a^2(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)}{(1 + \tan^2 \theta_i)}} + S_i^a$ $\theta_i = -(\lambda_{i-1} + \lambda_i)/2;$ $r_i = \tan[(\lambda_{i-1} + \lambda_i)/2];$ $\lambda_0 = 0;$ $\lambda_i = \tan^{-1}\{(S_i^a - S_{i+1}^a)/[\ln(\psi_{i+1}^a/\psi_i^a)]\}$	<p><math>S_1^a = 1; S_2^a = S_{res1}; S_3^a = S_b; S_4^a = S_{res2}; S_5^a = 0;</math></p> <p><math>\psi_1^a = \psi_{b1}; \psi_2^a = \psi_{res1}; \psi_3^a = \psi_{b2}; \psi_4^a = \psi_{res2}; \psi_5^a = 10^6</math></p> <p><math>d_j = 2 \exp[1/\ln(\psi_{j+1}^a/\psi_j^a)]</math></p>

### 2.1.5. Resistência dos solos não saturados

Variáveis de estado podem ser definidas dentro do contexto da mecânica, como variáveis que são independentes das características do solo. Essas variáveis são requeridas para a caracterização de um sistema ou uma mistura de fases (Fredlund et al., 2012). No caso dos solos saturados, foi definido por Terzaghi em 1936 o conceito de tensão efetiva (equação 2.2), sendo essa variável suficiente para descrever o comportamento mecânico dos solos demonstrado por evidencia experimental (Fredlund et al., 2012).

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2.2)$$

Onde,  $\sigma'$ : Tensão efetiva;

$\sigma$ : Tensão normal total;

$u_w$ ; Pressão na água nos vazios do solo.

As variáveis do estado de tensões associadas aos solos não saturados são relacionadas às considerações de equilíbrio de um sistema multifásico. Diferentemente do estado saturado, o fato da não continuidade da fase água no solo motivou a diversos pesquisadores à extensão da teoria da tensão efetiva para os solos não saturados. As tentativas mais usadas são apresentadas na Tabela 2.4.

Fredlund e Morgenstern (1977) definiram as variáveis para descrever o estado de tensões dos solos não saturados com três possíveis combinações:  $(\sigma - u_w)$  e  $(u_a - u_w)$ ;  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$ ;  $(\sigma - u_a)$  e  $(\sigma - u_w)$ . Logo depois, Fredlund et al. (1978) demonstraram que a combinação de variáveis  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$ , denominadas tensão normal líquida e sucção mátrica, respectivamente, representa melhor o comportamento mecânico dos solos não saturados na prática. Uma das vantagens dessa combinação de variáveis é que mudanças na poropressão afetam somente a sucção mátrica. Na Figura 2.8 são esquematizadas as variáveis do estado de tensão num solo não saturado.

Tabela 2.4 Expressões para avaliação das tensões efetivas em solos não saturados (Adaptado de Freitas Neto, 2008).

Expressão Proposta	Parâmetros	Autores
$\sigma' = \sigma - \beta' \cdot u_w$	<p><math>\sigma'</math>: Tensão normal efetiva</p> <p><math>\sigma</math>: Tensão normal total</p> <p><math>u_w</math>: Poropressão</p> <p><math>\beta'</math>: Fator de ligação, que é uma medida do número de ligações sob tensões efetivas.</p>	Croney et al. (1958)
$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$	<p><math>u_a</math>: Pressão de ar</p> <p><math>\chi</math>: Parâmetro relacionado com o grau de saturação.</p>	Bishop (1959)
$\sigma' = (\sigma \cdot a_m) + (u_a \cdot a_a) + (u_w \cdot a_w) + R' + A$	<p><math>a_a</math>: Parte da área total ocupada pelo ar</p> <p><math>a_m</math>: Área de contato ocupada pelos sólidos</p> <p><math>a_w</math>: Parte da área total ocupada pela água</p> <p><math>R'</math>: Resultante das forças de repulsão</p> <p><math>A</math>: Resultante das forças de atração</p>	Lambe (1960)
$\sigma' = \sigma - \psi \cdot p''$	<p><math>p''</math>: Deficiência de poropressão.</p> <p><math>\psi</math>: Parâmetro que varia de 0 a 1</p>	Aitchison (1961)
$\sigma' = \sigma - \beta \cdot p''$	<p><math>p''</math>: Poropressão negativa tomada como um valor positivo</p> <p><math>\beta</math>: Fator estatístico do mesmo tipo da área de contato, medido experimentalmente</p>	Jennings (1961)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m(h_m + u_a) + \chi_s(h_s \cdot u_a)$	<p><math>\chi_m</math>: Parâmetro de tensão efetiva para sucção mátrica</p> <p><math>h_m</math>: Sucção mátrica</p> <p><math>\chi_s</math>: Parâmetro de tensão efetiva para a sucção de soluto</p> <p><math>h_s</math>: Sucção de soluto</p>	Richards (1966)
$\sigma' = \sigma + \chi_{m1}p_m'' + \chi_{s1}p_s''$	<p><math>p_m''</math>: Sucção mátrica</p> <p><math>p_s''</math>: Sucção de soluto</p> <p><math>\chi_m</math> e <math>\chi_s</math> Parâmetros que variam de 0 a 1 dependendo da trajetória de tensões.</p>	Aitchison (1973)

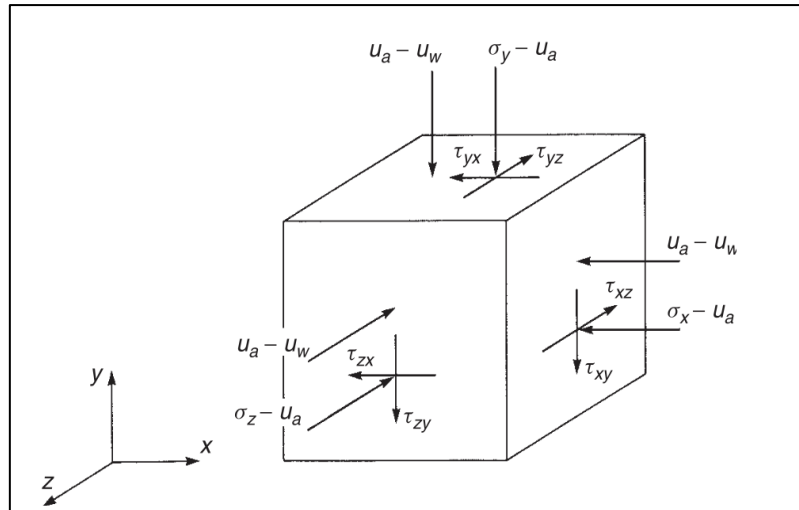


Figura 2.8 Estado de tensão para solos não saturados (Modificado de Fredlund et al., 2012).

Definidas as variáveis do estado de tensão, foram desenvolvidas diversas relações constitutivas para correlacionar com as propriedades dos solos. No caso dos modelos de resistência ao cisalhamento podem ser apresentados como uma extensão do critério Mohr-Coulomb (Fredlund et al., 1978). A equação proposta por esses autores é mostrada na equação 2.3.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)_f \text{tg}\phi' + (u_a - u_w)_f \text{tg}\phi^b \quad (2.3)$$

Onde,  $c'$ ,  $\phi'$ : parâmetros efetivos de resistência do solo saturado;

$(\sigma - u_a)_f$ : tensão normal líquida atuante no plano de ruptura, na ruptura;

$(u_a - u_w)_f$ : sucção mátrica na ruptura;

$\text{tg}\phi^b$ : parâmetro que quantifica um aumento na resistência devido a um aumento na sucção.

Bishop et al. (1960, apud Camapum et al., 2015) consideraram o critério de resistência de Mohr-Coulomb e propuseram uma equação de resistência ao cisalhamento (equação 2.4). Comparando as equações 2.3 e 2.4, observa-se que apesar de ter concepções teóricas diferentes, resultam em equações equivalentes (equação 2.5). Na prática, as vantagens na determinação

do parâmetro  $\phi^b$  reforçam o emprego atual dessa equação como base para avaliar a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados (Camapum et al., 2015).

$$\tau = c' + (\sigma_f - u_a)_f tg\phi' + \chi(u_a - u_w)_f tg\phi' \quad (2.4)$$

$$tg\phi^b = \chi tg\phi' \quad (2.5)$$

Onde,  $\chi$ : parâmetro do solo relacionado ao grau de saturação, entre 0 e 1.

A representação da envoltória de resistência, diferentemente dos solos saturados, é definida num gráfico tridimensional (Fredlund et al., 1978). Essa representação foi denominada envoltória de ruptura estendida de Mohr-Coulomb (Figura 2.9). Num solo não saturado, variações na tensão normal líquida provocam resposta diferente no comportamento mecânico, que variações na sucção mátrica aplicadas individualmente (Jennings e Burland, 1962).

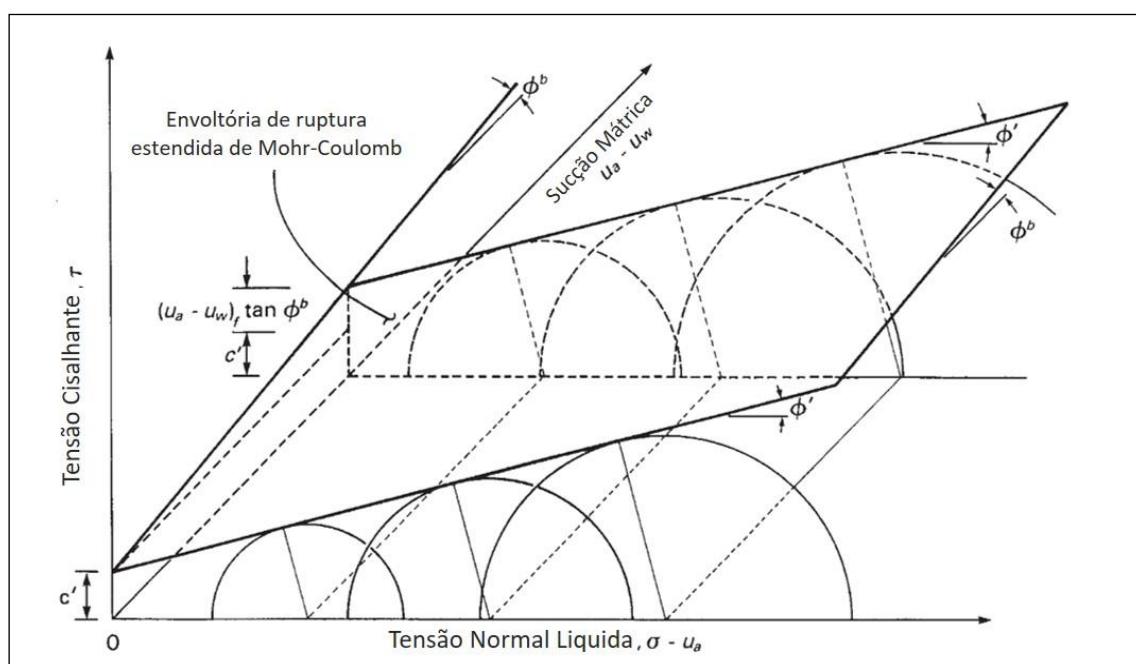


Figura 2.9 Envoltória de resistência de solos não saturados (Adaptado de Fredlund et al., 2012).

Há igualdade da coesão efetiva à aparente somente na saturação (Figura 2.9), observando-se um aumento linear da coesão aparente com o aumento da sucção, devido à variação constante

de  $\phi^b$ . Em alguns casos a coesão apresenta mudanças de valor para diferentes teores de umidade, sugerindo a existência de valores de intercepto de coesão devido ao efeito da cimentação dos grãos para valores de umidade altos (Camapum et al., 2015).

Fredlund et al. (1978) consideraram  $\phi^b$  constante, embora diversos autores mostraram que isso não acontece (Escario e Sáez, 1986; Fredlund et al., 1987; Futai, 2002). Grande parte dos solos não saturados apresenta comportamento não linear de  $\phi^b$ , começando de um valor próximo a  $\phi'$  até uma sucção aproximadamente da primeira entrada de ar, decrescendo até manter-se relativamente constante para valores de sucção maiores (Fredlund et al., 1987).



## 2.2. Resistividade Elétrica

Segundo Braga (2006), a geofísica pode ser dividida em quatro grupos maiores: gravimétrico, magnetométrico, geoeletricos e sísmicos. Dentre os métodos geoeletricos destaca-se a resistividade elétrica, definida como a dificuldade que apresenta um material para ser atravessado pela corrente elétrica, e na geotecnia tem sido muito utilizada em análise de geotecnia ambiental ou na geotecnia de disposição de resíduos, mas também constitui um método para estimar propriedades dos solos.

### 2.2.1. Princípios básicos da resistividade elétrica

O fenômeno da corrente num meio, em especial à corrente contínua, é gerado desde uma fonte com dois terminais, dos quais um apresenta potencial positivo e o outro potencial negativo, conseguindo gerar uma diferença de potencial constante. A equação 2.6 apresenta a lei de Ohm, utilizada para representar o comportamento de muitos elementos condutores em condições ordinárias, incluído metais e condutores iônicos.

$$R_e = \frac{V}{I} \quad (2.6)$$

Onde,  $R_e$ : Resistência elétrica;

$V$ : Diferença de potencial;

$I$ : intensidade da corrente elétrica.

A resistividade elétrica ( $\rho$ ) é uma característica intrínseca a cada material, não dependendo da geometria do condutor. Segundo Braga (2006), a resistividade está ligada aos mesmos mecanismos pelos quais a corrente elétrica se propaga. Na equação 2.7 é apresentada a relação para calcular a resistividade elétrica. As características elétricas de um meio também são comumente relacionadas com a condutividade elétrica que apresenta um comportamento inversamente proporcional à resistividade elétrica.

$$\rho = R_e * A/l \quad (2.7)$$

Onde,  $\rho$ : Resistividade elétrica (ohm x m);

$A$ : Área da seção transversal (m<sup>2</sup>);

$l$ : Comprimento (m).

Segundo Weemees (1990), existem três diferentes processos pelos quais a corrente elétrica é transferida: o fluxo de elétrons em um condutor elétrico, a condução eletrolítica, e a condução dielétrica. O primeiro processo relaciona-se com a condução ôhmica ou eletrônica; o segundo quando a transferência é realizada com a migração de cátions e ânions num eletrólito em resposta a um campo elétrico; e o terceiro se relaciona com as mudanças produzidas na eletrônica, iônica ou polarização molecular pela aplicação de um campo elétrico variável no tempo.

### **2.2.2. Resistividade elétrica em solos**

O solo, meio trifásico, constituído de uma fase sólida, líquida (água) e gasosa (ar), apresenta um comportamento diferenciado na medição da resistividade elétrica, que é resultado da sobreposição dos diversos fenômenos que afetam a condução elétrica num meio poroso. As partículas sólidas do solo são usualmente consideradas elementos isolantes e, portanto, não atravessados pelas linhas de corrente.

Na tentativa de interpretação do fenômeno de condução no solo, Archie (1942) introduz o conceito do “fator de formação” (FF), parâmetro adimensional definido como a razão entre a resistividade integral do solo ( $\rho_b$ ) e a resistividade do fluido intersticial ( $\rho_w$ ), conforme equação 2.8. Esta equação é uma simplificação do fenômeno, ao considerar que não existe a condução elétrica na superfície das partículas, que varia exclusivamente em função da geometria dos vazios formados entre grãos (Weemees, 1990). Essa expressão foi desenvolvida para solos granulares, motivo pelo qual nos solos finos o FF é denominado fator de formação aparente, ao desprezar a condução na superfície das partículas nos minerais de argila. Esse

fator, segundo Archie (1942), também é correlacionado com outros parâmetros, mostrando sua forma mais completa, conforme as equações 2.9 e 2.10.

$$FF = \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (2.8)$$

$$\rho_b = a \cdot \rho_w \cdot n^{-m} \quad \text{Solos saturados} \quad (2.9)$$

$$\rho_b = a \cdot \rho_w \cdot n^{-m} \cdot S^{-b} \quad \text{Solos não saturados} \quad (2.10)$$

Onde,  $n$ : porosidade do solo;

$S$ : grau de saturação;

$m$ : constante que depende da cimentação das partículas;

$a$  e  $b$ : constantes que dependem do tipo de solo;

Devido ao mostrado anteriormente, pode-se observar a importância de definir os fenômenos que condicionam o valor da resistividade do solo, dentre eles segundo Samouëlian et al. (2005) estão a natureza dos constituintes sólidos (granulometria, mineralogia), arranjo dos vazios (porosidade, distribuição dos poros, conectividade), grau de saturação (teor de umidade), resistividade elétrica do fluido (concentração de solutos) e temperatura. A seguir, se apresentam os principais efeitos que geram esses fenômenos.

#### • Natureza dos constituintes sólidos

Os constituintes sólidos têm uma influência forte devido à forma dos seus grãos, que varia passando de uma forma mais arredondada, quanto maior o grão, para uma forma mais lamelar, quanto menor o tamanho, aumentando a superfície de contato entre as partículas nesse último caso. As partículas de areias são formadas principalmente por quartzo, que é praticamente isolante num meio saturado, podendo-se assumir que a condução nos solos arenosos ocorre pelo líquido intersticial (Weemee, 1990). As argilas, de modo geral, apresentam resistividade elétrica menor, ao possuírem forma lamelar. As partículas sólidas das argilas possuem também uma elevada capacidade de troca catiônica, podendo gerar cargas na superfície das partículas

sólidas (Weemees, 1990). Na Figura 2.10 são mostradas as faixas de variações de alguns solos (sedimentos) de acordo à sua textura e também de alguns tipos de rochas.

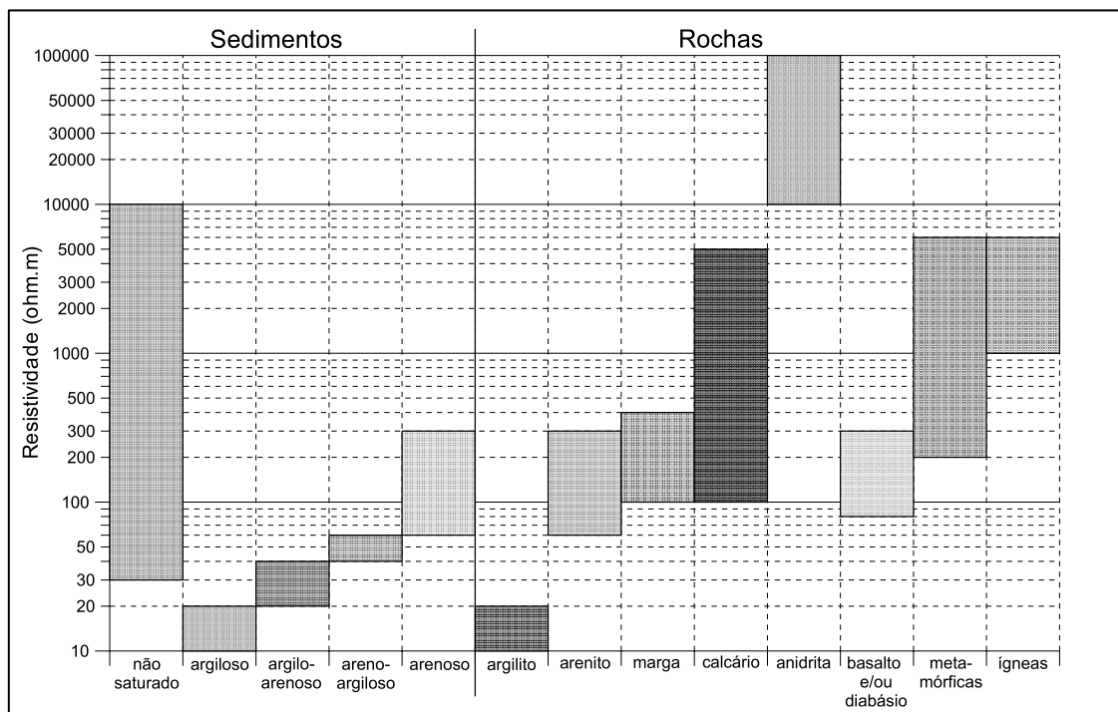


Figura 2.10 Faixas de variações da resistividade em alguns solos e rochas (modificado de Braga, 2006).

### • Grau de saturação

Segundo Samouëlian et al. (2005), a corrente elétrica no solo é principalmente eletrolítica, baseada no deslocamento de íons no líquido nos seus vazios. Esse fato faz que o valor da resistividade elétrica varie com o grau de saturação (teor de umidade) do solo. Por isto, Braga (2006) considera os valores de resistividade na zona não saturada do solo como atípicos, devido à ampla faixa de variação encontrada (Figura 2.10), tendo o grau de saturação maior influência que a natureza dos solos.

Na Figura 2.11 é mostrada uma relação empírica apresentada por Pozdnyakov et al. (2006) ilustrando a variação da resistividade elétrica com o logaritmo do teor de umidade no solo como uma relação de segmentos de retas, representando cada segmento um estágio do tipo de água no solo. A resistividade tende a crescer progressivamente com diminuição do teor de umidade, atingindo maiores valores quando somente há água adsorvida no solo.

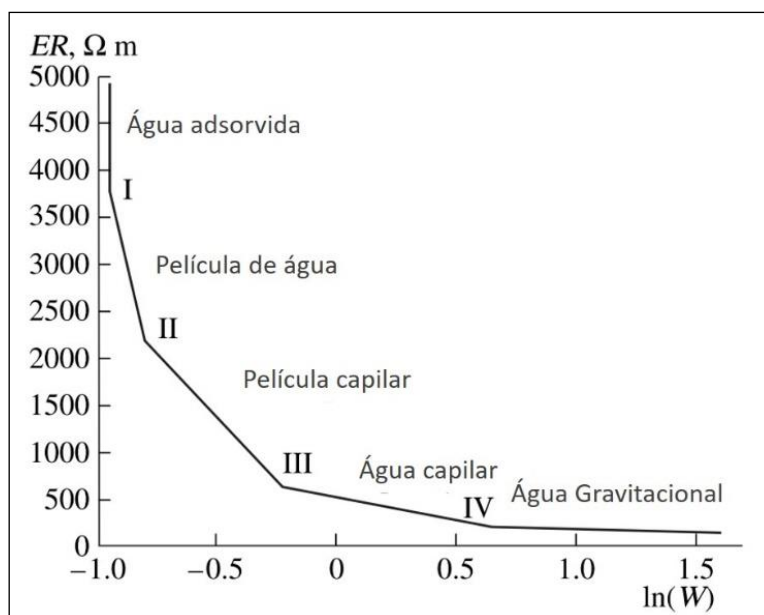


Figura 2.11 Relação entre a resistividade elétrica e teor de umidade (modificado de Pozdnyakov et al., 2006).

#### • Teor de íons no fluido intersticial.

A quantidade de compostos iônicos eventualmente presentes no fluido intersticial é uma variável importante na interpretação dos resultados da resistividade elétrica. A transferência de carga se dá por meio de reações de oxirredução entre os elementos em solução, e geralmente quanto maior a condutividade, maior a concentração de íons no fluido intersticial (Campanella et al., 1990 apud Pacheco, 2004).

Weemees (1990) sugere uma relação linear entre a concentração de íons e a condutividade para estimar os sólidos dissolvidos na solução. De acordo com Long et al. (2012), a resistividade decresce rapidamente com o incremento do teor de sais no fluido intersticial. No entanto, para Samouëlian et al. (2005), fluidos intersticiais na mesma concentração, mas com diferente composição iônica podem possuir diferentes condutividades elétricas, resultando numa faixa ampla de possíveis valores de condutividade em diferentes solos.

#### • Temperatura

Segundo Samouëlian et al. (2005), a agitação dos íons na água intersticial aumenta com a temperatura, como resultado da diminuição da viscosidade. Assim, a resistividade diminui quando há um aumento na temperatura do fluido intersticial. Na literatura existem diversas

correlações empíricas tentando normalizar as medidas para uma temperatura padrão. Abu-hassanein et al. (1996) confirmaram essa afirmação mostrando no seu trabalho como a resistividade decresce com o aumento da temperatura.

### 2.2.3. Resistividade em laboratório

No desenvolvimento das correlações entre os parâmetros geotécnicos e os métodos geofísicos tais como a resistividade elétrica, os métodos utilizados na medição têm sido desenvolvidos mediante modelos propostos para uso em laboratório por diversos pesquisadores (Rhoades et al., 1977; Kalinski e Kelly, 1993; Abu-hassanein et al., 1996; Peixoto et al., 2010). Visando o reconhecimento geotécnico ou de contaminantes, diversos arranjos e formatos de eletrodos têm sido desenvolvidos (Figura 2.12).

No Brasil, existem pesquisas que abrangem o estudo da resistividade elétrica em laboratório (Pacheco, 2004; Aquino, 2010; Peixoto et al., 2010). Essas pesquisas foram desenvolvidas com a finalidade de auxiliar a interpretação dos resultados da resistividade elétrica e relacionar com parâmetros dos solos.

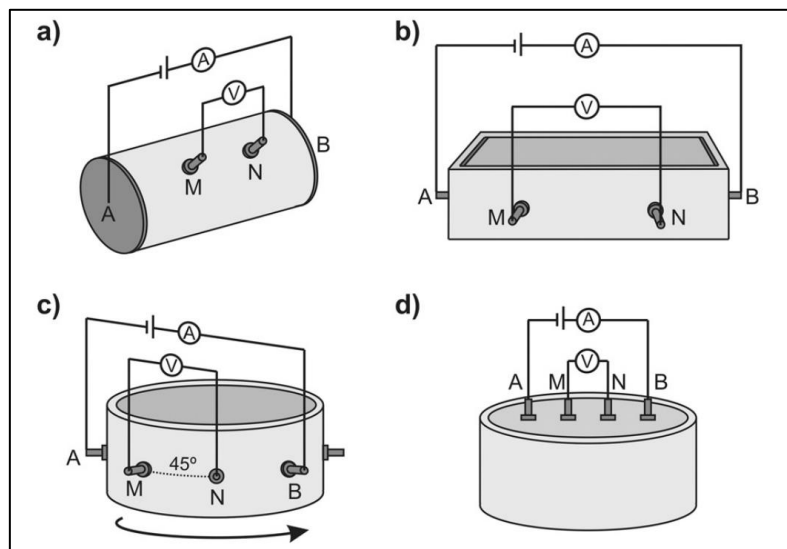


Figura 2.12 Esquemas utilizados na medição de resistividade em laboratório (Modificado de López-Sánchez et al., 2017): a) Esquema similar ao utilizado por Martinho et al. (2006); b) Caixa Miller normatizado pela ASTM G57-06 utilizado por Pozdnyakova (1999); c) Esquema utilizado por Kalinski e Kelly (1993); d) Esquema utilizado por Rhoades et al. (1977) e Amidu; Dunbar (2007).

As medições executadas em laboratório podem ser afetadas pelas condições do contorno e pela distância dos eletrodos de potencial a esse contorno (Goudswaard, 1957). Outra variável importante é a separação entre eletrodos no arranjo utilizado, aumentando-se a variação do valor real da leitura quanto maior essa separação, ou seja, quanto mais próximo ao contorno (Goudswaard, 1957).

### 2.2.4. Tipos de levantamentos de resistividade elétrica

Os ensaios de resistividade elétrica realizados *in situ* têm a finalidade de avaliar áreas de grandes extensões de maneira não destrutiva e com menores custos. Braga (2006) apresentou uma classificação dos métodos geoeletricos, baseada na técnica de investigação e nos arranjos de desenvolvimento de campo. (Figura 2.13).

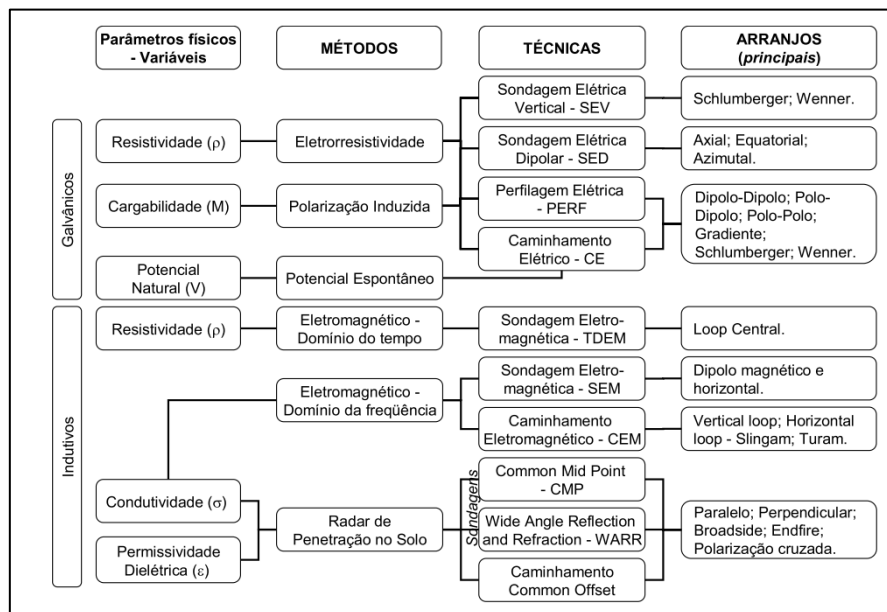


Figura 2.13 Classificação dos métodos geoeletricos (Modificado de Braga, 2006)

Segundo Braga (2006), as técnicas mais usadas para determinação da resistividade são definidas segundo a variação do parâmetro estudado, como:

- Investigações das variações do (s) parâmetro (s) físico (s) em profundidade, a partir de um ponto fixo na superfície do terreno (sondagens elétricas verticais);

- Investigações laterais a partir de pontos não fixos na superfície do terreno, com uma ou mais profundidades constantes (caminhamentos elétricos);
- Investigações no interior de furos de sondagens mecânicas (perfilagens de poços)

A maioria dos principais métodos geoeletricos, como a resistividade elétrica, consta de um arranjo multi-eletrodos, 4 eletrodos denominados comumente AMNB. Um par de eletrodos serve para introduzir corrente elétrica no subsolo (AB), sendo os eletrodos externos, enquanto os eletrodos internos são utilizados para medir a diferença de potencial (MN). Existem diversas configurações de eletrodos, ou seja, diferentes arranjos (Figura 2.14).

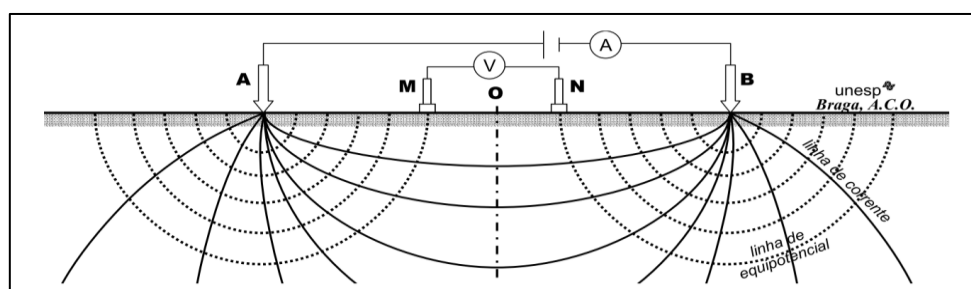


Figura 2.14 Configuração usual de 4 eletrodos (Modificado de Braga, 2006).

Lembrando-se da lei de Ohm (equação 2.6) e juntando com a equação 2.7, define-se a relação usada para obter o valor da resistividade nos ensaios, tanto de laboratório quanto *in situ* (equação 2.11):

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.11)$$

Onde,  $\Delta V$ : Diferença de potencial medida nos eletrodos de recepção de potencial (MN);

$K$ : Constante geométrica do arranjo.

A constante  $K$  tem dimensões de comprimento e depende da geometria de disposição dos eletrodos, tomando-se em conta a diminuição do potencial com a distância. Cabe destacar que esse fator varia dependendo do arranjo utilizado. Como o meio subsuperficial não é isotrópico nem homogêneo o valor da resistividade elétrica varia em cada ponto, tanto lateral quanto em profundidade, também dependendo do arranjo utilizado (Gandolfo, 2007).

A sondagem elétrica vertical (SEV) é uma das técnicas mais utilizadas nos estudos de pesquisas ambientais, hidrogeológicas e geotécnicas. Essa técnica, segundo Braga (2006), consiste na



sucessão de medidas de resistividade a partir de um ponto fixo na superfície, mantendo uma separação crescente dos eletrodos tanto de emissão de corrente (AB) quanto de recepção de potencial (MN), obtendo-se dados da variação da resistividade em profundidade partindo do ponto definido na superfície.

Na técnica da SEV são utilizados de modo geral dois tipos de arranjos, o Wenner e o Schlumberger (Figura 2.15). O arranjo Schlumberger consiste em manter fixa a distância “a” que separa os eletrodos M e N e acrescentar a distância “L” entre os eletrodos A e B e o ponto central do arranjo. Esse ponto central é aquele no qual se representa os dados de resistividade. O arranjo Wenner consiste em movimentar tanto os eletrodos de corrente (AB) quanto os de potencial (MN) mantendo a distância “a” igual entre eles e acrescentando em torno ao ponto central do arranjo.

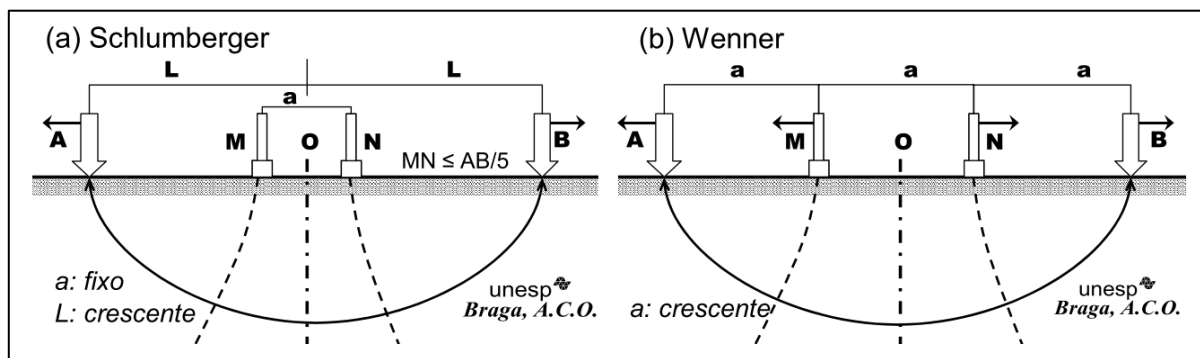


Figura 2.15 Esquema de arranjos típicos da SEV (Modificado de Braga, 2006)

Cada um desses arranjos tem suas características próprias, como sua própria constante geométrica (K) (Tabela 2.5). O levantamento com a técnica da SEV atinge uma profundidade de caráter empírica, definida como  $AB/4$ , ou seja, que está relacionada com a distância máxima atingida pelos eletrodos de corrente. Embora existam diversas asseverações sobre essa profundidade, essa é a mais aceita.

Tabela 2.5 Constantes geométricas (K) dos arranjos utilizados nas SEVs.

Arranjo	K
Schlumberger	$\pi \cdot \frac{(\overline{AM} \cdot \overline{AN})}{\overline{MN}}$
Wenner	$2 \cdot \pi \cdot a$

### 2.3. Análises de estabilidade

Análises de estabilidade de taludes artificiais como de encostas visam avaliar a situação do talude diante de prováveis instabilidades devidas tanto a fatores antrópicos como também a diversos processos decorrentes da interação solo-atmosfera. Taludes naturais podem ser constituídos por solo residual e/ou coluvionar, além de rochas, e estão sempre sujeitos a problemas de estabilidade, já que as ações das forças gravitacionais naturalmente contribuem para a deflagração do movimento (Camapum et al., 2015).

Escorregamentos são movimentos de massa rápidos com superfície de ruptura bem definida, caracterizada pela formação de uma superfície de cisalhamento continua na massa de solo (Camapum et al., 2015). As tensões cisalhantes mobilizadas na massa de solo atingem um valor igual à resistência ao cisalhamento desse material, gerando uma ruptura na trajetória que apresenta a menor resistência.

Segundo Camapum et al. (2015), uma massa pode romper segundo diferentes formas: circular, planar, multiplanar, mista, etc. Essa forma está em geral condicionada à presença de heterogeneidades ou descontinuidades ao longo do perfil. Assim, quanto mais relativamente homogêneo se apresenta o solo, a tendência da superfície de ruptura é ter forma circular.

Para avaliar a estabilidade do talude pode-se adotar o conceito de Fator de segurança (FS), segundo a equação 2.12 numa abordagem determinística. Esse fator de segurança é assumido constante ao longo da superfície de ruptura. Caso o  $F_s = 1$  o talude se encontra na condição de ruptura iminente, e quando  $F_s > 1$  este se encontra estável.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (2.12)$$

Onde,  $F_s$ : Fator de segurança;

$\tau_f$ : Resistência média ao cisalhamento do solo;

$\tau_d$ : Resistência média ao cisalhamento mobilizada ao longo da superfície de ruptura.

Dentre os métodos de equilíbrio limite para análise de estabilidade, cabe ressaltar aqueles que utilizam a divisão da massa de solo em fatias, que se baseiam em satisfazer as três condições de equilíbrio (equilíbrio de forças na direção vertical, equilíbrio de forças na direção horizontal e equilíbrio de momentos) em cada fatia (Duncan et al., 2014). Na Tabela 2.6, estão apresentados alguns dos métodos de equilíbrio limite mais utilizados na literatura.

Esses métodos podem ser classificados em rigorosos e não rigorosos, o primeiro grupo sendo aqueles que satisfazem todas as condições de equilíbrio e o segundo os que não as satisfazem. O número de equações de equilíbrio disponíveis é menor que o número de incógnitas nos problemas de estabilidade de taludes. Como resultado, todos os métodos de estabilidade de taludes assumem diferentes hipóteses para resolver um problema determinado. No caso dos métodos rigorosos essas hipóteses não provocam um efeito significativo no valor do fator de segurança (Fredlund e Krahn, 1977; Duncan, 1996).

Tabela 2.6 Características dos métodos de equilíbrio limite (adaptado de Camapum et al., 2015).

Método	Superfície	Equilíbrio de forças	Equilíbrio de momentos	Comentários
Fellenius (1936)	Circular	A força N é obtida por equilíbrio em relação à normal à superfície de ruptura	Satisfaz	Elimina os termos das forças (E, X) interlamelares.
Bishop (1955)	Circular	A força N é obtida por equilíbrio em relação à vertical	Satisfaz	Despreza a parcela das forças tangenciais (X) interlamelares.
Spencer (1967)	Circular	Satisfaz	Satisfaz	As forças interlamelares (X, E) são representadas por sua resultante, com inclinação constante ( $\theta$ ).
Sarma (1973, 1979)	Não circular	Satisfaz	Satisfaz	Introduz uma função de distribuição para as forças tangenciais (X) entre fatias.
Morgenstern & Price (1965)	Não circular	Satisfaz	Satisfaz	A inclinação da resultante das forças interlamelares (X, E) é representada por uma função de distribuição
Janbu (1975)	Não circular	Satisfaz	Satisfaz	Existe método simplificado para incorporar efeitos das forças interlamelares

Na Figura 2.16 são esquematizadas as forças atuantes nas fatias da massa de solo de um talude, onde:  $W$ , é o peso do material da fatia;  $N$ , a força normal na base da fatia;  $R$ , o raio;  $x$ , a distância desde a linha central de cada fatia ao centro de rotação;  $h$ , a altura central de cada fatia no centro da base;  $a_L$ , distância perpendicular da resultante do empuxo provocado pela água na trinca de tração ao centro de rotação;  $A_L$ , resultante do empuxo da água;  $\alpha$ , ângulo entre a tangente do centro da base da fatia com a horizontal;  $\beta$ , comprimento da base da fatia.

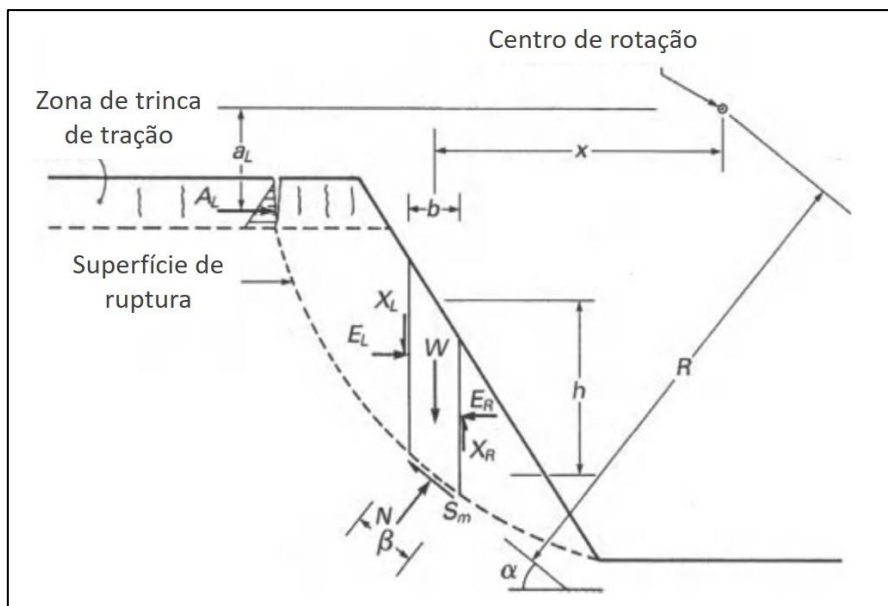


Figura 2.16 Forças atuando nas fatias da massa do solo ao longo da superfície de ruptura (adaptado de Fredlund et al., 2012).

Um dos métodos mais usado na literatura é de Morgenstern e Price (1965), definido como um método rigoroso, cumprindo todas as condições de equilíbrio, além de não precisar de uma forma determinada da superfície de ruptura. As incógnitas nesse método são, o fator de segurança ( $F_s$ ), o parâmetro escalar ( $\lambda$ ), a força normal na base da fatia ( $N$ ), a força horizontal entre fatias ( $E$ ) e sua localização. A hipótese utilizada por esses autores foi assumir as forças de cisalhamento entre fatias ( $X$ ) relacionadas às forças horizontais ( $E$ ), segundo a equação 2.13.

$$X = \lambda f(x)E \quad (2.13)$$

Onde,  $X$ : Força cisalhante entre fatias.

$E$ : Força normal entre fatias.

$f(x)$ : função que descreve a variação de  $X/E$  ao longo da superfície de ruptura.

$\lambda$ : constante escalar que representa a porcentagem da função  $f(x)$  usada para resolver a equação do fator de segurança.

A função  $f(x)$  é assumida, oferecendo uma variedade de funções que podem ser utilizadas, dentre as mais típicas: constante, meio seno, trapezoide, etc. Independentemente do tipo de função escolhida, a influência no valor do fator de segurança calculado é pequena. Trata-se de um método iterativo, o qual é resolvido ao convergir o fator de segurança tanto na somatória de forças quanto de momentos, segundo a teoria geral do equilíbrio limite. Na Figura 2.17 observa-se a variação desses fatores de segurança e sua convergência com a variação do fator  $\lambda$ , onde se mostra que outros métodos podem ser considerados casos especiais quando  $\lambda = 0$ , (Bishop, Janbu) e convergindo para um valor próximo ao método Spencer. Esses outros métodos não serão discutidos no presente trabalho, uma comparação entre eles pode ser encontrada em Fredlund e Krahn (1977).

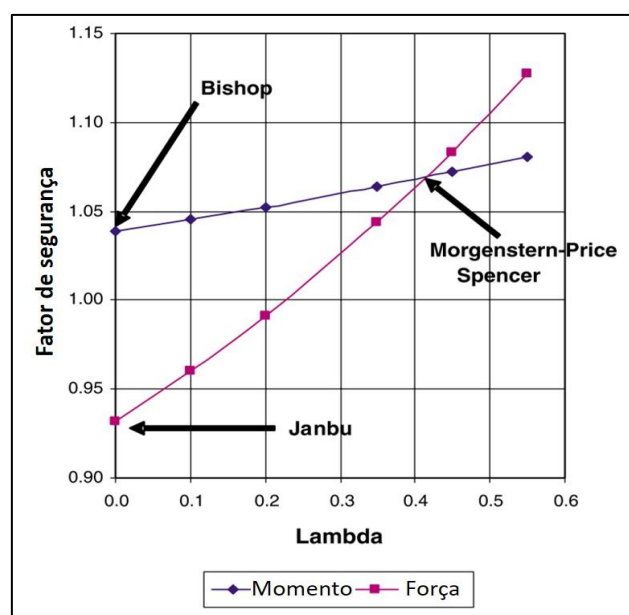


Figura 2.17 Esquema representado fator de segurança vs  $\lambda$ . (Adaptado de Krahn, 2003).

Esses métodos mais tradicionais podem apresentar algumas limitações ao serem resolvidos em *softwares* de estabilidade, ao supor uma superfície totalmente circular, existindo a possibilidade de não representar o menor valor do fator de segurança. Métodos de otimização da superfície tem sido utilizados em conjunto com os métodos de análise de estabilidade baseados em programação dinâmica (Baker, 1980). Greco (1996) apresentou um método de otimização baseado no método Monte Carlo do tipo passo aleatório, partindo de uma superfície base e dividindo-a em vértices, adicionando outro vértice entre os anteriores com cada iteração, procurando a minimização do fator de segurança.

A condição de instabilidade ( $F_s = 1$ ) é atingida caso haja aumento de tensões cisalhantes ou redução de resistência, devido a diversos mecanismos (Tabela 2.7), dentre eles pode-se mencionar a variação da poropressão (Fredlund et al., 2012).

Tabela 2.7 Principais fatores deflagradores dos escorregamentos (Adaptado de Camapum et al., 2015).

Mecanismo	Ação	
Variação das tensões cisalhantes mobilizadas		
Ação antrópica: Ocupação desordenada de encostas	Execução de cortes  Construção de estruturas  Acúmulo natural de materiais	
Perda de resistência ao cisalhamento		
Variação na pressão da água nos poros	Infiltração interna por ruptura de tubulação de água ou esgoto	
	Infiltração da água de chuva	Desenvolvimento de poropressão positiva por elevação do lençol freático
		Redução dos níveis de sucção
		Geração de fluxo preferencial através das fraturas do embasamento rochoso

## 2.4. Análise de Fluxo

A interação solo-atmosfera, é governada pelos fatores ambientais e climáticos, sendo estes, quem regulam a quantidade de infiltração no solo, propiciando a variação da poropressão e finalmente um aumento no nível d'água com a infiltração profunda. Segundo Rahardjo et al. (2005), a taxa de infiltração é dependente das condições climáticas, mostrando que chuvas pequenas podem contribuir mais na infiltração, enquanto chuvas maiores contribuem mais ao fluxo superficial, além que a infiltração tende a diminuir com a intensidade das chuvas.

Wilson (1990) definiu o movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera como composto por 3 fases: interface solo-atmosfera, zona não saturada e pela zona saturada mais profunda. Podem ser destacados três fatores nesse movimento, primeiro o suprimento ou demanda de água pela precipitação, evapotranspiração, o segundo fator refere-se à capacidade do solo de transmitir água e a influência do nível d'água como segunda fonte de suprimento de água e o último fator à influência da vegetação.

Nas análises de fluxo, a criação de modelos numéricos são ferramentas fundamentais no entendimento da interação entre os diversos fenômenos envolvidos. Esses modelos visam simular a situação *in situ*, através da solução de equações diferenciais, no caso, da equação geral de fluxo (equação 2.14). Fazendo-se uso de aproximações numéricas, como no método dos elementos finitos, esta equação possibilita a execução de análises tanto em regime permanente quanto para regime transiente.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R_v = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.14)$$

Onde,  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$ : são as componentes da condutividade hidráulica nas direções x, y e z;

$S_s$ : armazenamento específico;

$R_v$ : volume d'água introduzido ou retirado do sistema;

$h$ : carga hidráulica;

$t$ : intervalo de tempo.

Feitosa et al. (2008) sugeriram os seguintes passos na modelagem numérica do fluxo: inicia-se com a definição do modelo conceitual (geometria, horizontes, contornos físicos, parâmetros, etc.). Continua-se com a formulação matemática e escolha do pacote computacional, existindo grande variedade de *softwares*, por exemplo o módulo *SEEP/w* da *GEOSTUDIO*, que através do método de elementos finitos oferece a vantagem do acoplamento dos resultados das análises de fluxo com outros tipos de análises comuns na geotecnia (ex. estabilidade), possibilitando visualizar os efeitos das variações no fluxo nessas análises. Após esse passo, continua-se com a esquematização do modelo, escolhendo a discretização do problema, seleção de intervalo de tempo (*time-step*) e condições de contorno. Segundo Cleary (2007), as condições de contorno mais utilizadas nas simulações de fluxo são:

- Primeiro tipo ou Dirichlet: Carga hidráulica especificada no contorno, que pode ser constante ou função do espaço e/ou do tempo;
- Segundo tipo ou Neumann: O fluxo de água subterrânea é especificado no contorno, definido como uma taxa volumétrica de fluxo por unidade de área ( $m^3/m^2/dia$ ), podendo ser nulo ou não;
- Terceiro tipo ou mista: Fluxo dependente da carga, que é uma combinação dos tipos Dirichlet e Neumann.

Continua-se com a fase de calibração do modelo, com ajustes aos parâmetros utilizados para reproduzir as cargas hidráulicas e fluxos medidos em campo. Uma vez calibrado o modelo, é recomendável, quando possível, fazer a verificação a longo prazo do modelo com o monitoramento contínuo da distribuição de carga hidráulica.

Cabe ressaltar que o módulo *SEEP* da *GEOSTUDIO* apresenta uma condição de contorno própria para simular a interação solo-atmosfera, através dos fatores climáticos e ambientais. Esses fatores condicionam a evapotranspiração, que é a combinação da evaporação da superfície do solo com a transpiração das plantas, representando o transporte da água do solo de volta pela atmosfera (Thornthwaite, 1948).

A equação 2.15 representa o balanço hídrico, que permite quantificar o volume de água armazenado em cada componente dos sistemas terrestres, além de permitir computar mudanças no ciclo hidrológico a partir de mudanças em suas componentes (Camapum et al., 2015). Essa equação também mostra a relação da precipitação com a evapotranspiração e a descarga tanto superficial como subterrânea.



$$P - EVR - R - R_g = \Delta S \quad (2.15)$$

Onde,  $P$ : Precipitação;

$EVR$ : Evapotranspiração real;

$R$ : Descarga superficial;

$R_g$ : Descarga subterrânea;

$\Delta S$ : Água armazenada no solo.

Na aproximação da evapotranspiração real (EVR), diferentes campos de estudo como hidrologia, ciências do solo e engenharia geotécnica desenvolveram métodos de estimativa. Na geotecnia, ressalta-se o trabalho de Wilson et al. (1997) (equação 2.16), que propuseram a existência da relação entre a evaporação normalizada com a sucção total, baseados na relação existente da sucção com a umidade relativa.

$$EVR = EVP \left( \frac{e_{op} - e_a}{e_s - e_a} \right) \quad (2.16)$$

Onde,  $EVP$ : Evapotranspiração potencial, mm/dia;

$e_{op}$ : Pressão de vapor da superfície do solo;

$e_a$ : Pressão de vapor do ar;

$e_s$ : Pressão do vapor de saturação à temperatura da superfície da água.

Cabe destacar que a evapotranspiração potencial (EVP) é a quantidade de água que pode se evaporar, quando existe suficiente na superfície do solo. Depende de diversos fatores como: superfície de água livre, profundidade da água, tipo de solo e vegetação. É calculada com base em fatores climáticos como registros pluviométricos, radiação líquida, temperatura, velocidade do vento, umidade relativa, etc. (Fredlund et al., 2012). A ação da energia do sol que atinge a superfície do solo, é quem provoca a transformação da água em vapor pelo processo de

evapotranspiração. Existem diversos métodos na literatura que permitem estimar a EVP, podem-se mencionar Thornthwaite (1948), Penman (1948), Monteith (1965), dentre outros.

O método de Thornthwaite (1948) permite estimar a evapotranspiração potencial com dados climáticos regionais. Esse método, definido nas equações 2.17 a 2.19, é baseado principalmente na temperatura do ar e no fotoperíodo (horas de insolação), conseguindo-se com esses dados representar as condições locais, permitindo estimar com razoável precisão com poucos dados a EVP. Os outros métodos não serão detalhados neste texto.

$$EVP = 0,553 \left(\frac{L_d}{12}\right) \left(\frac{N}{30}\right) \left(\frac{10T_a}{I}\right)^{a_t} \quad (2.17)$$

$$I_t = \sum_{n=1}^{12} \left[ \frac{T_{ai}}{5} \right]^{1,514} \quad (2.18)$$

$$a_t = (6,75 \times 10^{-7}) I_t^3 - (7,71 \times 10^{-5}) I_t^2 + (1,79 \times 10^{-2}) I_t + 0,492 \quad (2.19)$$

Onde,  $L_d$ : Fotoperíodo de determinado dia;

$T_a$ : Temperatura média mensal do ar;

$I_t$ : Índice térmico imposto pelo regime climático total;

$a_t$ : variável função do índice térmico.

$N$ : Dia do mês.

## Capítulo 3

### 3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

A área de estudo tem sido de interesse para pesquisas anteriores por apresentar uma concentração alta de processos de voçorocamento. A seguir será apresentada uma revisão dos trabalhos realizados no local de estudo com o intuito de contextualizá-lo e apresentar resultados prévios de caracterização geotécnica dos solos da área.

#### 3.1. Localização da área de Estudo

A área de estudo, denominada estação Holanda por Bacellar (2000), está localizada entre as cidades de Ouro Preto e Belo Horizonte, na Bacia do rio Maracujá, no distrito de Santo Antônio do Leite, município de Ouro Preto (Figura 3.1). Esta área está situada no embasamento cristalino (Complexo do Baçõ), no interior do Quadrilátero Ferrífero (Door, 1969). A Figura 3.2 apresenta um mapa detalhado da bacia do rio Maracujá, com seus principais tributários e também a localização da estação Holanda, detalhada por Bacellar et al. (2005).

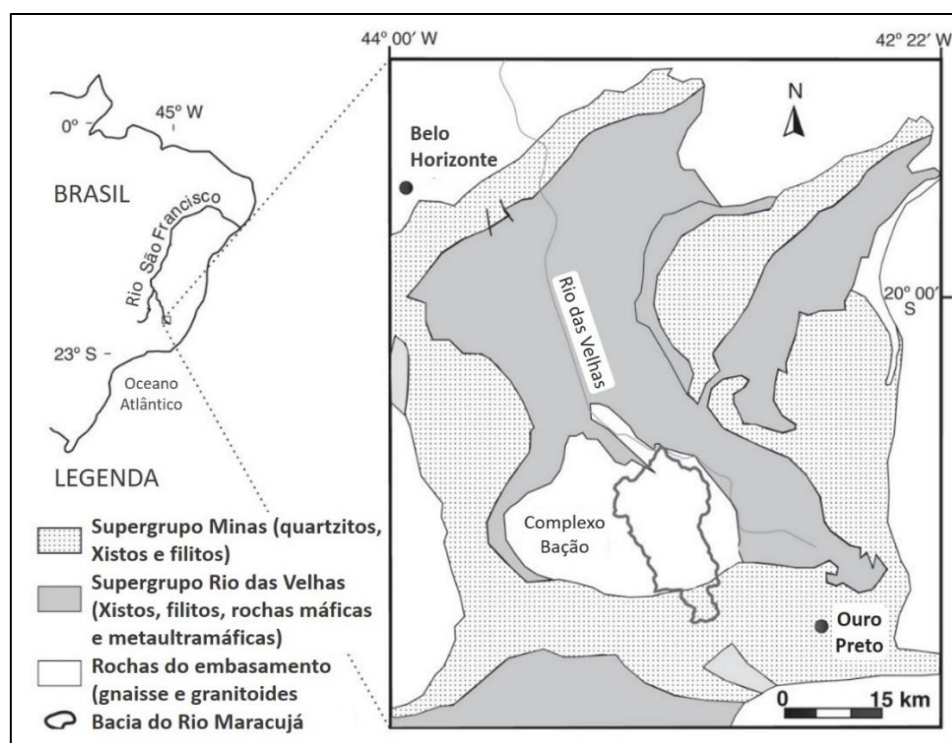


Figura 3.1 Localização da bacia do rio Maracujá (modificado de Bacellar et al., 2005)

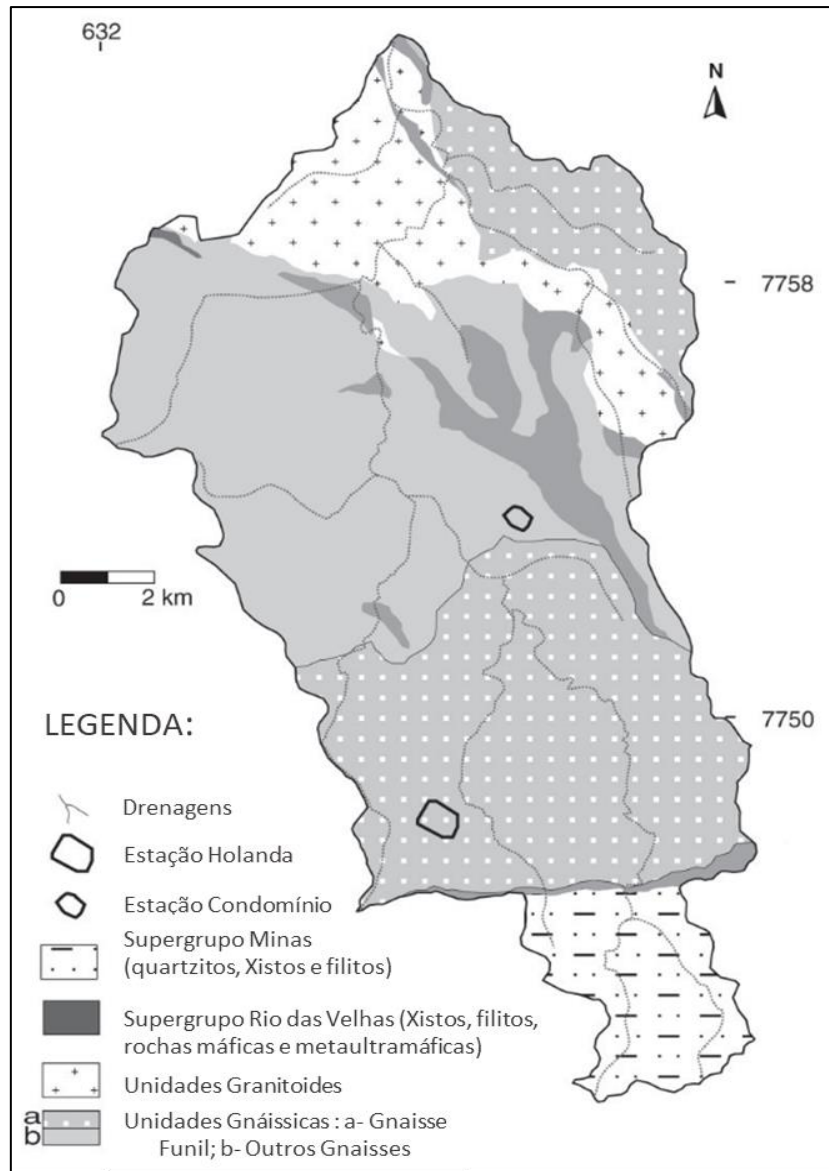


Figura 3.2 Mapa Geológico da bacia do rio Maracujá (modificado de Bacellar et al., 2005).

Devido à existência de uma elevada concentração de feições erosivas (voçorocas) de grandes dimensões, esta área tem sido de interesse para desenvolvimento de diversas pesquisas. É possível classificar as formas de erosão hídrica em: erosão laminar, quando as partículas de solo são removidas de maneira relativamente uniforme devido ao escoamento difuso das águas de chuva; e erosão em canais (linear), devido ao fluxo concentrado de água por caminhos preferenciais (Camapum et al., 2015), esta última subdividida em sulcos e ravinas e voçorocas (Camapum, 2011). Sulcos e ravinas são feições provocadas por erosão superficial, diferenciando-se pelas dimensões, sendo as ravinas as maiores. Quando os processos subsuperficiais de erosão passam também a atuar, como erosão por piping ou por movimento de massa, denomina-se a forma de voçoroca.

O voçorocamento é uma forma de erosão na qual o lençol freático é atingido, podendo alcançar grandes dimensões. Segundo Bacellar (2000), na bacia do rio Maracujá existem um total de 385 feições erosivas, sendo 173 classificadas como voçorocas profundas (com até 50 m de profundidade) e as 212 restantes como ravinas. Dentre essas feições erosivas é possível notar que existe uma alta concentração de voçorocas, esse fato propiciou a realização de diferentes pesquisas na área, abordando diversas variáveis que provocam a gênese e a evolução dessas feições.

A estação Holanda está localizada no domínio com maior concentração de voçorocas na bacia do rio Maracujá. Nessa estação, Bacellar (2000) definiu dois horizontes de solo diferenciados, um horizonte B laterítico na superfície, classificado como de origem coluvial, de 3 a 5 metros de espessura e um horizonte de solo saprolítico (Horizonte C), que se estende até a rocha sã, no caso da estação Holanda, ao Gnaisse Funil (Salaroli, 1999). O horizonte pedológico A se encontra normalmente erodido na área.

Devido aos processos de voçorocamento, foram realizados estudos para avaliar a erodibilidade dos solos (Bacellar, 2000; Silva 2000; Santos et al., 2002; Morais et al., 2004). Nesses estudos foi mostrado como o horizonte B apresentou comportamento não erodível e não desagregável devido principalmente à formação de grumos pelos processos de laterização, além de funcionar como uma barreira protetora do horizonte C saprolítico do solo, com média a alta erodibilidade e desagregável.

Esses estudos de erodibilidade mostraram a grande variação textural nos solos saprolíticos da bacia, devido em parte à foliação e às discontinuidades herdadas da rocha matriz, provocando erodibilidade desigual, e a possibilidade de desenvolvimento de *piping*. De fato, segundo Morais et al. (2007), os solos saprolíticos da região, podem ser divididos enquanto à erodibilidade em: solos pouco suscetíveis ao *piping* com variação da desagregabilidade, solos medianamente suscetíveis ao *piping* e solos muito suscetíveis ao *piping*.

Bacellar (2000) indicou os fatores condicionantes para o desenvolvimento dos processos de voçorocamento na região e determinou algumas propriedades geotécnicas dos solos. Esse autor mostrou que as voçorocas da região tendem a evoluir mais por escorregamentos rotacionais dos taludes que pela erosão hídrica. Portanto, entender o fator de segurança destes taludes é fundamental para tentar estabilizar estas feições, que põe em risco grande número de benfeitorias e de moradores da região.

Consequentemente, constitui-se de maior importância estudos voltados para conhecer o comportamento mecânico e hidráulico dos horizontes do solo, como mostrado a seguir.

### 3.2. Caracterização e parâmetros geotécnicos

Na geotecnia existem diversas formas de classificação de um solo, que atendem desde sua gênese, características mecânicas, mineralogia e outras características que sejam de interesse para sua melhor compreensão. Ao trabalhar com solos tropicais, é ainda mais importante uma caracterização mais detalhada dessas características.

A pedologia encarrega-se de descrever o perfil dos solos por horizontes (A, O, B, C, R) e os classifica pela sua gênese, sendo a classificação pedológica mais usada para gerenciar grandes áreas, como mapas de solos (Futai, 2002). Na geotecnia, os solos tropicais são usualmente classificados como lateríticos, os solos residuais maduros, e saprolíticos, os solos residuais jovens (Lacerda, 2010).

Bacellar (2000) analisou os solos da área de estudo por meio de sondagens a trado e a percussão SPT e determinação dos parâmetros básicos. O horizonte C apresenta comportamento mais variável, fortemente ligado à composição e estrutura da rocha matriz, no caso o gnaisse. O horizonte B é de comportamento laterítico e foi interpretado por Bacellar (2000) como de natureza predominantemente coluvionar na região, cobrindo o horizonte C saprolítico. Os resultados de sondagens SPT feitas na área da Estação Holanda mostram a resistência crescente com a profundidade e um horizonte B com umidade maior que o horizonte C (Figura 3.3). Este autor demonstrou também que a espessura do horizonte B é muito variável na área.

De fato, na área predomina um solo bem desenvolvido (Latosolo) com três horizontes pedológicos (A, B e C), embora o horizonte A se encontre muito delgado ou totalmente removido por erosão. (Figura 3.4 e Figura 3.5). O solo do horizonte B apresenta *in situ* cor avermelhada e espessura variável. O horizonte C apresenta cor rosa, bem diferenciada do Horizonte B, com uma mudança abrupta no perfil do talude da voçoroca.

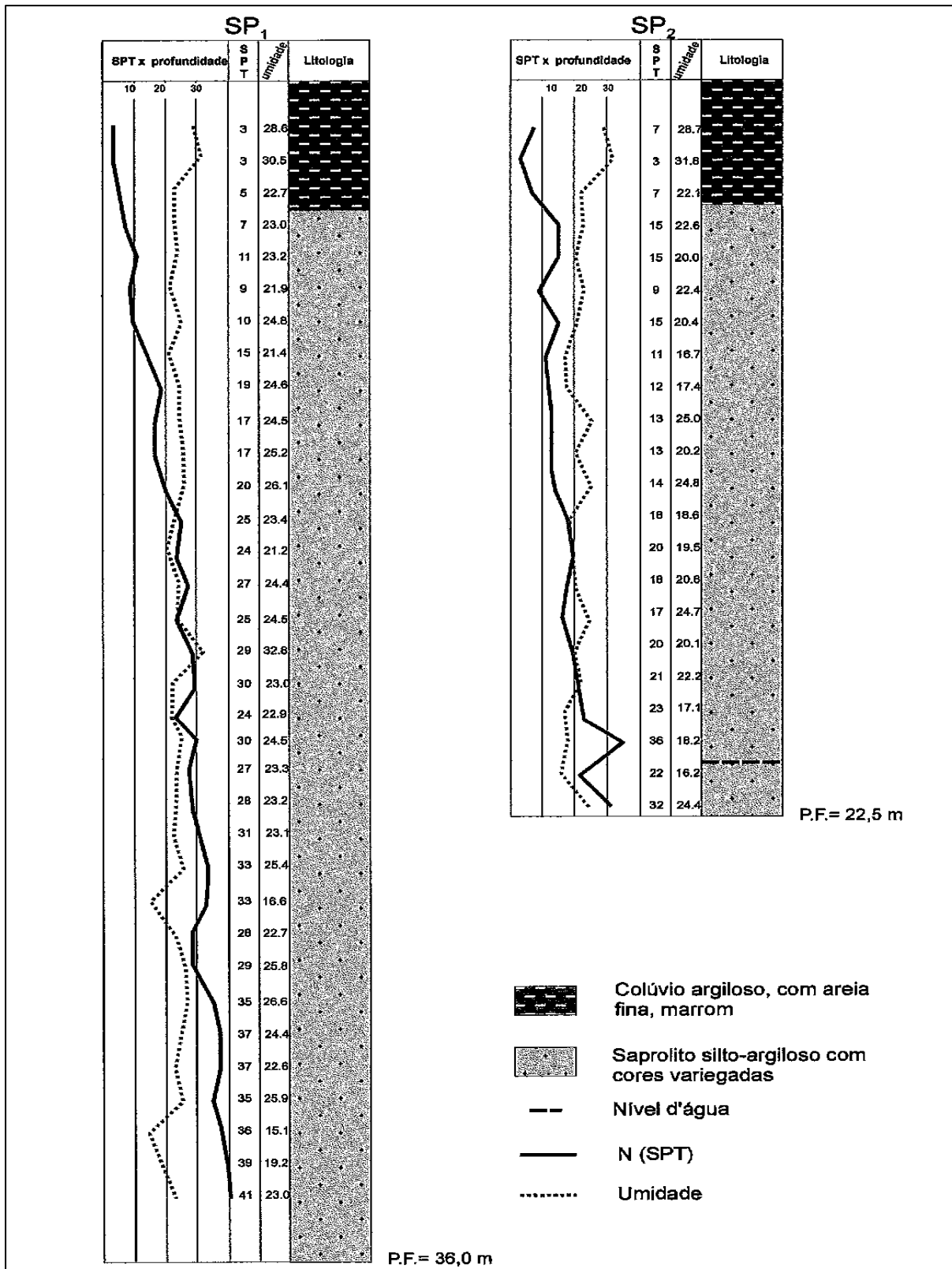


Figura 3.3 Resultados da sondagem a percussão SPT (modificado de Bacellar, 2000)



Figura 3.4 Situação atual do talude de jusante da voçoroca, com linha negra delimitando o horizonte B, pouco erodível, do C (saprolito), com muitos sulcos de erosão.

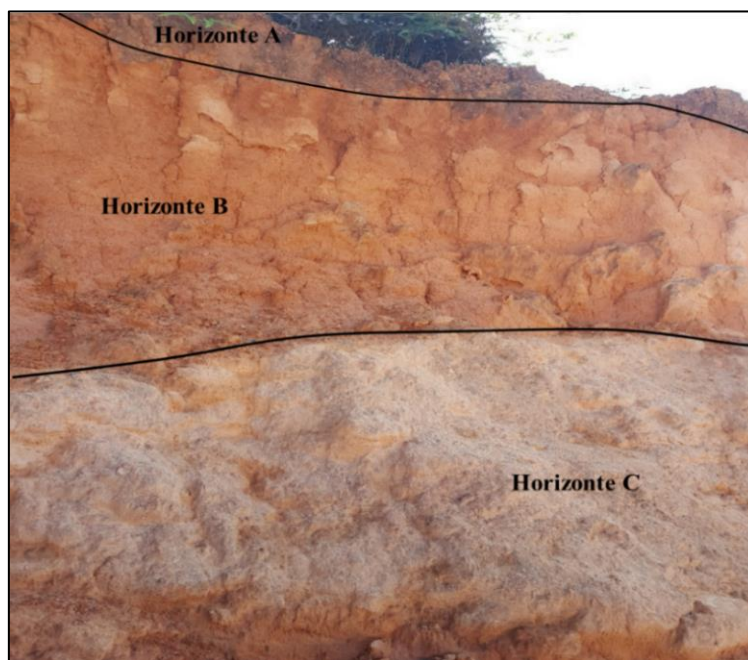


Figura 3.5 Detalhe da transição abrupta entre os horizontes A, B e C em talude da voçoroca

Verifica-se grande diferença textural dos solos da área (Figura 3.6), com o Horizonte B com textura argilo-arenosa e o Horizonte C mais silto-arenoso (Futai, 2002). Na Figura 3.7 são mostradas as localizações dos locais de coleta utilizados nas principais investigações realizadas na estação Holanda.



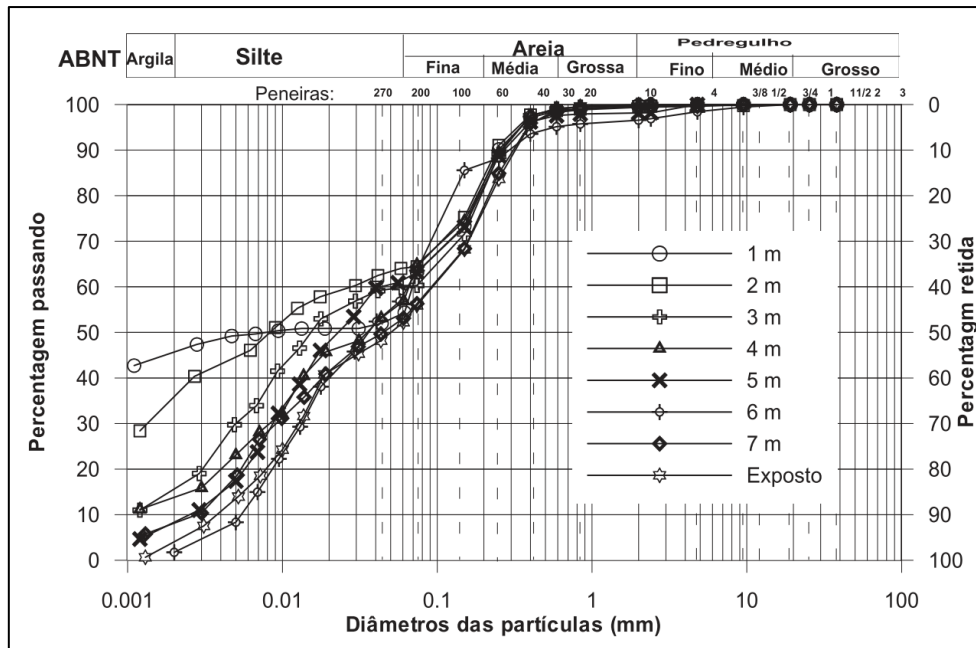


Figura 3.6 Curvas granulométricas dos horizontes do solo da área com uso de agente defloculante no ensaio. Os solos coletados até 2 metros são do horizonte B e os mais profundos e o solo exposto são do horizonte C (Modificado de Futai, 2002).

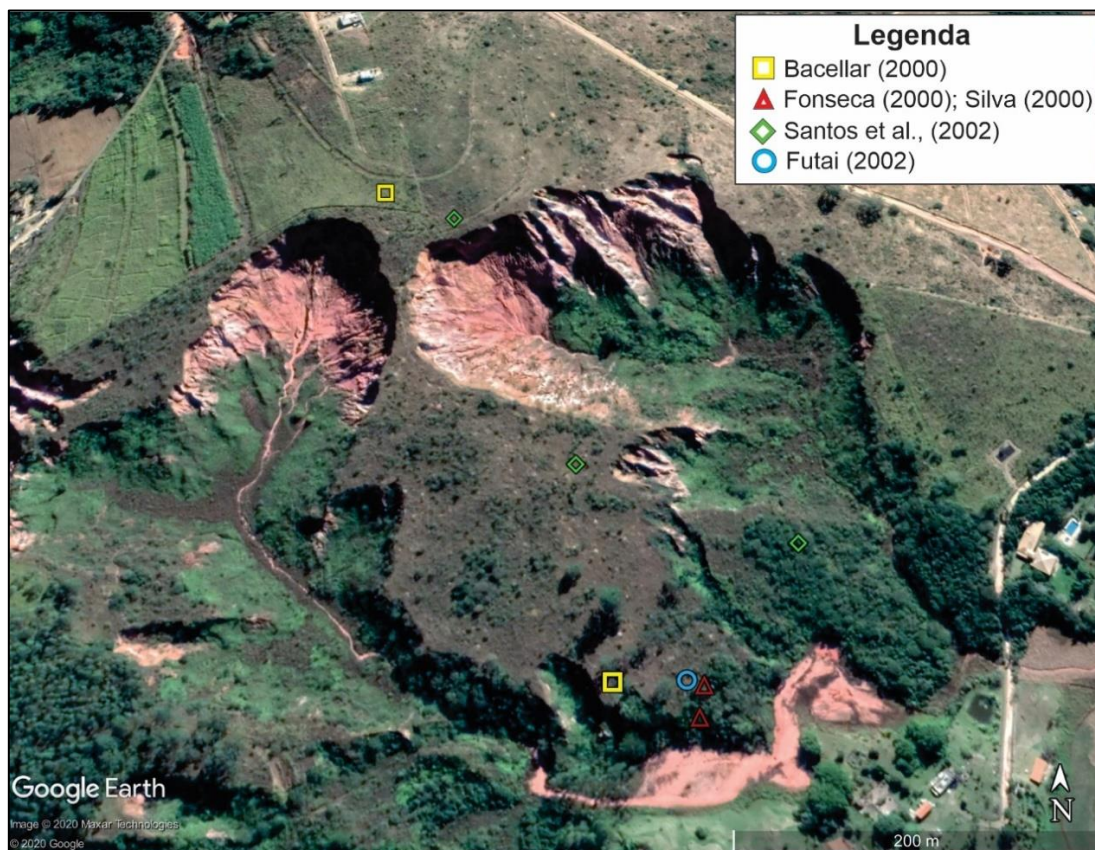


Figura 3.7 Localização dos pontos de coleta de pesquisas anteriores na voçoroca da estação Holanda.

A Figura 3.8 apresenta um perfil com os horizontes, a granulometria e os limites de Atterberg e a variação desses parâmetros em profundidade (Futai, 2002). O horizonte C da área foi classificado como CL- argiloso, com baixa plasticidade por Futai (2002) e CL ou MH por Silva (2000), segundo a USCS. O Horizonte B, por sua vez, foi classificado como KH (solos caulíníticos de alta plasticidade) por Silva (2000), segundo a classificação proposta por Vargas (1988).

Na Tabela 3.1 é mostrado um resumo dos índices físicos (massa específica natural, teor de umidade, índice de vazios, densidade dos grãos, grau de saturação) apresentados por Futai (2002), que se mostraram similares aos encontrados em outros trabalhos (Bacellar, 2000; Silva, 2000). Nesses resultados é possível observar que os índices variam em profundidade, alguns diminuindo e alcançando um patamar (ex, umidade, índice de vazios), entanto que outros aumentam em profundidade (ex, massa específica, grau de saturação e densidade dos grãos). Essas diferenças podem ser atribuídas às diferenças nas composições mineralógicas dos horizontes do solo.

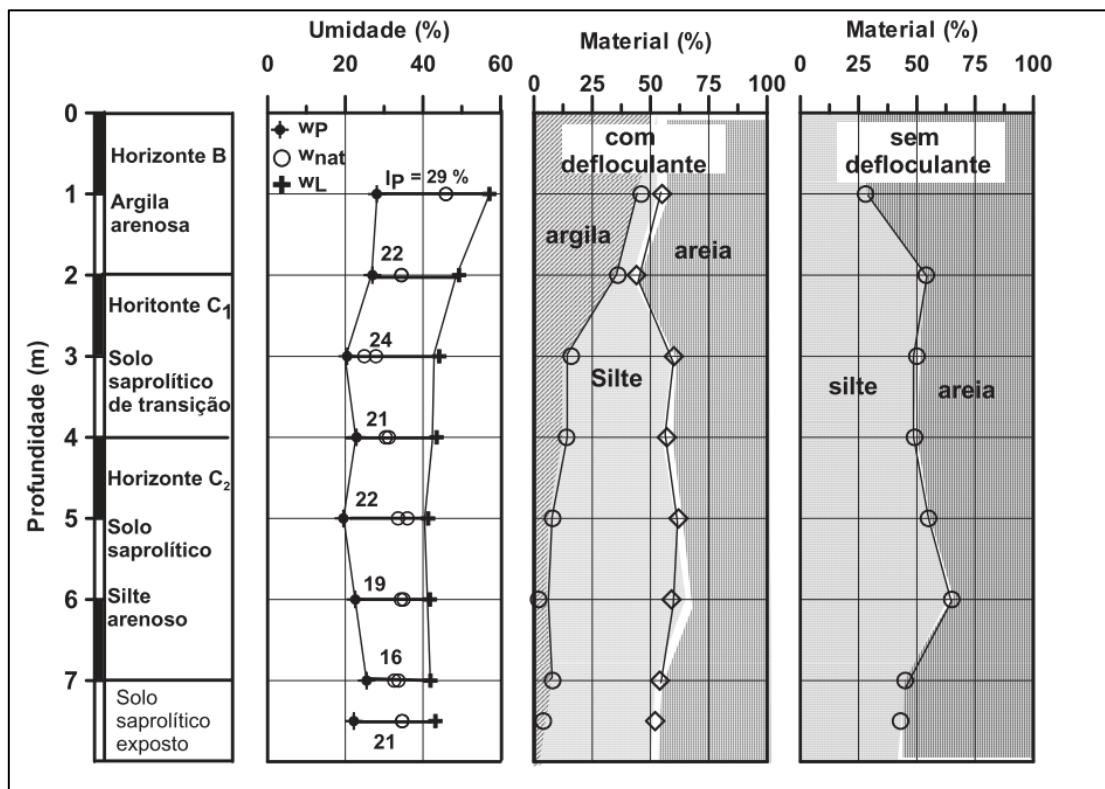


Figura 3.8 Perfis dos limites de Atterberg e composição granulométrica dos solos da área (Modificado de Futai, 2002).

Tabela 3.1 Resumos dos índices físicos dos solos coletados numa trincheira e exposto num talude de voçoroca (Modificado de Futai, 2002).

Horiz. - Prof. (m)	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	Índice de Vazios	$G_s$	S (%)
Horiz. B – (1m)	15.4	45.9	1.45	2.635	83.4
Horiz. B – (2m)	16.3	34.5	1.13	2.632	80.4
Horiz. C – (3m)	18.5	27.9	0.79	2.635	93.1
Horiz. C – (4m)	18.8	30.4	0.83	2.686	98.4
Horiz. C – (5m)	17.4	33.6	1.01	2.675	89
Horiz. C – (6m)	17.6	35	1.03	2.701	91.8
Horiz. C – (7m)	18.1	33.7	0.93	2.661	96.4
Horiz. C – (7.5m)	16.5	34.6	1.13	2.661	81.5

Fonseca (2000) e Futai (2002) apresentaram resultados dos parâmetros de compressão edométrica e de resistência ao cisalhamento dos solos da área (Tabela 3.2). Os solos lateríticos (horizonte B) da área mostram maiores valores do índice de compressão ( $C_c$ ) (Tabela 3.2), devido aos efeitos da cimentação desse horizonte, permitindo a estrutura mais porosa que é uma de suas características.

Tabela 3.2 Parâmetros de compressão edométrica de solos coletados numa trincheira e exposto num talude de voçoroca (Modificado de Futai, 2002).

Horiz. - Prof.(m)	$C_r$	$C_c$	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	$e_0$
Horiz. B – (1m)	0.03	0.44	60	1.34
Horiz. B – (2m)	0.05	0.41	100	1.02
Horiz. C – (3m)	0.05	0.27	200	0.88
Horiz. C – (4m)	0.04	0.29	250	0.93
Horiz. C – (5m)	0.05	0.3	400	0.88
Horiz. C – (6m)	0.03	0.28	450	0.9
Horiz. C – (7m)	0.04	0.42	500	1.05
Horiz. C – Exposto	0.03	0.33	400	1.25

Futai (2002) executou ensaios triaxiais não saturados e não drenados sob sucções controladas, nos solos da estação Holanda nas profundidades de 1 m e 5 m, com sucções iniciais de 100, 300, solo seco e também na condição saturada, sob diversas tensões confinantes (Tabela 3.3). Segundo esse autor, no horizonte B existe coesão efetiva verdadeira causada pela cimentação do material, atingindo intercepto de coesão com valores mais baixos nesse horizonte. O solo do horizonte C, por outro lado, não conta com essa cimentação e o intercepto de coesão efetiva

deve-se ao efeito de dilatação, que provoca o incremento do efeito estrutural (Futai, 2002). O ângulo de atrito mostrou-se maior no horizonte B, na profundidade de 1m, diminuindo no horizonte C (5m). Cabe destacar que em ambos casos ocorre o aumento nos parâmetros, com um respectivo aumento na sucção.

Tabela 3.3 Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos da área com variação de sucção controlada (Modificado de Futai, 2002).

Sucção (kPa)	Tensões confinantes (kPa)	Pico		Condição última		$\theta_b$ (graus)
		$\phi$ (graus)	c (kPa)	$\phi$ (graus)	c (kPa)	
Horizonte B (1m)						
Saturado*	25, 35, 50, 75, 100, 125, 200, 400	27.7	8	28.5	0	14
100	25, 50, 100, 200, 400	33	53	31.4	40	
300	25, 50, 100, 200, 500	33.2	75	31.4	62	
Seco ao ar	25, 100, 200, 400, 600, 800	35,4	125	37,4	24	
Horizonte C (5m)						
Saturado*	25,50,100, 200, 300, 400, 540, 690	26.4	38	28.7	0	11
100	25, 100, 400	25.5	70	27.4	21	
300	25, 100, 200, 400, 800	27.3	77	29.2	26	
Seco ao ar	25, 100, 200, 400, 800	31,2	73	32,5	6	

\* Valores efetivos

Embora a condutividade hidráulica seja um dos parâmetros geotécnicos com maior variabilidade na natureza, resultados prévios feitos em campo e em laboratório com solos da área (Bacellar, 2000; Silva, 2000; Futai, 2002) mostram valores de mesma ordem de grandeza para cada horizonte. Os dados laboratoriais de Silva (2000) mostram maior condutividade hidráulica no solo do horizonte B, concordando com seu índice de vazios maior (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 Resultados ensaios de determinação de condutividade hidráulica por carga variável (Modificado de Silva, 2000).

Tipo de solo	Direção	e	k (cm/s)	$S_{final}$ (%)
Horizonte B	Vertical	1,16	1,01E-04	89,9
	Vertical	1,35	3,20E-04	86,7
	Vertical	1,39	7,33E-04*	86,5
Horizonte C	Vertical	0,82	3,48E-05	100
	Vertical	0,84	5,05E-05	100
	Horizontal	0,79	1,76E-05	100
Horizonte C exposto	Vertical	1,04	6,02E-05	95,3
	Vertical	1,07	6,45E-05	95
	Horizontal a estratificação	1,04	6,63E-05	99

\* Presença de raízes na amostra

Carvalho (2016) apresentou resultados laboratoriais de variação da resistividade elétrica com o teor de umidade dos solos de uma área próxima, também no Complexo do Bação. Esta autora mostrou também a existência de uma grande variação textural destes solos a depender do local de coleta.

Drumond e Bacellar (2006) avaliaram os processos evolutivos de uma voçoroca no Complexo do Bação mostrando uma menor intensidade dos processos de erosão hídrica no período de estiagem em virtude das chuvas menos frequentes. Com monitoramento por um ano hidrológico de piezômetros localizados nas vizinhanças da voçoroca, estes autores demonstraram que o aquífero livre localizado na base do horizonte C é recargado no período de março a agosto, com máximo entre junho e julho, no período de estiagem, devido à percolação lenta da água infiltrada através da espessa camada de solo não saturado.

Consequentemente, esta recarga defasada causa elevação do nível d'água, que explica o desenvolvimento de rastejos (movimentos sistêmicos e lentos observados *in situ*) e pequenos escorregamentos no sopé dos taludes na estação seca. Estes pequenos movimentos de massa na base tornam os taludes das voçorocas mais instáveis e mais suscetíveis a escorregamentos globais, que podem ocorrer ainda na estação seca, mas que predominam quando se inicia o período de chuvas subsequente (Drumond e Bacellar, 2006). Devido às instabilizações recorrentes na estação seca, estes autores verificaram que as maiores taxas de transporte de sedimentos nos córregos provenientes das voçorocas ocorrem nas primeiras chuvas de verão.

Escorregamentos na área ocorrem com grande parte em condição não saturada, já que a superfície freática apenas aflora na base do talude. Futai (2002) elaborou uma simulação de estabilidade de taludes de voçoroca da Estação Holanda, acoplando-a a uma análise de fluxo (Figura 3.9 e Figura 3.10). Na análise de fluxo, este autor definiu o nível freático com condição de carga hidráulica constante a montante e jusante do modelo. Na tentativa de simulação da chuva, foi adotada uma condição de carga de pressão igual zero na superfície do terreno, complementado com intensidades de chuva menores do que a capacidade de infiltração do solo, variando os valores de tempo, intensidade de chuva e períodos de secagem e umedecimento. Este autor, iniciou suas simulações admitindo-se uma condição extrema de seca, atingindo o solo superficial sucção de até 2 MPa, encontrando baixos fatores de segurança (Figura 3.10) quando a condição estacionária de continua entrada de água (saturação) é incorporada na superfície do talude para simular o período de chuvas (Figura 3.9). Desta forma, Futai (2002) considerou que os taludes das voçorocas da área se instabilizariam por perda da coesão aparente conferida pela sucção.

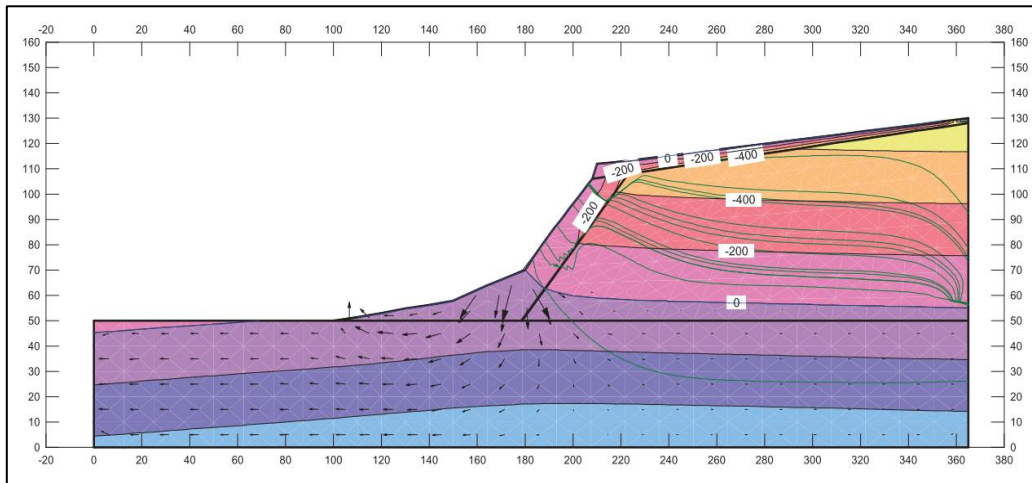


Figura 3.9 Simulação de fluxo transiente sob condição estacionária de infiltração e carga de pressão zero na superfície, adoptando os parâmetros hidráulicos de 1 m e 5 m de profundidade, para os horizontes B e C, respectivamente. É mostrada a variação da poropressão após essa situação hipotética (Adaptado de Futai, 2002).

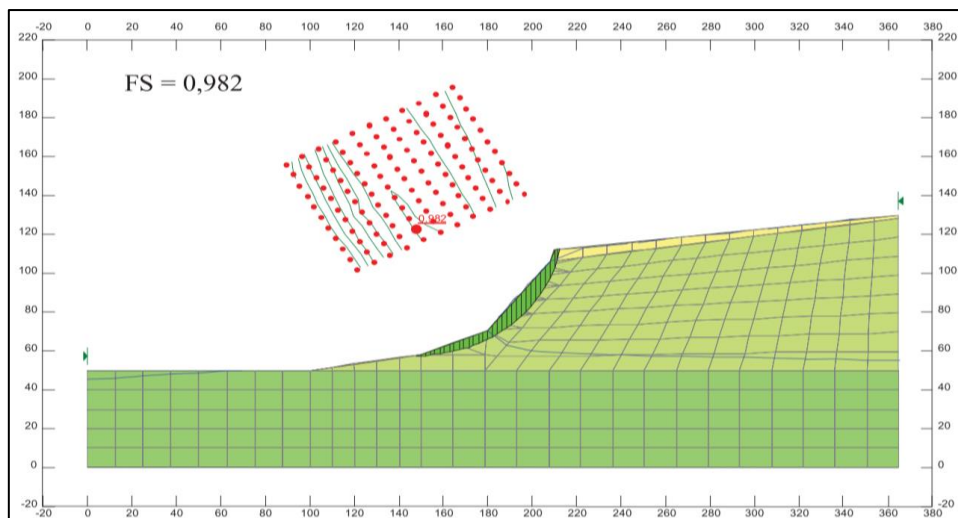


Figura 3.10 Resultado da análise de estabilidade pela condição de fluxo da Figura 3.9, adoptando os parâmetros de comportamento mecânico de pico definidos na Tabela 3.3 nos seus valores efetivos, considerando o efeito da sucção. A superfície de ruptura sob essa situação de fluxo está também representada (Adaptado de Futai, 2002).

Contudo, o acompanhamento sistemático dos taludes das voçorocas nesta região, tem mostrado que a saturação superficial do solo é pouco provável fora da zona de exfiltração no sopé destes taludes, onde verifica-se também uma componente ascendente de fluxo subterrâneo. Esta componente ascendente é acompanhada por pequenos movimentos de massa, como rastejos e escorregamentos rotacionais, observados mesmo na estação seca, como apresentado anteriormente. Diante desses fatos, os padrões de fluxo saturado e não saturado na estabilidade dos taludes destas voçorocas assumem maior relevância.

### 3.3. Clima da região

O complexo Bação encontra-se localizado numa área predominada pelo clima do tipo CWb (temperado – chuvoso mesotérmico) da classificação de Köppen, com duas estações bem diferenciadas, a estação chuvosa no verão, com concentração dos eventos pluviométricos entre os meses de outubro a março, e a estação seca de abril a setembro nos meses de inverno (Bacellar, 2000).

A Figura 3.11 ilustra essa sazonalidade climática na area de Itabirito dentro do Complexo Bação, mostrando a precipitação média no periodo de 1984 a 2000, com media anual de 1348 mm e variação registrada de 1024 mm a 1744mm (Bacellar, 2000). No caso da estimacão da evapotranspiracão no nivel regional, na area da mina de “Capão Xavier”, Amorim et al. (1999) encontraram valores de media anual de 963 mm ao longo de 6 anos de monitoramento.

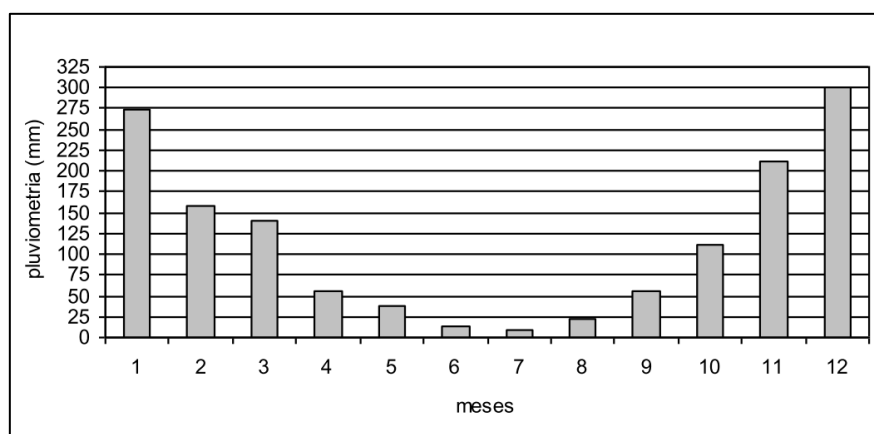


Figura 3.11 Precipitação média mensal em Itabirito de 1984 até 2000, dados da usina hidroelétrica rio das Pedras (adaptado de Drumond, 2006)

## Capítulo 4

---

### 4. MATERIAIS E METODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram feitas as seguintes etapas: coleta de amostras no campo; ensaios de laboratório, nos quais foram estimados os índices físicos e alguns parâmetros geotécnicos do solo, como as curvas de retenção e de resistividade; levantamento de resistividade elétrica *in situ* e; simulação numérica de fluxo e estabilidade do talude da voçoroca. Cada uma dessas etapas será descrita a seguir:

#### 4.1. Etapa 1: Coleta de Amostras no Campo

Nessa primeira etapa foi feita uma campanha de coleta de amostras no campo, na área de interesse, as quais incluíram amostras indeformadas em blocos e anéis de PVC, e também amostras deformadas, para a posterior realização dos ensaios de laboratório dos diferentes horizontes do solo. A área de interesse do projeto de pesquisa encontra-se localizada no distrito de Santo Antônio do Leite, do município de Ouro Preto.

Escavou-se um poço de 1,50mx1,50m e 0,7 m de profundidade para coletar o solo do horizonte B, abaixo do horizonte pedológico A, mais orgânico, com cerca de 0,3 m de espessura (Figura 4.1). Procurou-se na coleta evitar amostras com raízes, embora algumas tenham sido identificadas a maiores profundidades, o que dificultou a amostragem. Neste poço coletaram-se amostras deformadas (bloco indeformado) e amostras em anéis de PVC (Figura 4.2).



Figura 4.1 Poço de coleta de amostras do horizonte B.





Figura 4.2 Coleta de amostras em anéis de PVC e em bloco.

As amostras coletadas do horizonte C foram retiradas da face do talude pela impossibilidade da continuação do poço de coleta até a profundidade necessária para atravessar o horizonte B. Foi escolhido um local favorável do talude da voçoroca (Figura 4.3).

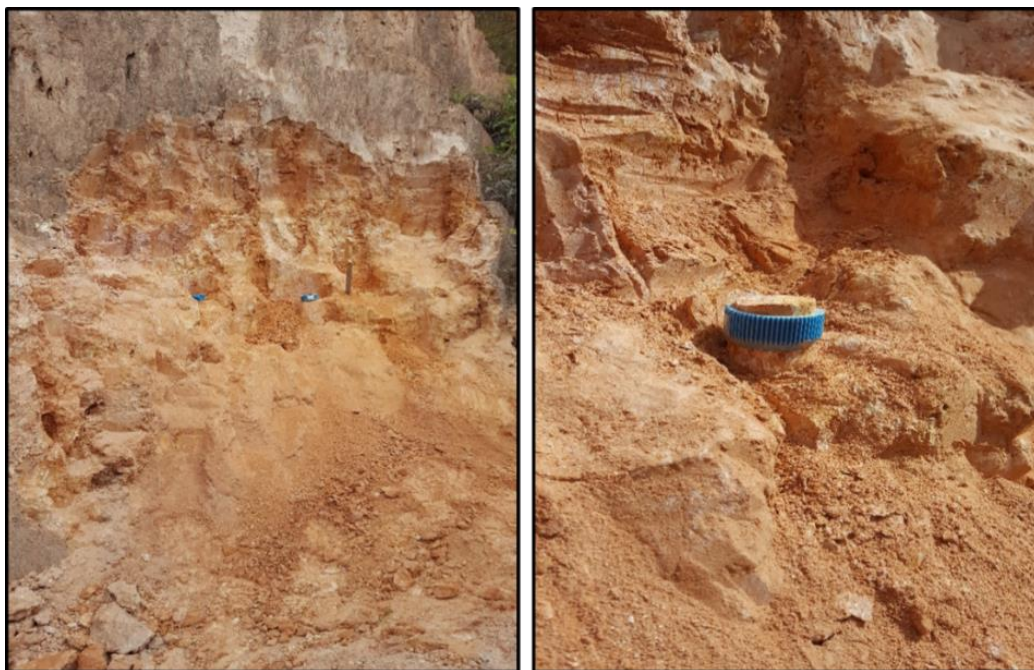


Figura 4.3 Local de retirada das amostras do horizonte C, à distância (esquerda) e no detalhe (direita).

## **4.2. Etapa 2: Ensaio de Laboratório**

A segunda etapa da pesquisa consistiu em ensaios de laboratórios necessários na caracterização dos horizontes do solo, assim como na determinação dos parâmetros geotécnicos necessários para analisar o seu comportamento. Assim, nos seguintes itens são mostrados os procedimentos adotados na obtenção desses índices e propriedades.

### **4.2.1. Caracterização Física do solo**

Nessa etapa foram realizados os ensaios para definição dos limites de Atterberg, sendo eles o limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) em ambos horizontes dos solos, segundo as normas ABNT NBR 6459:2016 e ABNT NBR 7180:2016, respectivamente. O ensaio de análise granulométrica para determinação da curva de distribuição granulométrica foi realizado conforme a norma ABNT NBR 7181:2016. O ensaio para determinação da massa específica dos grãos (Gs) seguiu a norma ABNT NBR 6508:1984. A massa específica aparente do solo foi realizado segundo a norma ABNT NBR 10838:1988. No processo de execução desses ensaios, procedeu-se na determinação do teor de umidade do solo segundo a norma ABNT NBR 6457:2016.

### **4.2.2. Ensaio de Permeabilidade do solo**

Foi realizado também o ensaio de permeabilidade com carga variável segundo a norma ABNT NBR 14545:2000. Esse ensaio foi feito em corpos de prova obtidos a partir das amostras indeformadas coletadas de cada horizonte do solo e com os equipamentos disponíveis no laboratório do NUGEO.

A condutividade hidráulica do solo é um dos parâmetros mais importantes ao trabalhar com solos não saturados, ao ser utilizado na maioria dos modelos usados para estimar as curvas de retenção do solo. Porém, é um parâmetro com uma variação natural significativa e os resultados representam o comportamento apenas do local de coleta. Na Figura 4.4 pode ser observado o corpo de prova obtido diretamente do bloco indeformado e na Figura 4.5 é mostrada a montagem do ensaio de permeabilidade com carga variável, recomendável para solos de textura fina.



Figura 4.4 Preparação do corpo de prova do ensaio de permeabilidade.



Figura 4.5 Montagem do ensaio de permeabilidade.

#### **4.2.3. Ensaio de determinação da sucção**

Na determinação dos valores de sucção da curva de retenção de água foi aplicada a técnica do papel filtro, levando-se em consideração as diferentes vantagens que apresenta e a sua difusão no meio acadêmico (Futai, 2002; Marinho e Oliveira, 2006; Lucas et al., 2011; Campos, 2015). Foi utilizado o papel filtro tipo Whatman no 42, segundo a norma D5298-16 ASTM (2016). O método foi realizado na trajetória de secagem, assim a curva de retenção obtida foi a curva de secagem.

O primeiro passo foi a coleta de amostras, como especificado na seção 4.1. As amostras foram obtidas com tubos de PVC biselados, de dimensões de 5,13 cm de diâmetro e 3 cm de espessura

(Figura 4.6). Foram coletados de 20 a 24 corpos de prova em cada horizonte do perfil do solo, já que são necessários dois anéis para cada ponto da curva de retenção.

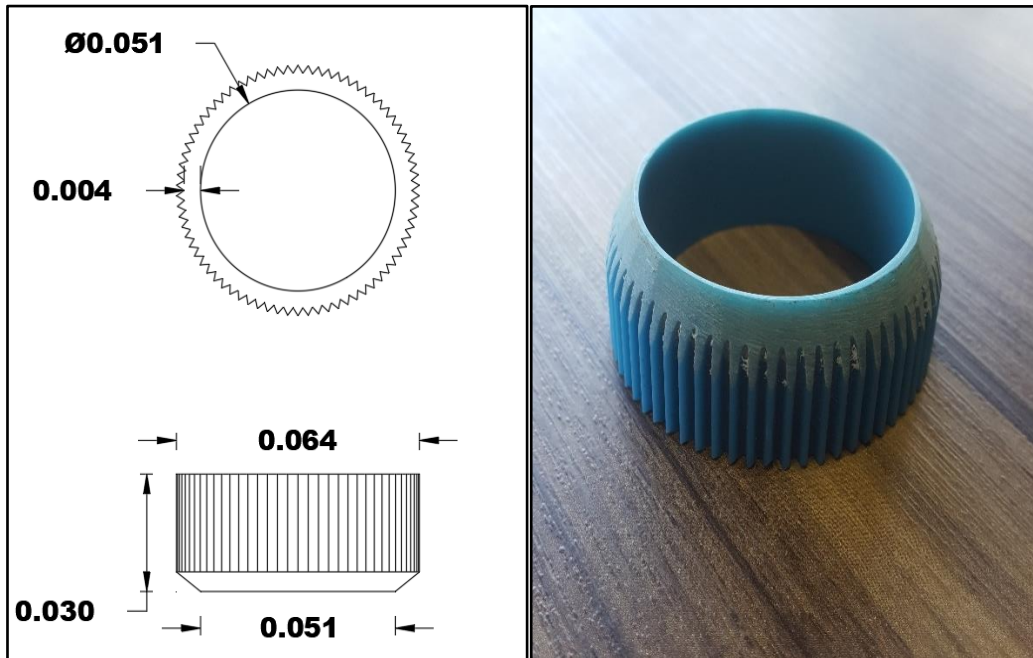


Figura 4.6 Amostrador utilizado para a execução do ensaio da curva de retenção.

Os materiais necessários para o desenvolvimento do ensaio da determinação da sucção pelo método do papel filtro são especificados na norma D5298-16 ASTM (2016), assim como os procedimentos, considerações e recomendações, para poder garantir a acurácia dos resultados obtidos. Esses procedimentos são descritos com detalhes a seguir.

#### • Preparação dos corpos de prova

Como o ensaio foi realizado na trajetória de secagem, as amostras nos anéis de PVC foram moldadas no volume do anel (Figura 4.7), e com o material extra retirado de cada anel se procedeu na determinação da umidade gravimétrica para determinar a umidade natural ou *in situ* do solo.



Figura 4.7 Moldagem dos corpos de prova para ensaio do papel filtro

Depois de moldados os corpos de prova, procedeu-se à saturação dos corpos de prova até a saturação máxima, seguindo procedimento descrito por Campos (2015). Isto consistiu em colocar os corpos de prova moldados sobre placas porosas parcialmente submersas em água destilada dentro de uma bandeja (Figura 4.8), durante um período de mínimo 24 horas, para garantir a maior saturação possível por capilaridade. A saturação com esse procedimento objetiva evitar a possível desagregação dos solos em contato direto com a água.



Figura 4.8 Saturação dos corpos de prova por capilaridade.

Posteriormente, cada anel com a amostra já saturada foi pesado, registrando-se sua massa saturada. Após esse estágio, os anéis foram colocados em outra bandeja para começar o processo de dessaturação. Nesse procedimento, foi determinada a umidade máxima, definindo

os valores de umidade para poder representar corretamente o comportamento do solo desde essa umidade máxima até os valores mais baixos. Mediante as relações volumétricas, foi calculada a massa desejada para cada valor de umidade escolhido.

Na sequência, cada par de amostras foi retirada da bandeja quando o solo atingiu a massa especificada, ou seja, no valor de umidade definido. Ao atingir a massa desejada, os corpos de prova foram colocados na montagem do ensaio, como especifica a norma D5298-16 ASTM (2016). Nesta norma, especifica-se que devem ser colocados 3 discos de papel filtro Whatman nº 42 no meio dos dois anéis (Figura 2.5), O disco de papel filtro no meio do conjunto deve ser menor para não entrar em contato com o solo e evitar variações no valor da sucção a ser obtido.

#### • Montagem do ensaio

Os discos de papel filtro Whatman nº 42 foram previamente cortados de tamanho menor que as amostras de solo, a modo de garantir o contato completo papel filtro-solo. Estes discos foram colocados na estufa durante 16 horas e depois em dessecador, seguindo a D5298-16 ASTM (2016). Alguns autores recomendam o uso do papel filtro diretamente do pacote para se evitar ganho de umidade (Marinho e Oliveira, 2006), no entanto se optou por seguir a recomendação da norma internacional.

Os anéis com os corpos de prova e o papel filtro foram selados com plástico filme e fita adesiva, para depois ser rotulado e colocado em um recipiente de isopor (Figura 4.9). O recipiente foi guardado em câmara úmida durante 15 dias para evitar no máximo variações na temperatura, assegurando o equilíbrio no valor da sucção entre o solo e o papel filtro.



Figura 4.9 Amostras após montagem e colocação do papel filtro.

- **Abertura dos corpos de prova e determinação da sucção.**

Após o tempo de estabilização de 15 dias do conjunto corpos de prova-papel filtro, procedeu-se a abertura destes, com a retirada da fita adesiva e o plástico filme. Imediatamente abertos, os discos de papel filtro central foram pesados na balança eletrônica com precisão de 0,0001g, assim como os corpos de prova. Segundo a recomendação, este processo, deve durar de 3-5 segundos para minimizar as possíveis perdas de umidade do papel filtro (D5298-16 ASTM, 2016).

Antes dessa pesagem, é necessária a tara da cápsula metálica com tampa (massa  $T_c$ ), eliminando-se eventuais partículas ou gordura que possam ter alterado a massa. Em seguida, é pesada depois a cápsula com a tampa e o papel filtro recém extraído da montagem do ensaio (massa  $M_1$ ). Depois, este conjunto é colocado na estufa durante duas horas com a tampa entreaberta. Posteriormente, a tampa é fechada completamente e deixa-se na estufa por quinze minutos para estabilizar a temperatura interna da cápsula, e se mede novamente a cápsula (massa  $M_2$ ). Finaliza-se o processo com uma tara final da cápsula logo após a pesagem de  $M_2$  (massa  $T_h$ ). Calcula-se o teor de umidade do papel filtro pelas equações 4.1 a 4.3.

$$w_f = 100 * \frac{M_w}{M_f} \quad (4.1)$$

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c \quad (4.2)$$

$$M_f = M_2 - T_h \quad (4.3)$$

Sendo,  $w_f$ : teor de umidade do papel filtro;

$M_w$ : massa de água no papel filtro;

$M_f$ : massa do papel filtro seco.

Assim, com esses resultados de teor de umidade obtidos no ensaio do papel filtro e as equações da Tabela 2.2, foram calculados os valores de sucção correspondentes para cada ponto de umidade sob análise. Com o objetivo de avaliar a curva de correlação entre os valores de sucção

e resistividade elétrica em laboratório, imediatamente após abertos os corpos de prova, foi determinada a resistividade elétrica, tentando-se minimizar o máximo possível a perda de umidade das amostras de solos, processo descrito na seguinte seção.

Finalmente, após a conclusão dos ensaios do papel filtro e de determinação da resistividade elétrica, foi determinado o teor de umidade das amostras de solo dos anéis de PVC. Assim, já obtidos os valores de sucção e o teor de umidade no solo, para cada ponto compôs-se a curva de retenção de cada horizonte.

#### 4.2.4. Ensaio de resistividade elétrica

A determinação da resistividade elétrica em laboratório, como mencionado anteriormente, requeria as mesmas amostras utilizadas no ensaio do papel filtro. Razão pela qual foram utilizados os mesmos anéis de PVC, imediatamente após a abertura dos corpos de prova (Figura 4.10). Obteve-se, assim, os valores de resistividade para cada ponto de umidade correspondente a um valor de sucção no solo.

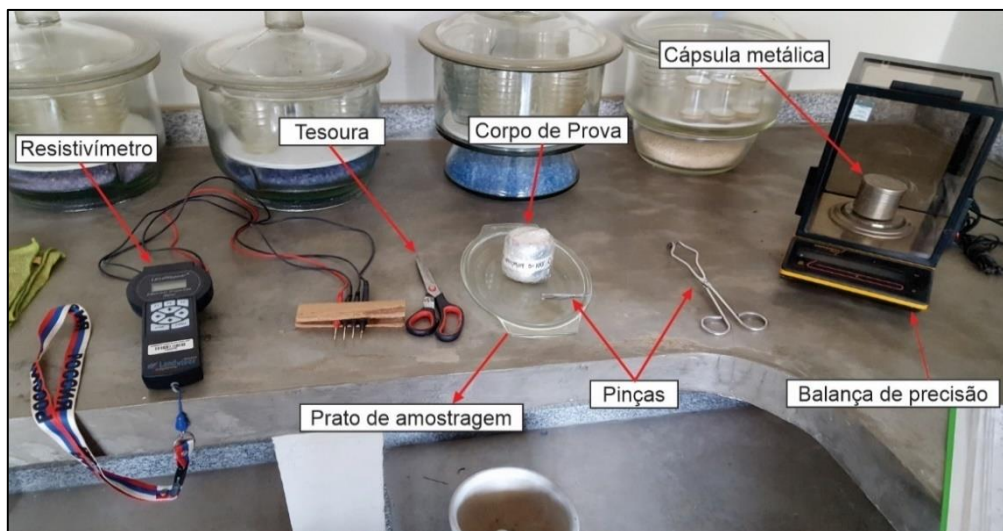


Figura 4.10 Instrumentos necessários na abertura dos corpos de prova e montagem do ensaio de resistividade em laboratório.

Empregou-se um resistivímetro modelo *LandMapper ERM-4*, da *LandViser*, pela obtenção dos valores de resistividade nas amostras. Utilizou-se uma configuração de 4 eletrodos igualmente espaçados (arranjo Wenner), sendo os eletrodos externos de corrente e os internos de medida do potencial (Figura 4.11).



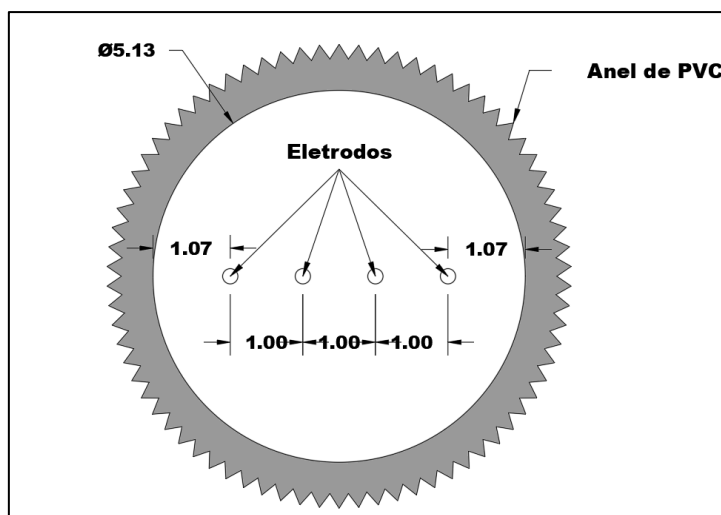


Figura 4.11 Esquema do arranjo utilizado no ensaio de resistividade.

Esse procedimento foi realizado em todos os anéis de solo utilizados no ensaio do papel filtro, fornecendo os valores de resistividade para cada ponto da curva de retenção. O valor da resistividade foi definido como a média de 3 valores obtidos (Anexo 1), com variação maior no horizonte B (46,63%) que no horizonte C (7,45%). Na Figura 4.12 é mostrado o ensaio de resistividade em andamento nas amostras de solo. Esses valores de resistividade foram utilizados na construção da curva de comportamento da resistividade dos horizontes do solo com relação aos valores do teor de umidade obtidos no processo do ensaio.

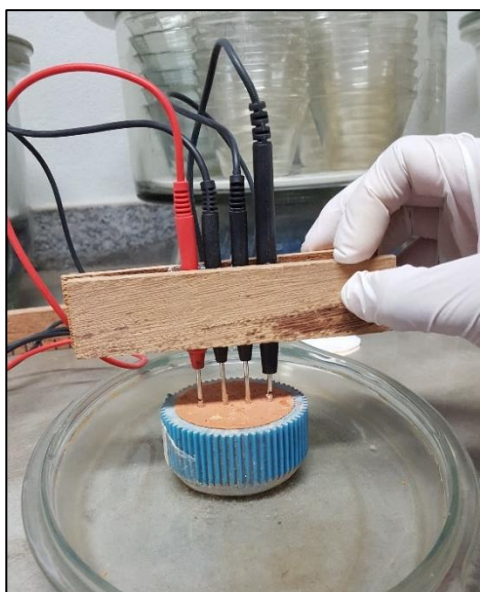


Figura 4.12 Realização do ensaio de resistividade nas amostras. Mostrando o arranjo de eletrodos utilizado na obtenção das leituras.

O ensaio foi executado com uma profundidade de inserção dos eletrodos de 0,3 cm e com espaçamento intereletrodo de 1cm, com uma relação comprimento/separação de 0,3. Relações superiores a 0,2 podem resultar em perda de acurácia no valor da resistividade obtida (Rücker e Günther, 2011). Estes mesmos autores mencionam também que ao utilizar um arranjo de 4 eletrodos os valores da impedância do contato nas proximidades, contribuem só em uma pequena parcela no efeito dos eletrodos. Outra questão relevante nestes ensaios é a interferência do efeito borda (Goudswaard, 1957), que ocorre quando as medidas de resistividade não se restringem a 30% mais interno do volume total, condição que não foi seguida no atual experimento. Cabe ressaltar que estas duas condições não satisfeitas ocorreram devido à dificuldade natural de coletar amostras de solo não deformado em anéis de maior dimensão.

Após finalizar essa etapa, com o intuito de avaliar a correlação existente entre os valores de sucção e resistividade, foi feito um tratamento estatístico dos dados no software Minitab 18.1, com o teste de Anderson-Darling; teste de ajuste de dados para uma distribuição hipotética (normal), baseado num gráfico de probabilidade que se aproxima a uma reta quanto mais os dados se ajustam para essa distribuição. Fornece-se um *p-valor* como complemento desse gráfico. Nesse teste a hipótese nula considera que os dados seguem essa distribuição específica, e esta hipótese é aceita quando o *p-valor* é maior que o nível de significância adotado ( $\alpha = 0,05$ ).

Confirmada a distribuição dos dados, procedeu-se ao emprego do coeficiente de correlação de Spearman ( $\rho$ ), um teste não paramétrico equivalente ao coeficiente de Pearson. Esse teste mede a força de associação entre duas variáveis, usando somente os valores, devendo ficar entre  $-1 \leq \rho \leq 1$ , possuindo uma correlação direta se o *p-valor* é positivo e correlação inversa se negativo. Essa correlação é maior quanto maior seja o valor absoluto desse dado, e menor quanto mais perto de zero.

### 4.3. Etapa 3: Resistividade elétrica *in situ*.

Nesta etapa de campo foram levantados os dados de resistividade elétrica à montante do talude da voçoroca da estação Holanda, com o intuito de determinar a variação da resistividade *in situ*. Optou-se por sondagens elétricas verticais (SEV) para determinar a variação das camadas geoeletricas em profundidade, pois não havia muito espaço para levantamentos por caminamento com arranjo dipolo-dipolo. As sondagens elétricas verticais (SEV) foram obtidas com o arranjo Schlumberger por apresentar algumas vantagens sobre o arranjo empregado em laboratório, o arranjo Wenner. O arranjo Schlumberger é mais prático em campo, ao requerer menor deslocamento dos eletrodos de potencial e com leituras menos sujeitas às interferências. Também são menos susceptíveis a erros interpretativos em terrenos não homogêneos (Braga, 2006). Na Figura 4.13 se mostra uma das duas linhas de SEV, que foram paralelas entre si e também paralelas às curvas de nível e à crista do talude da voçoroca (Figura 4.14). As SEVs objetivaram um melhor entendimento do comportamento do perfil de umidade e a determinação do nível de água subterrânea e, por conseguinte, do gradiente hidráulico.



Figura 4.13 Trenas por onde foi levantada a SEV 2.



Figura 4.14 Localização das sondagens elétrica verticais (SEVs) na área de estudo. A voçoroca estudada foi a da direita, que apresenta o setor noroeste com os taludes mais instáveis. Os taludes na parte norte e nordeste da voçoroca se encontram mais estáveis, o que é evidenciado pela presença da vegetação. (Fonte: Google Earth).

Cabe mencionar que foi realizada a operação de embreagem em cada SEV visando melhorar as leituras de potenciais (Braga, 2006). Esta operação consiste em elevar o valor de  $\Delta V$ , aumentando a separação entre os eletrodos de potencial, mantendo fixos os eletrodos de corrente. Realiza-se duas leituras da diferença de potencial, a primeira com um espaçamento MN inicial e, a segunda com um espaçamento MN maior. Os dados obtidos em campo foram invertidos no software IPI2Win V3.0.1, para a identificação das camadas geoeletricas e a criação do perfil resistivo.

#### 4.4. Etapa 4: Simulações Numericas

Nesta etapa objetivou-se representar da forma mais realista possível o comportamento sazonal do fluxo e da estabilidade do talude da voçoroca. Para isso, foi necessário elaborar a simulação numérica em 3 estágios: a representação da geometria precisa do talude, as análises de fluxo tanto em regime permanente quanto em regime transiente e, finalmente, as análises de estabilidade acopladas às análises de fluxo. Para essas análises foram utilizados parâmetros e características dos horizontes do solo encontrados na pesquisa, como também de pesquisas anteriores (Bacellar, 2000; Silva, 2000; Futai, 2002), uma vez que os horizontes do solo tendem a apresentar certa variabilidade composicional e estrutural.

Como primeiro passo, foi necessário o levantamento detalhado da topografia da voçoroca. Essa etapa foi desenvolvida com um drone “*Phantom 3 advanced*”, para a criação de um mapa topográfico da voçoroca e de um modelo digital de elevação com o software “*Agisoft Photoscan Professional v 1.4.2.6205*”. Selecionou-se o talude NW da voçoroca para análise (Figura 4.15), por ser a zona mais susceptível a escorregamentos rotacionais, como demonstram dados históricos (Bacellar, 2000).



Figura 4.15 Localização da seção sob análise no talude NW da voçoroca e locais de amostragem realizados nesta pesquisa.

A seção geológica analisada foi construída de acordo com o mapa de espessura do horizonte B apresentado por Bacellar (2000) e dos dados interpretados das SEVs, como profundidade do nível freático e da rocha sã. Desta forma, obteve-se uma seção geológica-geotécnica mais realista.

#### • Simulação de fluxo

Neste estágio foram realizadas simulações numéricas de análises de fluxo em duas etapas. Como primeira etapa, uma análise de fluxo em regime permanente, condição necessária pela execução da segunda etapa, que consistiu em uma análise de fluxo em regime transiente no ano hidrológico selecionado (2018/2019). Essas análises foram desenvolvidas por elementos finitos com apoio do sistema computacional Geostudio (2020a), modulo *SEEP/W*. Na primeira etapa foram definidas as propriedades hidráulicas dos solos dos horizontes, necessárias para o estudo do fluxo não saturado (curva de retenção e função de condutividade hidráulica).

Foram estimadas as curvas de retenção do solo de ambos horizontes, tanto do modelo Durner (1994) utilizando o software SWRC (Seki, 2007), como também do modelo Gitirana e Fredlund (2004) utilizando planilha do Excel fornecida pelo Prof. Gilson Gitirana Jr. Ambos modelos mostraram um excelente ajuste com os dados de laboratório. Porém, ao final foram utilizadas as curvas de retenção do modelo Gitirana e Fredlund (2004) devido ao melhor ajuste nos horizontes do solo.

As funções da condutividade hidráulica dos horizontes do solo, foram estimadas segundo o modelo Fredlund et al. (1994) usando os dados do modelo Gitirana e Fredlund (2004) no próprio modulo *SEEP/W*.

Logo depois, foi construído o modelo conceitual da seção transversal que apresentou uma malha de 3915 nós e 3750 elementos (Figura 4.16). Nesta seção transversal foram definidas as condições de fronteira de fluxo pela análise em regime permanente, representando as condições *in situ*. Essas condições foram:

- Condições de fronteira tipo 1 (carga hidráulica determinada), representa a carga total de água (nível d'água), conhecida tanto a montante da voçoroca (dados da SEV1 na estação 120m), quanto na lateral de jusante (carga constante no pé da voçoroca).
- A face da voçoroca foi modelada como condição de fronteira tipo 2 (vazão determinada) do tipo *seepage* devido à presença de exfiltração de água na face da voçoroca.
- O gnaisse que forma o embasamento local pode ser considerado impermeável em comparação com o saprolito subjacente, portanto, este contato foi considerado como fronteira do tipo 2 (vazão determinada = 0).

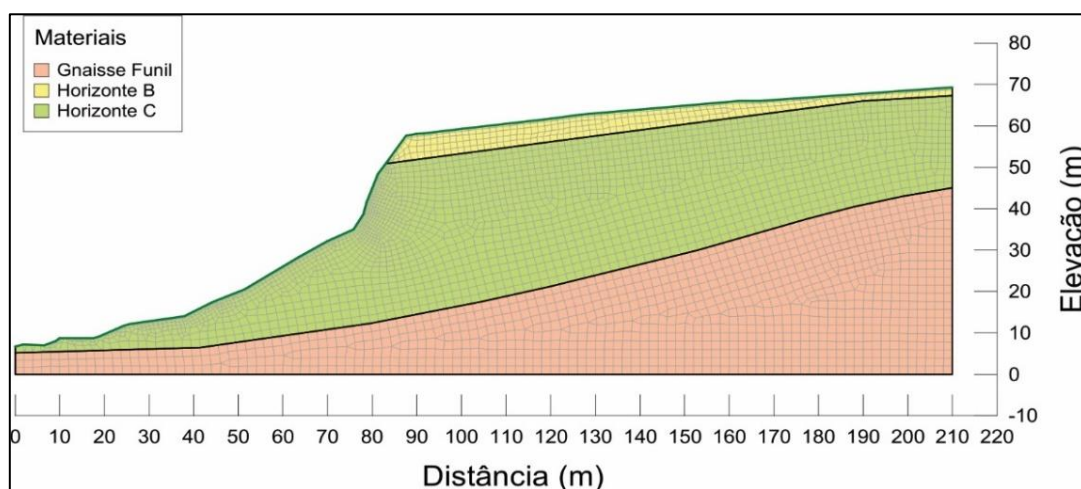


Figura 4.16 Seção geológico-geotécnica em análise com malha de elementos finitos, exibindo o horizonte B (amarelo), horizonte C (verde), gnaisse funil (laranja). Para localização, ver Figura 4.15.

Já se tentou instalar piezômetros a montante desta voçoroca, mas a profundidade encontrada do nível d'água (~20 m) e a alta erodibilidade do horizonte C impossibilitou a completação da perfuração (Bacellar, Inf. Verbal). Portanto, a validação das simulações numéricas de fluxo em regime permanente e transiente foi feita com a posição do nível d'água encontrado pelo levantamento de eletrorresistividade executados no local (estação 120 m do modelo) e por comparação com dados piezométricos sazonais levantados por Drumond (2006) em voçoroca homóloga.

Após essa primeira etapa, continuou-se com a simulação de uma análise em regime transiente no ano hidrológico sob estudo, entre 1/10/18 e 30/9/2019. Como as condições climáticas variam de ano para ano e as reais condições iniciais da posição do NA são desconhecidas, optou-se por executar a simulação por dois anos consecutivos sob as mesmas condições

climáticas (ano 1, entre os dias 0 e 364 e ano 2, com dados climáticos reais, entre os dias 364 e 728). Ou seja, replicaram-se as condições climáticas do ano hidrológico com dados climáticos reais (dias 364 a 728), para um hipotético ano anterior sob mesmas condições climáticas. Desta forma, conseguiu-se convergir mais rapidamente para uma resposta mais próxima a encontrada por Drumond (2006).

Nesta segunda etapa (Figura 4.17), na lateral de montante foi assumida uma condição de vazão zero (tipo 2) por se tratar de divisor topográfico (fronteira hidráulica impermeável). A condição de carga constante na lateral de jusante foi conservada da análise em regime permanente (círculos azuis). Na superfície do terreno foi considerada uma condição de contorno para simulação dos processos de interação solo-atmosfera, definida como interação terra-clima no modulo *SEEP/W* (setas roxas).

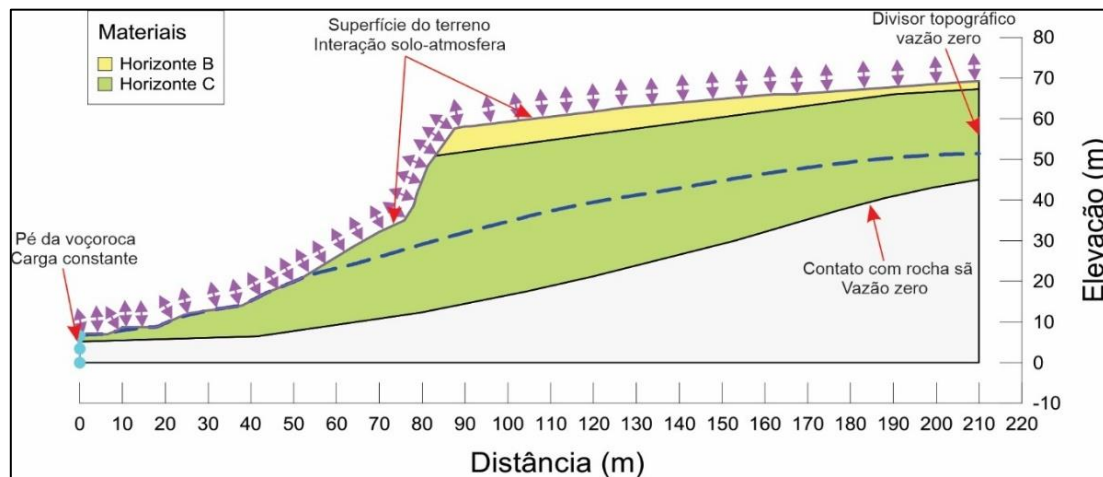


Figura 4.17 Condições de contorno consideradas na análise transiente, como: vazão nula no divisor topográfico e no contato com o maciço rochoso, carga constante no pé da voçoroca e interação solo-atmosfera na superfície do terreno.

A evapotranspiração potencial (ETP) durante o ano hidrológico foi estimada utilizando a planilha de Rolim et al. (1998), aplicando o método de Thornthwaite (1948). Com esses valores, o modulo *SEEP/W* possibilita estimar o valor de evapotranspiração real (EVR) segundo a relação proposta por Wilson et al. (1997). Os valores de EVR foram estimados sem considerar o efeito provocado pela vegetação na área de estudo.

Os valores de fotoperíodo (horas de insolação), temperatura média, e umidade relativa média foram interpolados com a ferramenta IDW do ArcGis das estações meteorológicas Belo Horizonte (Lat. -19.934382, Long. -43.952292); Caratinga (Lat. -19.735765, -Long. 42.137222); Caparaó (Lat. -20.526119, Long. -41.90913); Juiz de Fora (Lat. -21.76999, Long.



-43.364328) e Itaperuna (Lat. -21.20388888, Long. -41.90555555) pertencentes ao INMET. Os dados de precipitação foram tomados de pluviômetro no distrito de Santo Antônio do Leite do CEMADEN. Esses valores encontram-se no anexo 2.

• **Análise de estabilidade a escorregamentos rotacionais no talude NW da voçoroca**

A análise de estabilidade foi desenvolvida com o intuito de avaliar o comportamento sazonal do talude NW da voçoroca, que tem se mostrado muito instável nos últimos anos. Assim, essa análise foi acoplada às condições de fluxo ao longo do período de estudo na estação chuvosa e seca para analisar a influência da sazonalidade climática na estabilidade do talude mais crítico.

As análises de estabilidade acopladas às análises de fluxo transiente foram desenvolvidas com apoio do sistema computacional Geostudio (2020b), modulo *SLOPE/W*. Para isso, foram utilizados os dados de resistência ao cisalhamento reportados por Futai (2002) (Tabela 3.3) e resumidos na Tabela 4.1, executados na voçoroca sob estudo.

Tabela 4.1 Parâmetros de resistência ao cisalhamento (Adaptado de Futai, 2002).

Material	c' (kPa)	$\varphi'$	$\varphi^b$
Horizonte B	8	27,7	14
Horizonte C	38	26,4	11

Foi considerada a linearidade de  $\varphi^b$  na envoltória de ruptura estendida de Mohr-Coulomb, executando-se análises de estabilidade em todos os estágios simulados na análise de fluxo (cada 2 hr). Foi feita uma geração de superfície de ruptura do tipo entrada e saída ao longo da face da voçoroca (linhas vermelhas) para a simulação de estabilidade (Figura 4.18), mostrando-se a origem dessas superfícies mais favorável a escorregamentos quando localizada no terço médio do talude com declividade menor. As verificações de estabilidade foram realizadas segundo o método Morgenstern e Price (1965), assim como também, foi executada a otimização da superfície de ruptura tentando-se obter o menor fator de segurança para cada situação.

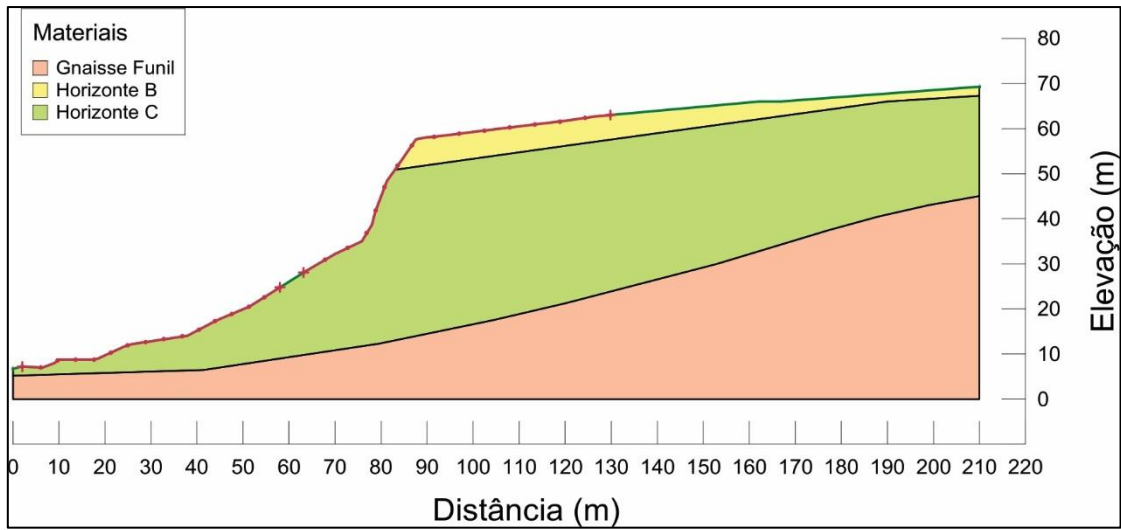


Figura 4.18 Condições de estabilidade global adotadas, com a localização dos pontos de geração das superfícies de ruptura.

## Capítulo 5

### 5. RESULTADOS E ANÁLISES

#### 5.1. Resultados dos ensaios de caracterização

##### 5.1.1. Limites de Atterberg

Os resultados desses ensaios (Tabela 5.1) mostram que o horizonte B se encontra na mesma faixa de valores prévios (Figura 3.8) reportados por Futai (2002). Os solos do horizonte C, apresentaram textura muito siltosa e um comportamento não plástico, diferentemente dos resultados de estudos anteriores (Bacellar, 2000), estes às vezes apresentam certa plasticidade.

Tabela 5.1 Resultados dos limites de Atterberg para os solos coletados

	LL	LP	IP
Horizonte B	51	31	20
Horizonte C	44	NP	NP

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez do horizonte B apresentaram dispersão nos resultados (Figura 5.1). Pode-se notar que a posição dos resultados se encontra na fronteira da linha A, correspondendo-se com os dados de Silva (2000).

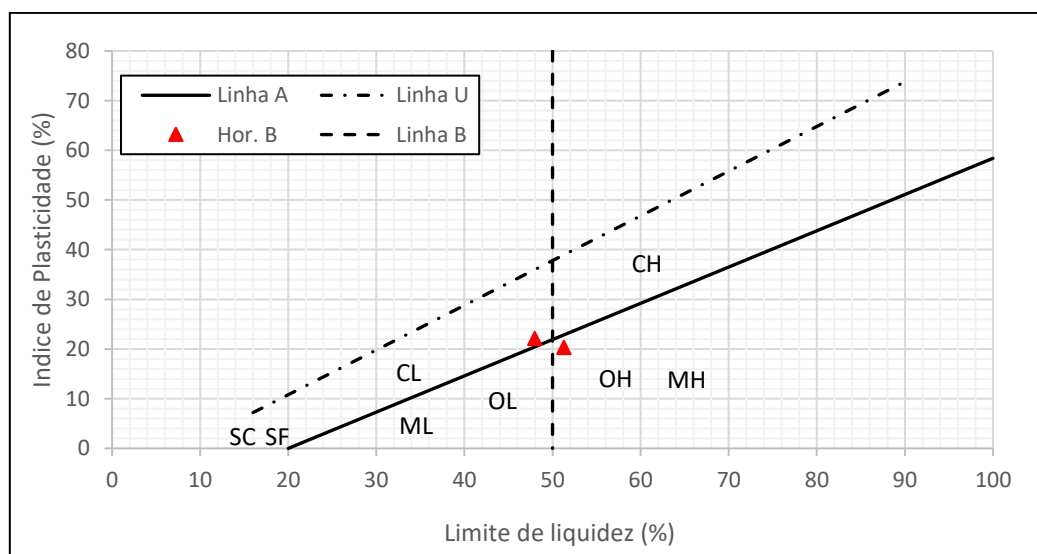


Figura 5.1 Gráfico de plasticidade com resultados do solo do horizonte B.

### 5.1.2. Análise granulométrica

Os resultados das distribuições granulométricas dos horizontes do solo em ensaios com uso e sem uso de agente defloculante são apresentadas na Tabela 5.2 e nas Figura 5.2 e Figura 5.3. Esses resultados evidenciam que sem defloculante os grãos de tamanho argila estão floculados, chegando a formar grumos da dimensão de silte e de areia fina, como já mostrado por Silva (2000).

Tabela 5.2 Distribuição granulométrica do solo

Prof. m	Com defloculante			Sem defloculante		
	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Horizonte B	60	11	29		33	67
Horizonte C	14	60	26		66	34

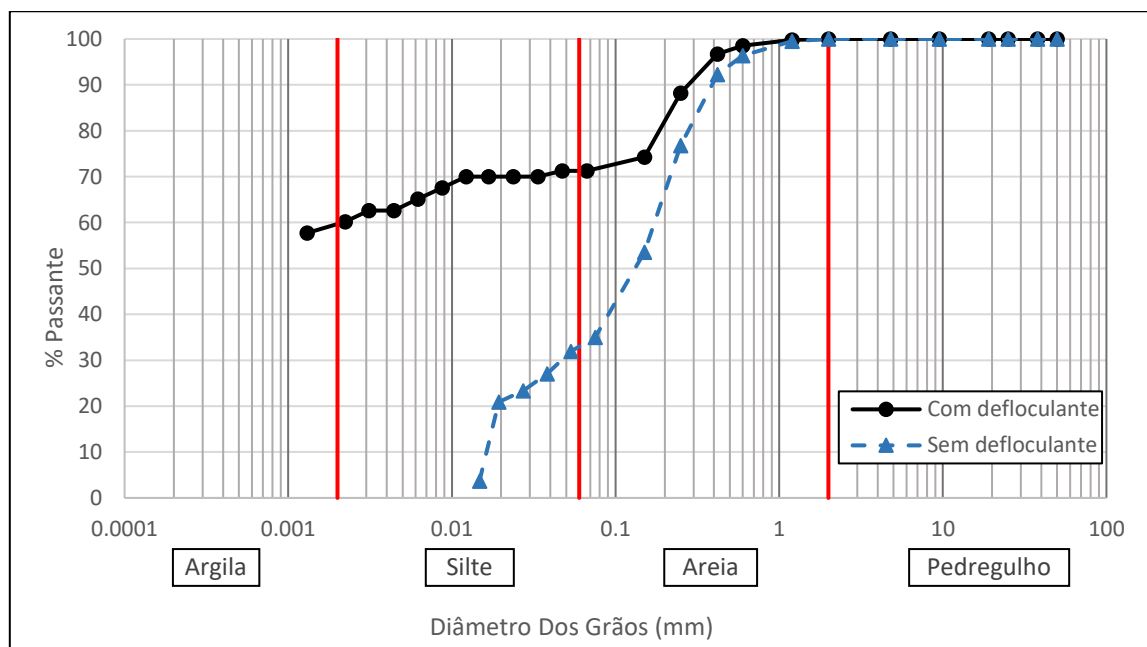


Figura 5.2 Curva granulométrica do solo do horizonte B com e sem uso de defloculante.

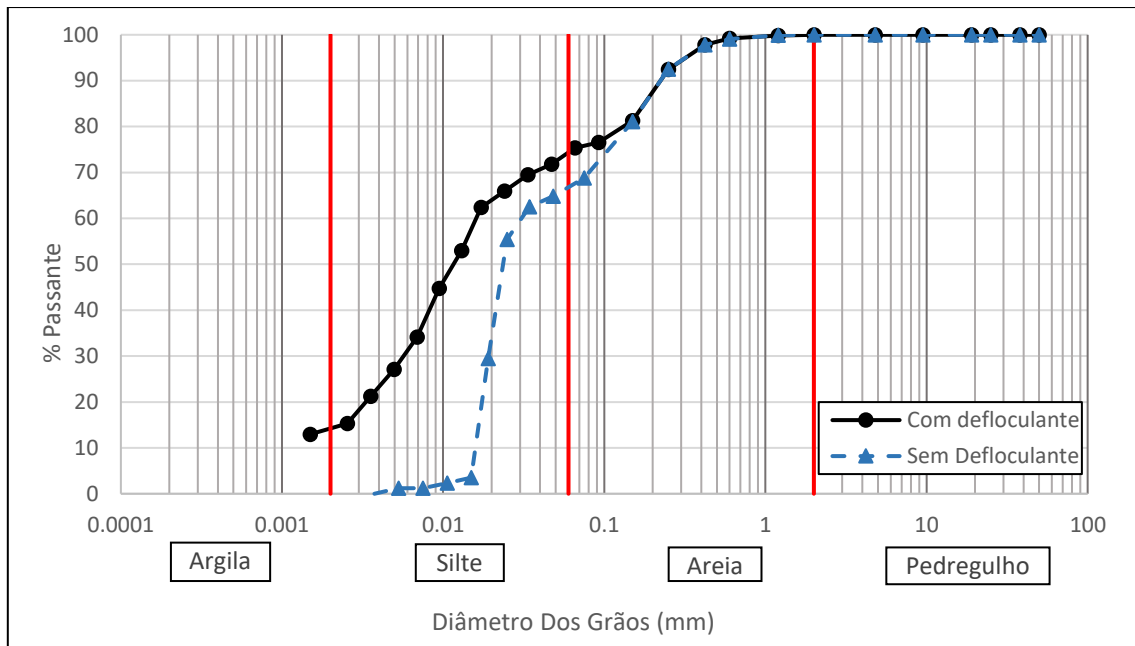


Figura 5.3 Curva granulométrica do solo do horizonte C com e sem uso de defloculante.

Nesses gráficos pode-se notar a diferença marcante entre os dois horizontes, sendo o horizonte B muito argiloso, com mais de 60% de material no tamanho argila. Segundo Lacerda (2010), esse é um padrão típico dos solos lateríticos, que se caracterizam por uma faixa ampla de argila, agregada com óxidos, formando grãos de maior tamanho, e com quantidade de argila aumentando de acordo com o grau de intemperismo. O solo do horizonte B apresenta textura argilo-arenosa, com resultados similares aos encontrados anteriormente (Bacellar, 2000; Silva, 2000; Futai, 2002).

O horizonte C (saprolito) apresenta um 14% de material de tamanho argila. Segundo Lacerda (2010), usualmente os solos saprolíticos apresentam valores de argila menores que 10%, e embora o valor encontrado tenha sido maior, está dentro do padrão dos solos saprolíticos, classificando-o como solo saprolítico silto-arenoso.

Portanto, verifica-se que o solo apresenta um comportamento típico de um perfil de solo tropical, com o teor de argila aumentando com os processos do intemperismo, tendo solos saprolíticos e solos lateríticos bem diferenciados em suas distribuições granulométricas.

### 5.1.3. Resumo dos índices físicos e Classificação do solo.

Um resumo dos índices físicos é apresentado na Tabela 5.3. Os resultados dos ensaios de determinação de massa específica dos grãos mostram valores condizentes com os encontrados anteriormente na área (Silva, 2000). Os resultados de massa específica também (Silva, 2000; Futai, 2002), com tendência de maiores valores no solo saprolítico por conta de seu menor grau de intemperismo. Os resultados do teor de umidade mostram uma umidade entre o LL e LP para o horizonte B e uma menor umidade para o horizonte C, coerentemente com os dados de Futai (2002).

No caso do índice de vazios são corroborados os resultados de Silva (2000) e Futai (2002), com índice de vazios maior no solo do horizonte B, e com tendência a diminuir com a profundidade (Tabela 3.1).

Os resultados mostram que a saturação aumenta com a porosidade do solo, assim como a massa específica aparente aumenta com a massa específica dos grãos, validando os resultados dos diversos ensaios e mostrando também a diferença marcante entre os dois horizontes do perfil do solo.

Segundo os resultados dos ensaios de caracterização, é possível classificar o solo do horizonte B de acordo à classificação unificada como CL ou MH, devido à proximidade dos resultados à linha A no gráfico de plasticidade (Figura 5.1), e classificação ML para o horizonte C.

Tabela 5.3 Resumo de resultados dos índices físicos dos solos.

Solo	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	G <sub>s</sub>	Índice Vazios	S <sub>r</sub> (%)	Porosidade (%)
Horizonte B	13,54	31,5	1,545	1,42	34,27	58,703
Horizonte C	15,67	17,24	1,578	0,891	30,53	47,13

### 5.1.4. Ensaio de permeabilidade do solo

O ensaio de permeabilidade foi realizado segundo o procedimento descrito na seção 4.2.2, e os resultados podem ser observados na Tabela 5.4. Cabe ressaltar que o corpo de prova do solo do horizonte B continha pequenas raízes, o que facilitaria o fluxo. O solo do horizonte B é mais condutivo do que o solo saprolítico do horizonte C em uma ordem de grandeza, assim como mostram trabalhos anteriores (Bacellar, 2000; Silva, 2000).

Tabela 5.4 Resultados do coeficiente de condutividade hidráulica dos solos.

Prof. (m)	k (cm/seg.)
Horizonte B	7,00E-04
Horizonte C	4,76E-05

Como esperado, o solo do horizonte B apresentou maior condutividade hidráulica, pois, a textura sem defloculante não é tão fina como com defloculante. A menor condutividade hidráulica no horizonte C, é explicável pelo baixo índice de vazios e pela não agregação das partículas, no entanto o horizonte C, pode variar com a foliação herdada da rocha matriz (gnaisse funil).

## 5.2. Determinação da curva de retenção

Com o objetivo de construir as curvas de retenção dos horizontes do solo encontrados ao longo do perfil do talude foi realizado o ensaio da determinação da sucção, para vários teores de umidade (seção 4.2.3).

### • Horizonte B

Na Figura 5.4 são mostrados os resultados de umidade e de sucção obtidos no ensaio do papel filtro para o horizonte B (curva de retenção). Com a distribuição dos pontos é possível verificar duas quedas de umidade com pouca variação no valor de sucção. Portanto, o solo exhibe dois pontos de entradas de ar bem definidos e a curva resultante uma distribuição bimodal.

Nessa figura também pode ser observada a aplicação de dois modelos propostos na literatura para se ajustar aos resultados dos ensaios. Esses modelos são Durner (1994) e Gitirana e Fredlund (2004), que mostraram um excelente ajuste ao comportamento bimodal apresentado pelo solo. Os parâmetros das curvas e o coeficiente  $R^2$  estão apresentados nas Tabela 5.5 e Tabela 5.6, respectivamente.

Ambos modelos apresentaram um excelente ajuste aos dados de laboratório, porém com uma pequena divergência somente no ponto de maior teor de umidade, apresentando valores maiores de umidade para o respectivo valor de sucção obtido no ensaio, fato que pode ter acontecido devido a presença de material do solo no papel filtro, ao alto conteúdo de umidade e à textura do material. Além disso, os corpos de prova atingiram um valor máximo em torno de 79% de saturação, devido provavelmente a bolhas de ar oclusas nos poros das amostras.

Tabela 5.5 Parâmetros do modelo Durner (1994) horizonte B.

$\theta_s$	$\theta_r$	$w_1$	$\alpha_1$	$n_1$	$\alpha_2$	$n_2$	$R^2$
0,5868	2,37E-03	0,58256	0,40136	2,0884	0,00011177	2,4164	0,978

Tabela 5.6 Parâmetros do Modelo Gitirana e Fredlund (2004) horizonte B.

$\theta_s$	$\psi_{b1}$	$\psi_{res1}$	$S_{res1}$	$\psi_{b2}$	$S_b$	$\psi_{res2}$	$S_{res2}$	$a$	$R^2$
0,5868	1,42	11,28	0,432	7601,8	0,405	17454,0	0,052	0,085	0,981



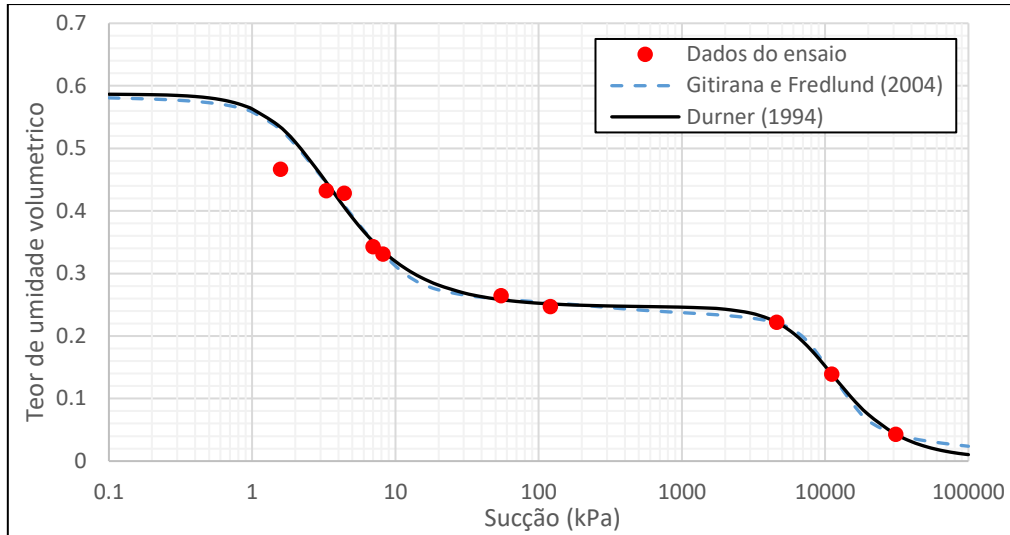


Figura 5.4 Curva de retenção para solo do horizonte B.

A curva de retenção depende principalmente da distribuição do tamanho dos poros no solo. Essa distribuição é um dos principais parâmetros que os modelos levam em consideração e podem explicar o comportamento bimodal identificado (Figura 5.4).

Na Figura 5.5 é mostrada a distribuição da frequência do volume de poros, calculado segundo a teoria da capilaridade dos dados da curva de retenção (Jong Van Lier, 2010). Futai (2002) realizou ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio e encontrou no solo do horizonte B da área macroporos entre 20  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro, e microporos entre 0,1  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ . Na Figura 5.5 observa-se uma concentração de macroporos entre 20  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$  e de microporos entre 0,006  $\mu\text{m}$  e 0,08  $\mu\text{m}$ , evidenciando microporos menores do que os encontrados por aquele autor.

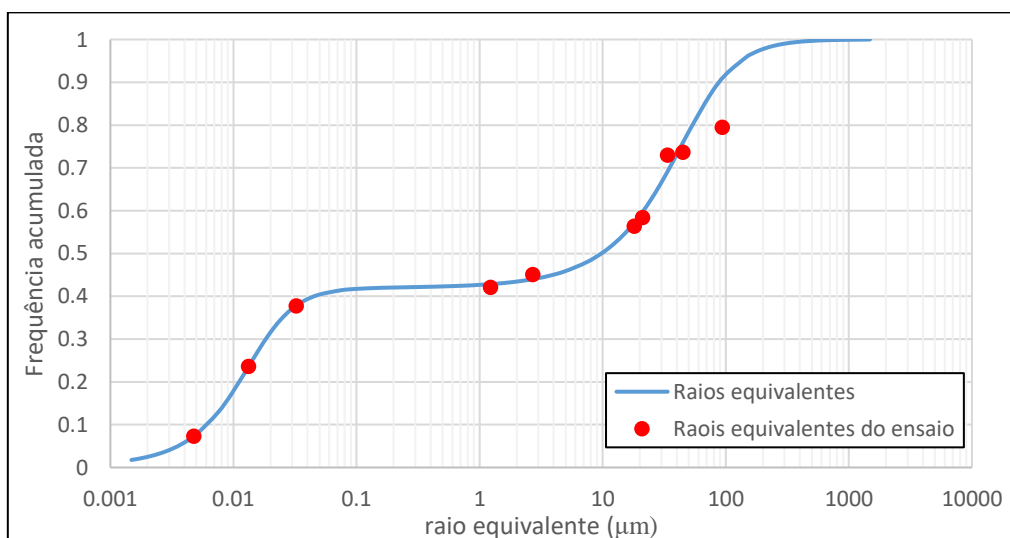


Figura 5.5 Curva de distribuição de frequência acumulada de poros do horizonte B.

Portanto, estes resultados de distribuição do tamanho dos poros do solo coincidem com valores de pesquisas anteriores (Futai, 2002). Evidencia-se o comportamento bimodal do tamanho dos poros apresentado na curva de retenção deste horizonte do solo. Com os dados da curva de retenção (Figura 5.4), foi possível estimar a função da condutividade hidráulica do solo (Figura 5.6).

A Figura 5.6 mostra o comportamento bimodal da condutividade hidráulica, concordando com o da curva de retenção, mostrando que a condutividade começa a decrescer com uma sucção na faixa de 1,42 kPa próximo ao ponto de entrada de ar. A condutividade se estabiliza na faixa de  $3 \times 10^{-13}$  m/s para valores de sucção maiores de 100 kPa, voltando a diminuir na faixa de 4000 kPa. Estes resultados evidenciam que o valor da condutividade se manteria constante com valores de umidade próximos de 25%, valor que divide a condutividade pelos macroporos dos microporos no solo.

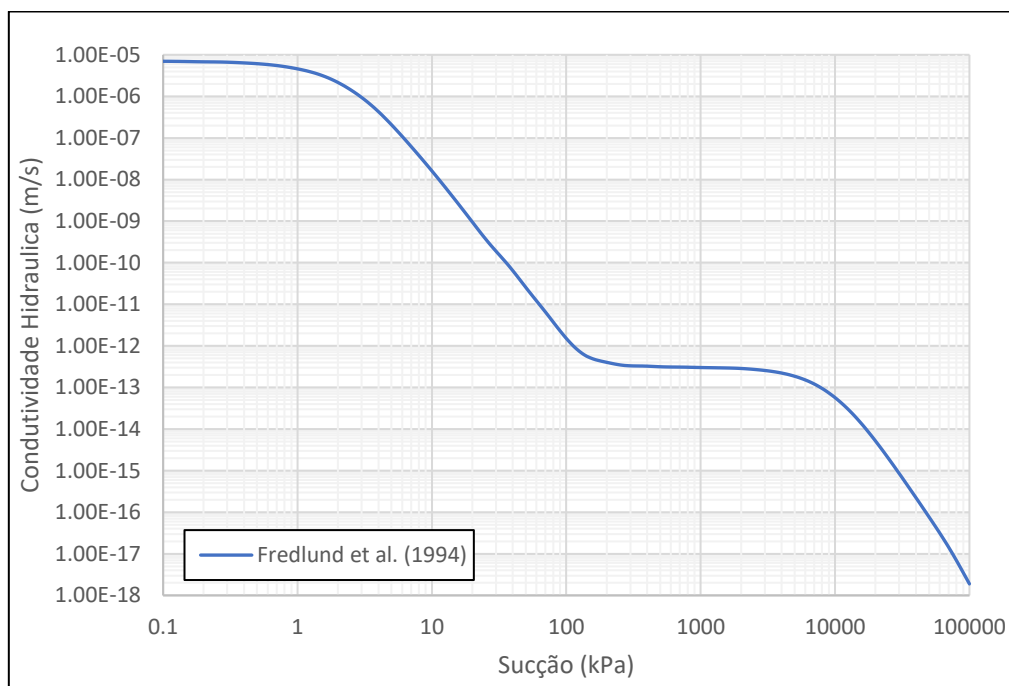


Figura 5.6 Curva de condutividade hidráulica não saturada para solo do horizonte B.

• **Horizonte C**

Na Figura 5.7 são mostrados os resultados de umidade e de sucção obtidos no ensaio do papel filtro para o horizonte C. Observa-se que os dados não apresentam um comportamento tão claro quanto os do horizonte B. É possível perceber que existem duas tendências de inclinação da curva, desde o valor de entrada de ar com quedas abruptas de umidade com uma pequena variação de sucção, apresentando um comportamento bimodal, pouco comum no horizonte C.

Esse comportamento é confirmado por trabalhos anteriores (Futai, 2002), mostrando-se a importância da microestrutura, com o empilhamento das placas de caulinita e formação de vazios maiores nos contatos das placas, assim como os menores localizados entre os grupos de caulinita empilhados, e também, a presença da fração argila cobrindo em alguns casos essas placas. Este horizonte pedológico (saprolito) herda a estruturação da rocha matriz (foliação e fraturas) (Bacellar, 2000), o que explica a grande variação textural identificada na área (Bacellar, 2000; Carvalho, 2016).

Nessa figura também são mostrados os dois modelos utilizados para se ajustar aos dados obtidos nos ensaios. Estes modelos mostraram um excelente ajuste ao comportamento bimodal do solo (Tabela 5.7 e Tabela 5.8). Cabe destacar que devido ao comportamento não bem definido, tentou-se ajustar os dados com os modelos clássicos de curvas unimodais (Brooks e Corey, 1964; Van Genuchten, 1980; Fredlund e Xing, 1994), porém sempre com um ajuste pior que os modelos bimodais.

Tabela 5.7 Parâmetros do modelo Durner (1994) do solo do horizonte C.

$\theta_s$	$\theta_r$	$w_1$	$\alpha_1$	$n_1$	$\alpha_2$	$n_2$	$R^2$
0,4712	1,58E-06	0,34293	0,04996	6,5905	0,0032545	1,5238	0,995

Tabela 5.8 Parâmetros do modelo Gitirana e Fredlund (2004) do solo do horizonte C.

$\theta_s$	$\psi_{b1}$	$\psi_{res1}$	$S_{res1}$	$\psi_{b2}$	$S_b$	$\psi_{res2}$	$S_{res2}$	$a$	$R^2$
0,4712	15,00	30,00	0,67	180,0	0,62	6000,0	0,080	0,030	0,993

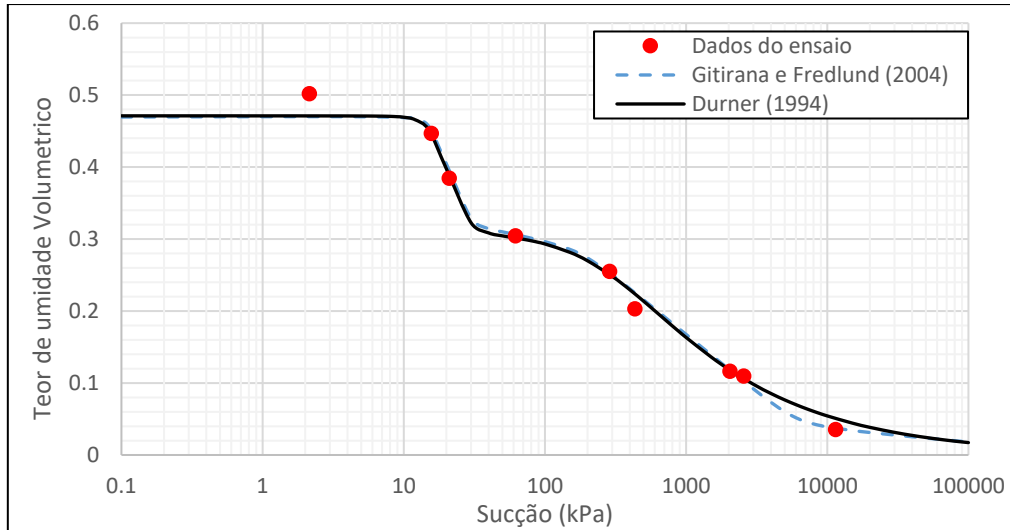


Figura 5.7 Curva de retenção de água do horizonte C.

Ambos modelos mostraram um excelente ajuste aos pontos obtidos, mostrando uma pequena variação no valor da sucção mais baixo, devido provavelmente à heterogeneidade natural desse solo, além da presença de material do solo no papel filtro. Esse horizonte de solo mostra um valor de entrada de ar em torno de 15 kPa, maior que no solo do horizonte B.

A distribuição do tamanho dos poros do horizonte C, calculada a partir da curva de retenção do solo, exibe também distribuição bimodal (Figura 5.8), com duas concentrações de raios equivalentes de poros, macroporos de 4  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$  e microporos entre 0,20  $\mu\text{m}$  e 2  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Futai e Almeida (2005) encontraram duas concentrações de macroporos, de 30  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$  e de 2  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro.

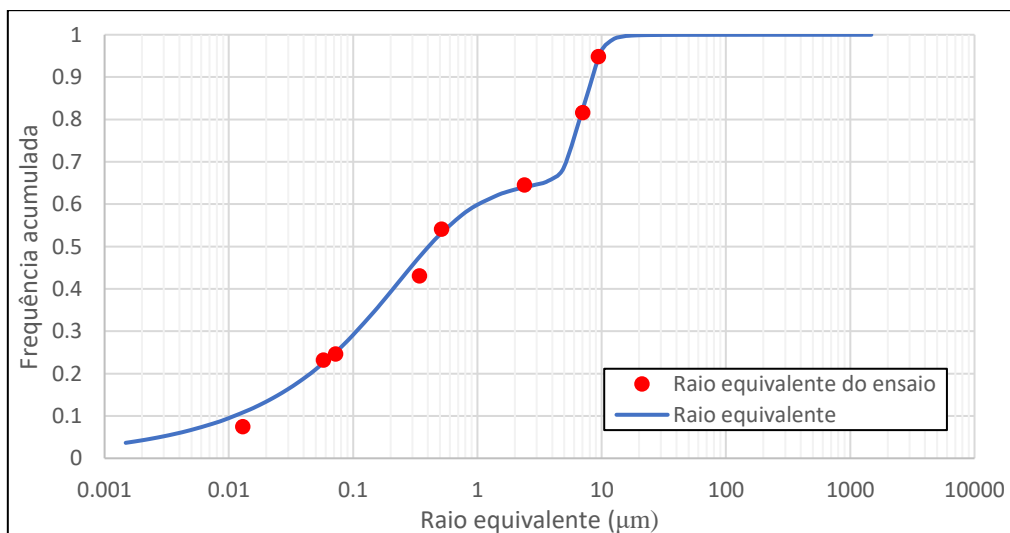


Figura 5.8 Curva de distribuição de frequência acumulada de poros do horizonte C.

Portanto, o solo apresenta comportamento bimodal. Assim, com os dados da curva de retenção é possível estimar a função da condutividade hidráulica para o horizonte C do solo.

Como esperado, a variação na condutividade hidráulica (Figura 5.9) mostra igualmente um comportamento bimodal. A condutividade começa a decrescer na faixa de sucção de 15 kPa na faixa do valor do primeiro ponto de entrada de ar, mostrando uma pequena estabilização na faixa de  $2 \times 10^{-9}$  m/s, que corresponde a valores de teor de umidade próximos de 32%, para depois continuar diminuindo com o aumento da sucção.

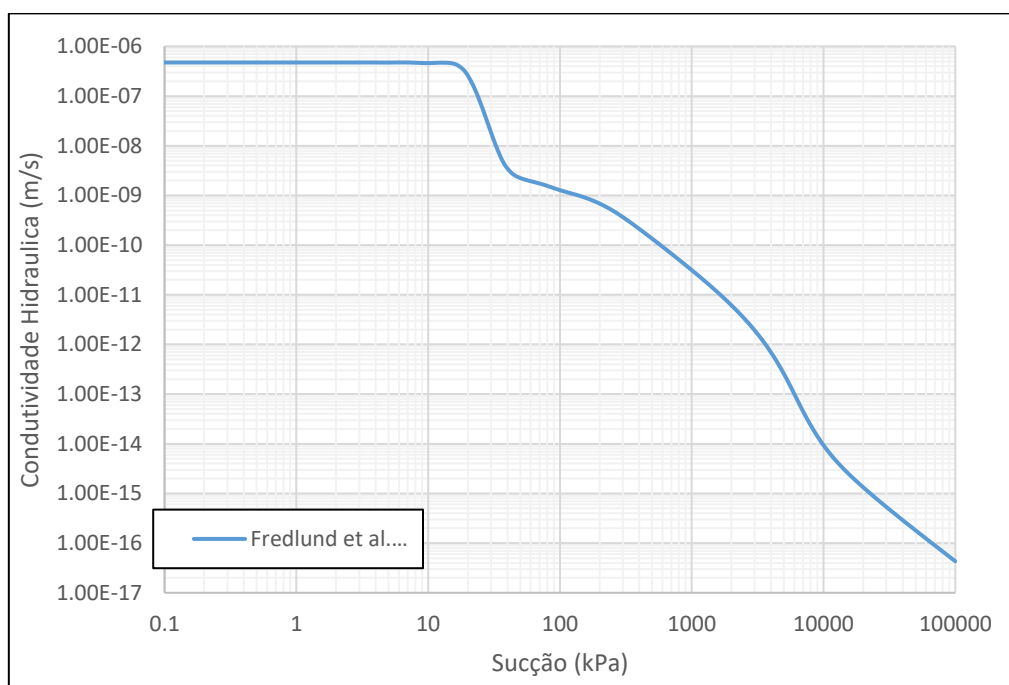


Figura 5.9 Curva de condutividade hidráulica não saturada do solo do horizonte C.

### 5.3. Resistividade elétrica

#### • Horizonte B

Na construção das curvas de comportamento da resistividade elétrica, as leituras foram relacionadas com o teor de umidade gravimétrico, mas para convencionar, aqui serão apresentadas com relação ao teor de umidade volumétrico.

Na Figura 5.10 são mostrados os valores médios das leituras de resistividade elétrica do horizonte B pelo teor de umidade. Essas leituras mostraram um ajuste razoável para uma tendência exponencial, com um valor de  $R^2$  de 0,59, no entanto, é apreciável o aumento no valor da resistividade com o decréscimo no valor do teor de umidade, como previsto (Pozdnyakov et al., 2006).

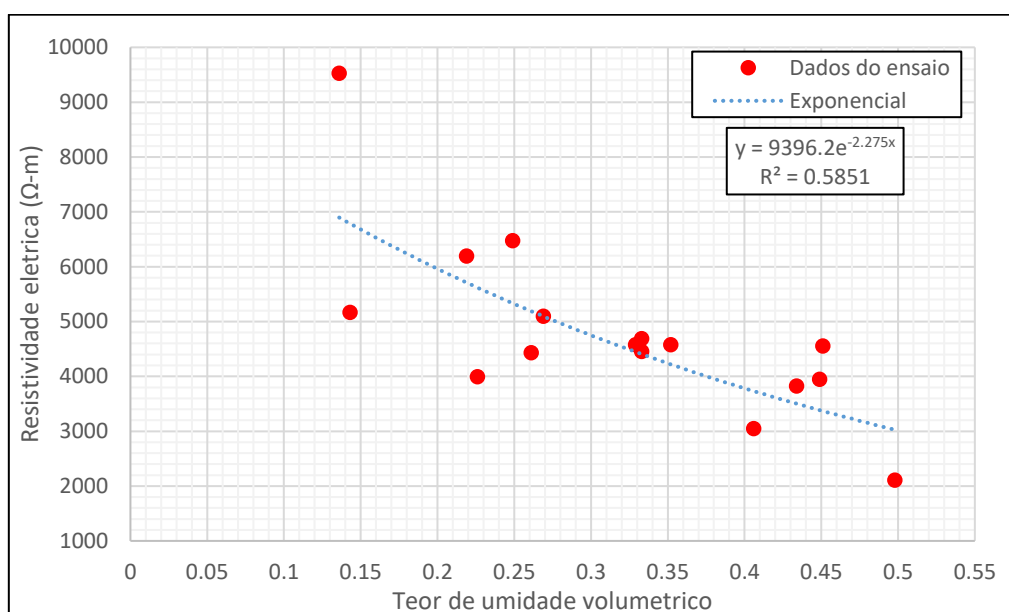


Figura 5.10 Variação da resistividade com o teor de umidade do horizonte B.

Um dos motivos da elevada dispersão dos dados foi o mal contato dos eletrodos com o solo e o aparecimento de trincas de tração com a secagem. Não foi possível obter valores de resistividades para os teores de umidade menores de 10%, porque os corpos de prova fissuravam ao cravar os eletrodos nas amostras mais secas.

### • Horizonte C

Na Figura 5.11 são mostrados os resultados das leituras de resistividade elétrica pelo teor de umidade do horizonte C, ficando claro que aqui o ajuste exponencial foi bem melhor que no horizonte B. Não foi possível obter valores de resistividade para umidade abaixo de 10% pelo mesmo motivo descrito para o horizonte B. A Figura 5.12 apresenta um comparativo entre os valores de resistividade do horizonte B e C.

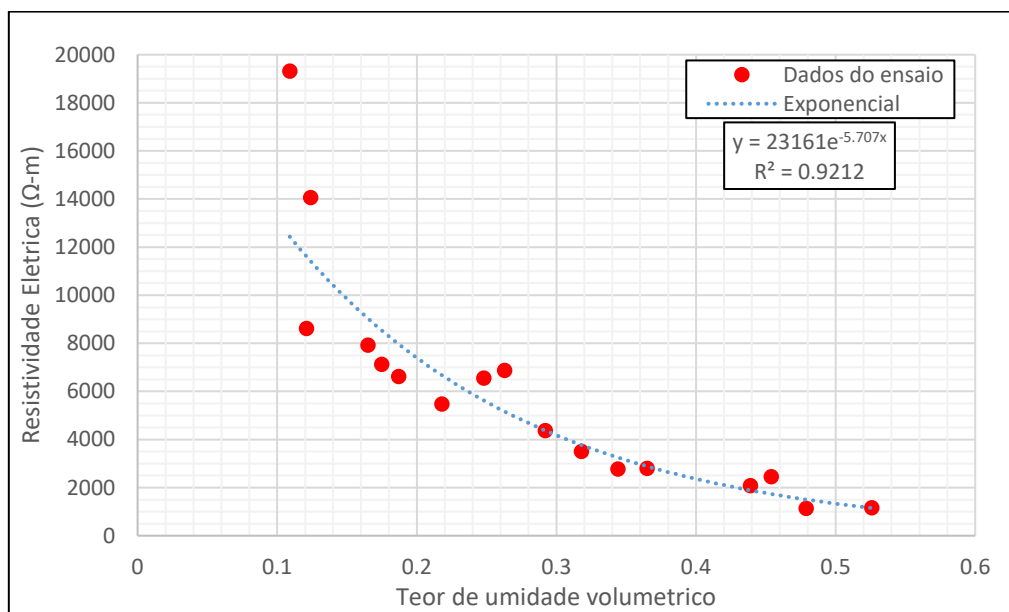


Figura 5.11 Variação da resistividade com o teor de umidade horizonte C.

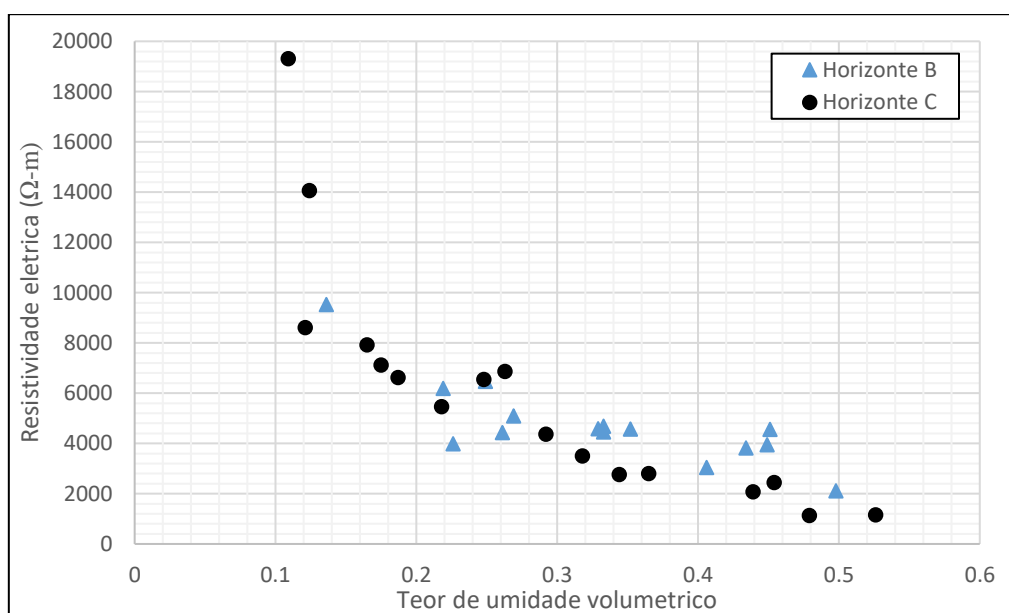


Figura 5.12 Comparativo da resistividade elétrica dos solos dos dois horizontes.

Em síntese, observam-se diferenças nos valores iniciais de resistividade para cada horizonte do solo (Figura 5.12). O horizonte B apresentou valores maiores de resistividade, devido principalmente ao maior índice de vazios, maior dimensão dos poros (macroporos) e menor massa específica. Este resultado foi diferente do encontrado por Carvalho (2016), que obteve resistividades maiores no horizonte C de solo da região. Nota-se também que para ambos horizontes de solo, os valores de resistividade começam a crescer de forma mais acentuada para teores de umidade menores de 0,20, valor de umidade alcançado quando a água se encontra nos microporos do solo.

Os dados de resistividade obtidos por essa autora apresentaram melhor ajuste, devido possivelmente à técnica para a obtenção dos dados. De fato, Carvalho (2016) utilizou para determinação da resistividade elétrica caixas acrílicas de maior dimensão, o que impediu o efeito borda descrito por Goudswaard (1957), que pode ter ocorrido no presente experimento. Segundo Goudswaard (1957), para se evitar o efeito borda, as medidas de resistividade deveriam se restringir à 30% mais interno do volume total, condição que não foi seguida no atual experimento. Cabe ressaltar também que a relação espaçamento e profundidade de inserção dos eletrodos não foi a ideal, como ressaltado por Rücker e Günther (2011).



#### 5.4. Relação Sucção - Resistividade elétrica

Para demonstrar esta relação é necessário lembrar que a sucção é uma propriedade do solo que depende do teor de água. Cabe lembrar também que a resistividade é uma grandeza que depende de vários fatores. Os resultados mostram um comportamento diferenciado para cada horizonte de solo.

A relação existente entre os valores de sucção e de resistividade elétrica para o solo do horizonte B mostrou um ajuste razoável (Figura 5.13), devido principalmente à variação das leituras de resistividade elétrica e a utilização do valor médio dessas leituras para cada ponto de sucção. No entanto, conseguiu-se encontrar uma tendência potencial, com valor de  $R^2$  de 0,67, existindo também a possibilidade de um ajuste exponencial aceitável. Na Figura 5.14 é possível observar que os valores da sucção ajustam-se para uma distribuição log-normal ( $p$ -valor = 0,087). Este resultado era esperado, devido à possibilidade de modelar os diâmetros dos poros por uma função de densidade de probabilidade log-normal, relacionada à distribuição granulométrica (Fredlund et al., 2000). Os valores de resistividade, contudo, apresentaram uma distribuição normal ( $p$ -valor = 0,415) (Figura 5.15).

Dessa forma, o coeficiente de correlação de Spearman, nos dados sem transformar da sucção e a resistividade elétrica, retornou um valor de 0,967, mostrando que a correlação tem uma alta significância para essa tendência potencial ( $p$ -valor < 0,05), com um comportamento não linear complexo, como mostrado por De Vita et al. (2012).

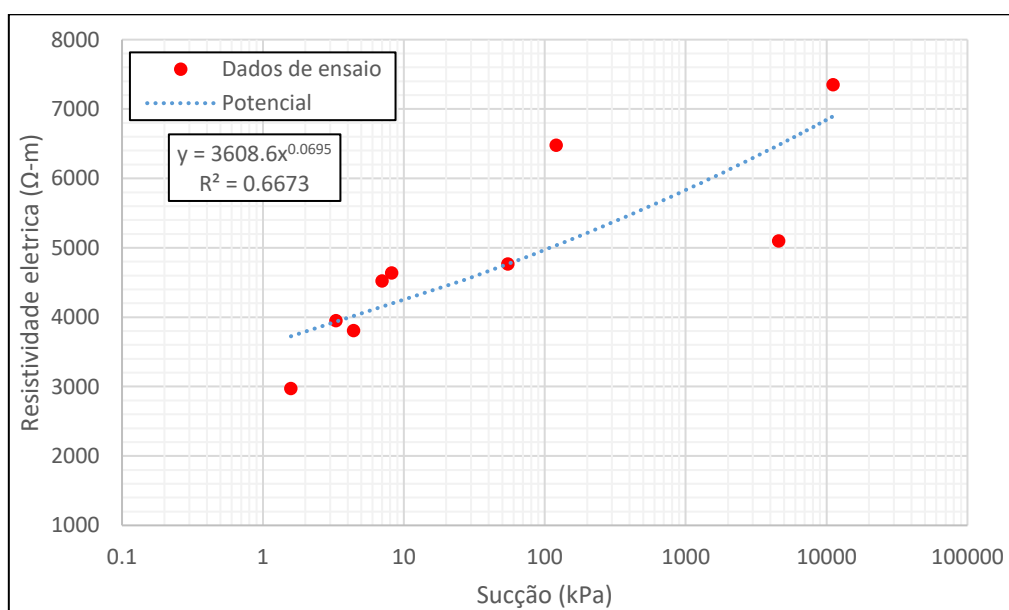


Figura 5.13 Relação da sucção com a resistividade no horizonte B.

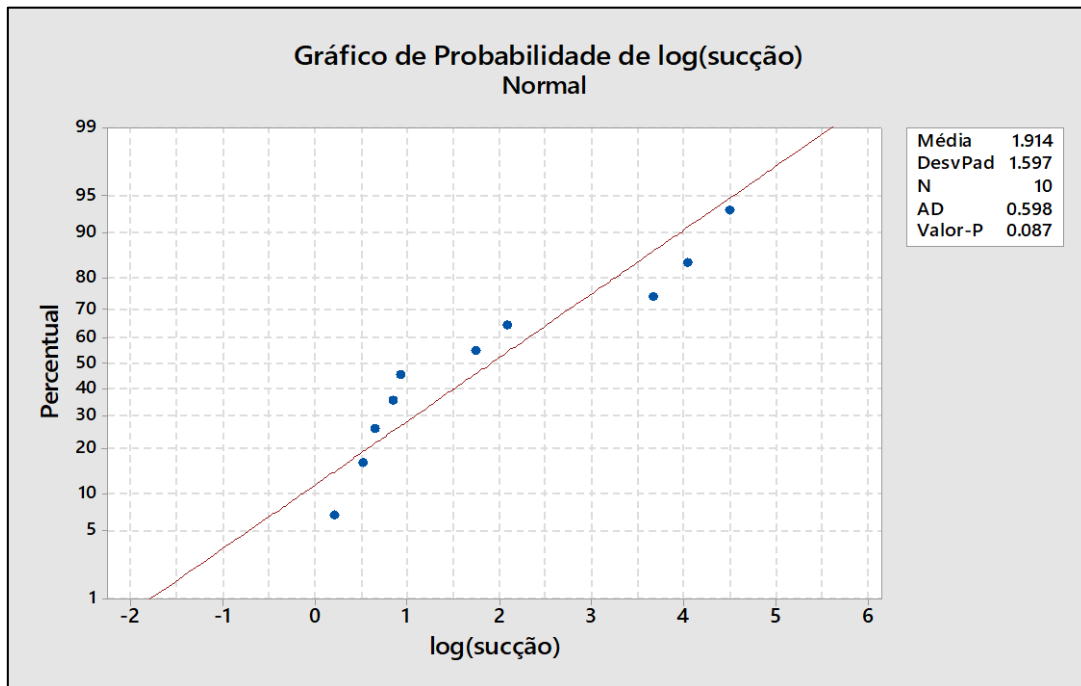


Figura 5.14 Teste de Anderson-Darling dos valores do logaritmo da sucção do solo do horizonte B.

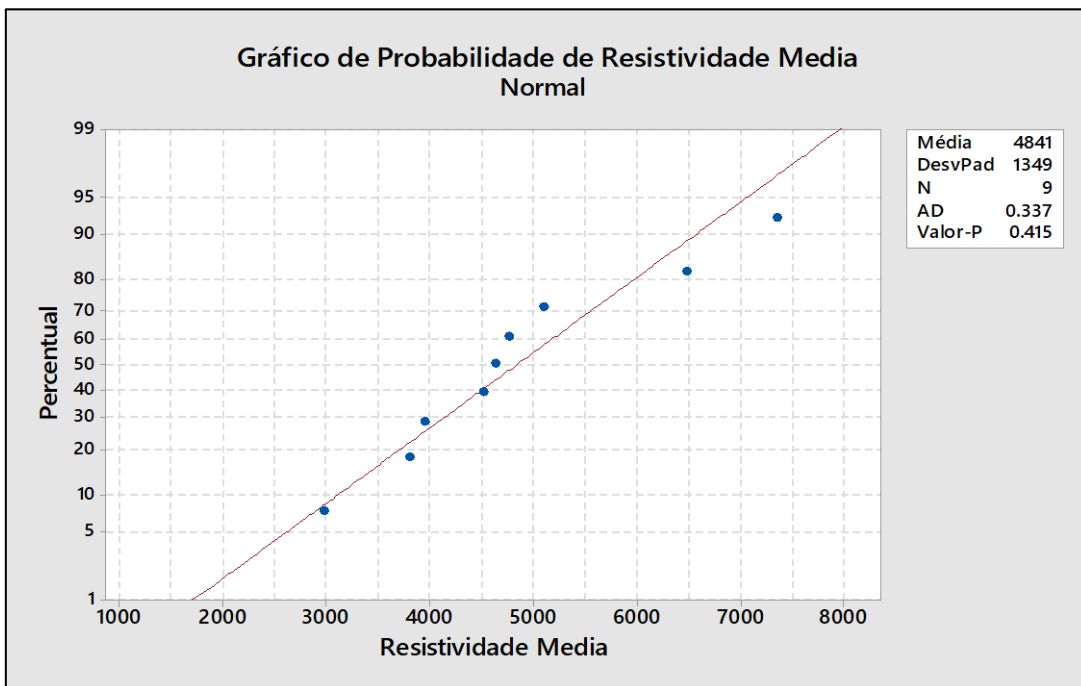


Figura 5.15 Teste de Anderson-Darling dos valores da resistividade elétrica do solo do horizonte B

Na Figura 5.16 é mostrada a correlação existente da sucção com a resistividade elétrica do horizonte C, verificando-se uma dispersão menor dos dados, devido a uma melhor qualidade das leituras do ensaio de resistividade elétrica. Esses resultados mostram um ajuste potencial, com  $R^2$  de 0,94. Os valores do logaritmo da sucção e da resistividade mostram também distribuição normal ( $p$ -valor = 0,898 e  $p$ -valor = 0,158, respectivamente) (Figura 5.17 e Figura 5.18).

Foi calculado o coeficiente de Spearman, retornando num valor de 0,952, mostrando que a correlação é significativa e fortemente positiva para essa tendência potencial ( $p$ -valor < 0,05). A tendência mostrou ser similar ao horizonte B, no entanto, com um melhor ajuste, corroborando-a nos dois horizontes de solo presentes.

Na Figura 5.13 não é possível observar algum ponto específico de mudança no comportamento da tendência, no entanto na Figura 5.16 podem ser notadas mudanças nos valores da resistividade acima de valores de 4000  $\Omega$ -m, que corresponde a valores próximos ao tamanho dos microporos, provocando grandes discontinuidades da fase líquida nos poros maiores. São necessárias grandes variações da sucção (dessaturação), acima desse valor, para provocar uma variação significativa da resistividade. Esse valor mostra-se também como ponto de mudança nas leituras na curva de resistividade (Figura 5.11).

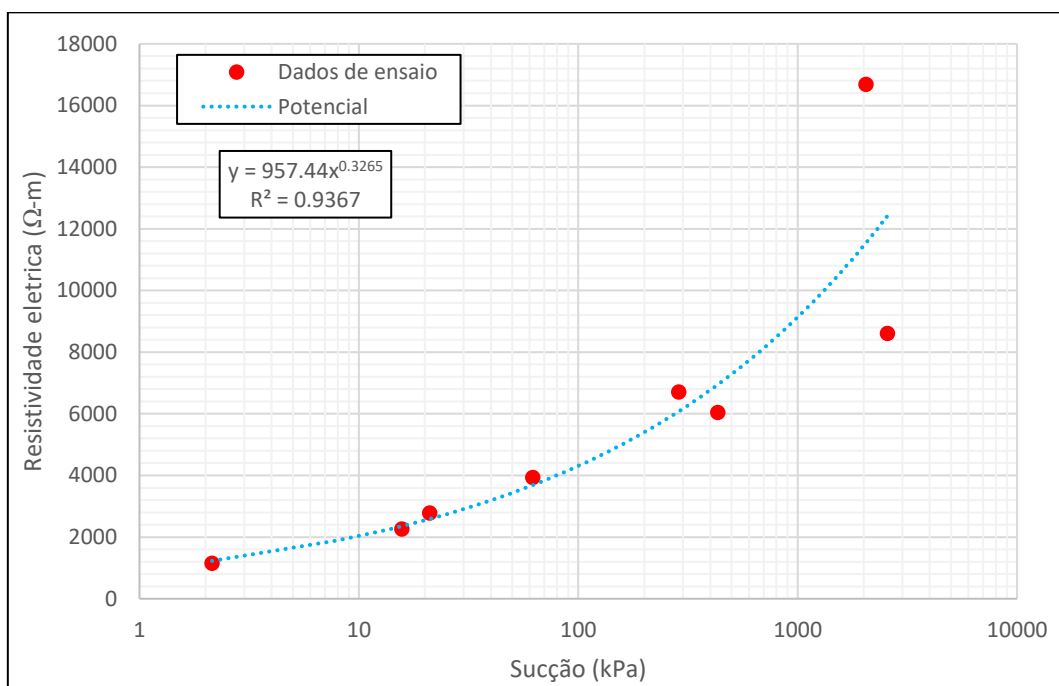


Figura 5.16 Relação da sucção com a resistividade do solo do horizonte C.

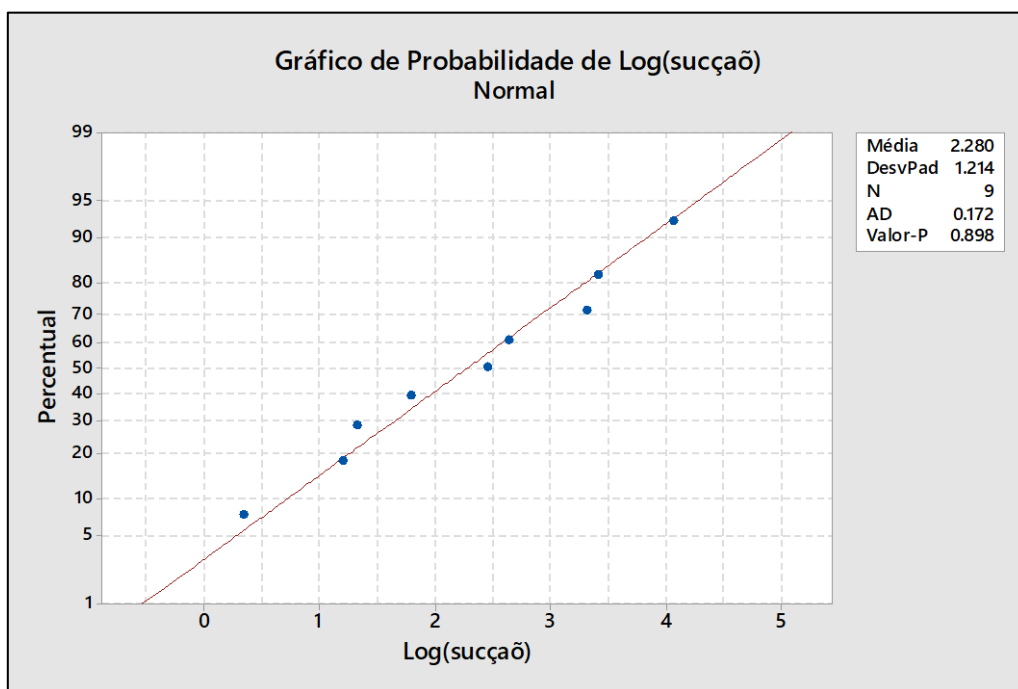


Figura 5.17 Teste de Anderson-Darling dos valores do logaritmo da sucção do solo do horizonte C.

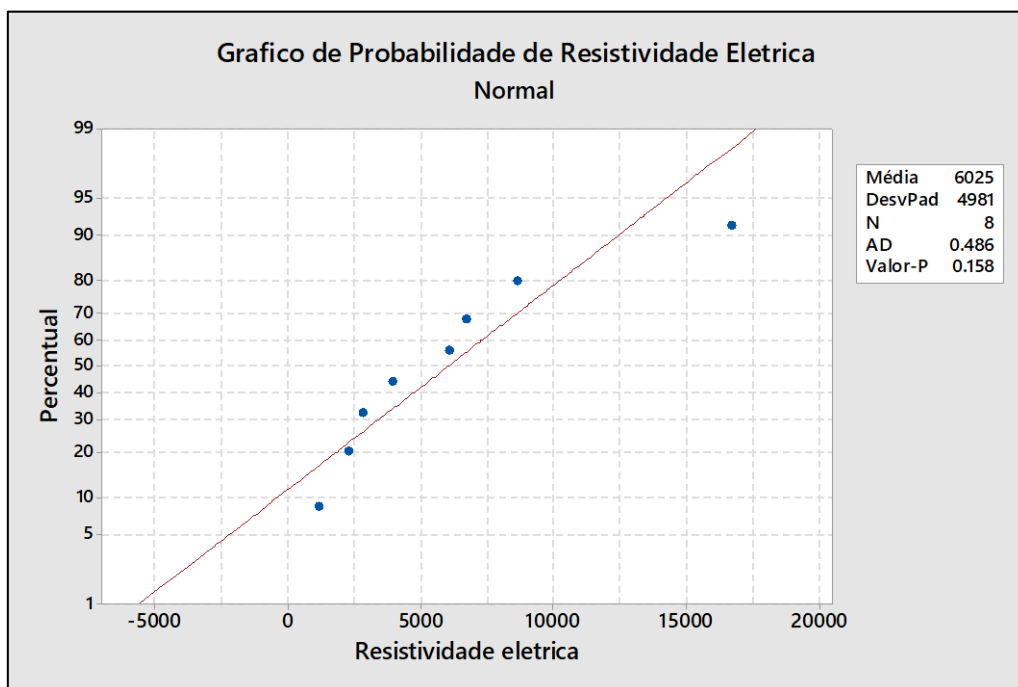


Figura 5.18 Teste de Anderson-Darling dos valores da resistividade elétrica do solo do horizonte C.

## 5.5. Sondagem Elétrica Vertical em Campo

Os ensaios de resistividade elétrica em campo foram realizados a montante do talude da voçoroca e consistiu na execução de duas SEVs, com a finalidade de determinar a profundidade do nível de água subterrânea na área e o topo da rocha sã. Como no pé do talude da voçoroca a água aflora no contato rocha com a base do saprolito (Horizonte C), será possível construir uma seção geológica com informação desses pontos.

Na Figura 5.19 e Tabela 5.9 são mostrados os resultados da SEV1 (Figura 4.14), levantada em 14/01/2020. De acordo com a inversão dos dados, cinco camadas geoeletricas puderam ser reconhecidas. Cabe salientar que devido a pequena variação nos valores de resistividade entre os horizontes B e C do perfil do solo, não é fácil distinguir entre eles através desses resultados, o que era esperado, embora o primeiro tenha exibido uma tendência de maiores valores para altos valores de umidade, devido ao maior tamanho dos macroporos, apesar do maior teor de argilominerais. Cabe destacar que a resposta geoeletrica é mais relacionada à variação de umidade de que com a composição e estrutura dos horizontes pedológicos B e C.

No entanto, a SEV1 mostrou uma camada de alta resistividade ( $19.297 \Omega\text{-m}$ ) de 0,54m de espessura na superfície, seguida de uma camada de baixa resistividade ( $2.604 \Omega\text{-m}$ ), de 6,58m de espessura. Interpretou-se a primeira como resultado da evapotranspiração elevada na superfície e a segunda como os solos mais úmidos pelas águas infiltrantes das chuvas que antecederam os levantamentos. De fato, choveu muito entre os dias 01/01/2020 e 06/01/2020, daí de forma alternada os dias 8/01/2020 e 10/01/2020, e depois ocorreu um intervalo de 3 dias sem chuva antes do levantamento, no dia 14/01/2020. A camada de mais alta resistividade ( $17.996 \Omega\text{-m}$ ) com topo a 7,12 metros de profundidade provavelmente representa as condições de umidade anterior às chuvas no Horizonte C, mais resistivo nesses valores de umidade. A camada seguinte, de baixa resistividade ( $1.790 \Omega\text{-m}$ ), certamente representa o topo da superfície freática, a 20,33m de profundidade, que na área ocorre na base do saprolito (Bacellar, 2000). O valor encontrado é coerente com a resistividade do saprolito saturado determinado em laboratório (Figura 5.11). Por fim, a camada de altíssima resistividade ( $150.000 \Omega\text{-m}$ ) a 40,45m de profundidade certamente representa o topo do maciço rochoso gnáissico da área.

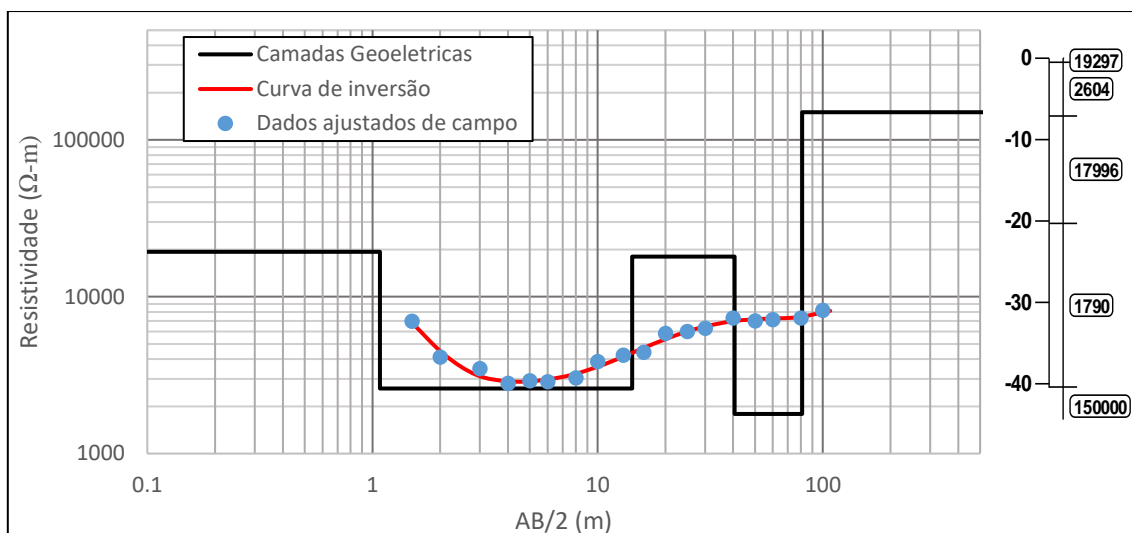


Figura 5.19 Interpretação da SEV1 e camadas geoeletricas.

Tabela 5.9 Resumo das camadas geoeletricas da SEV1

Resistividade ( $\Omega\text{-m}$ )	Espessura (m)	Prof. Max. (m)
19.297	0,54	0,54
2.604	6,58	7,12
17.996	13,2	20,33
1.790	20,1	40,45
150.000		

Na Figura 5.20 e Tabela 5.10 são apresentados os resultados da SEV2 (Figura 4.14), levantada na mesma data da SEV1, porém sem conseguir os resultados esperados da profundidade do nível freático e do topo rochoso. Nela não foi atingida a profundidade desejada no levantamento, devido ao começo da chuva no momento de execução do levantamento. No entanto, foi possível constatar que o levantamento exibiu as mesmas três camadas geoeletricas superiores encontradas na SEV1, embora esses valores apresentem diferenças com os valores da SEV1, devido provavelmente a encontrar-se nas proximidades de um canal de terraceamento da área. Portanto, os resultados das sondagens elétricas verticais (SEVs) ofereceram resultados aceitáveis segundo as curvas de comportamento da resistividade elétrica obtidas em laboratório. Essas curvas oferecem também uma correlação dos valores de resistividade com o teor de umidade mostrando uma faixa de valores de umidade a se esperar.

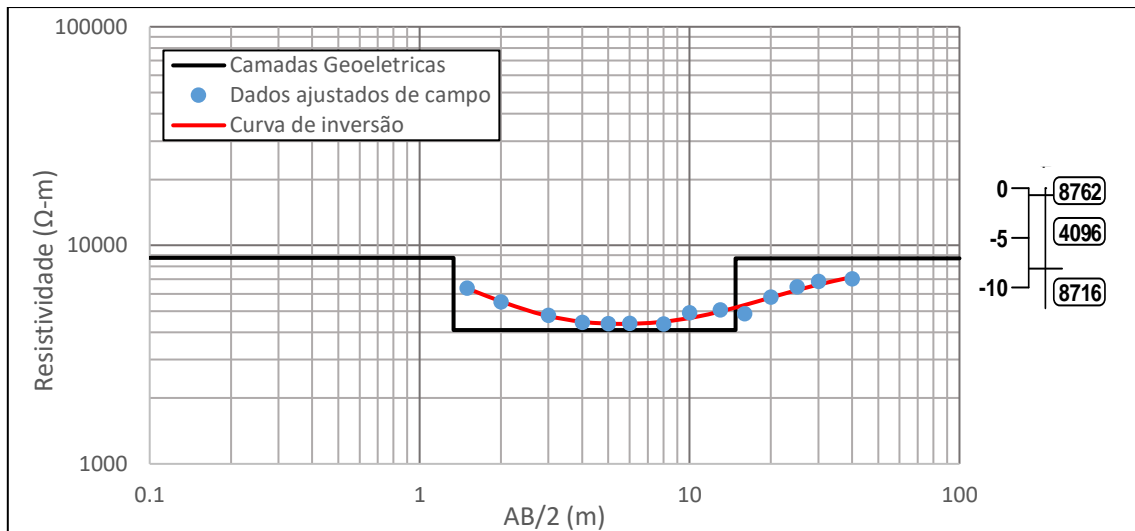


Figura 5.20 Interpretação da SEV2 e camadas geoeletricas.

Tabela 5.10 Resumo das camadas geoeletricas da SEV2

Resistividade ( $\Omega$ -m)	Espessura (m)	Prof. Max. (m)
8762	0.67	0.67
4096	7.41	8.08
8716		

## 5.6. Simulação de fluxo e análise de estabilidade

Na Figura 5.21 é mostrado o mapa topográfico gerado da área de estudo por reconstituição do levantamento aéreo com drone. Nessa figura é possível observar a totalidade da voçoroca sob estudo e parcialmente a voçoroca localizada a oeste. Esses dados foram utilizados para geração de um modelo digital de superfície como também da seção utilizada na análise de fluxo e estabilidade do talude NW da voçoroca (Figura 5.22).

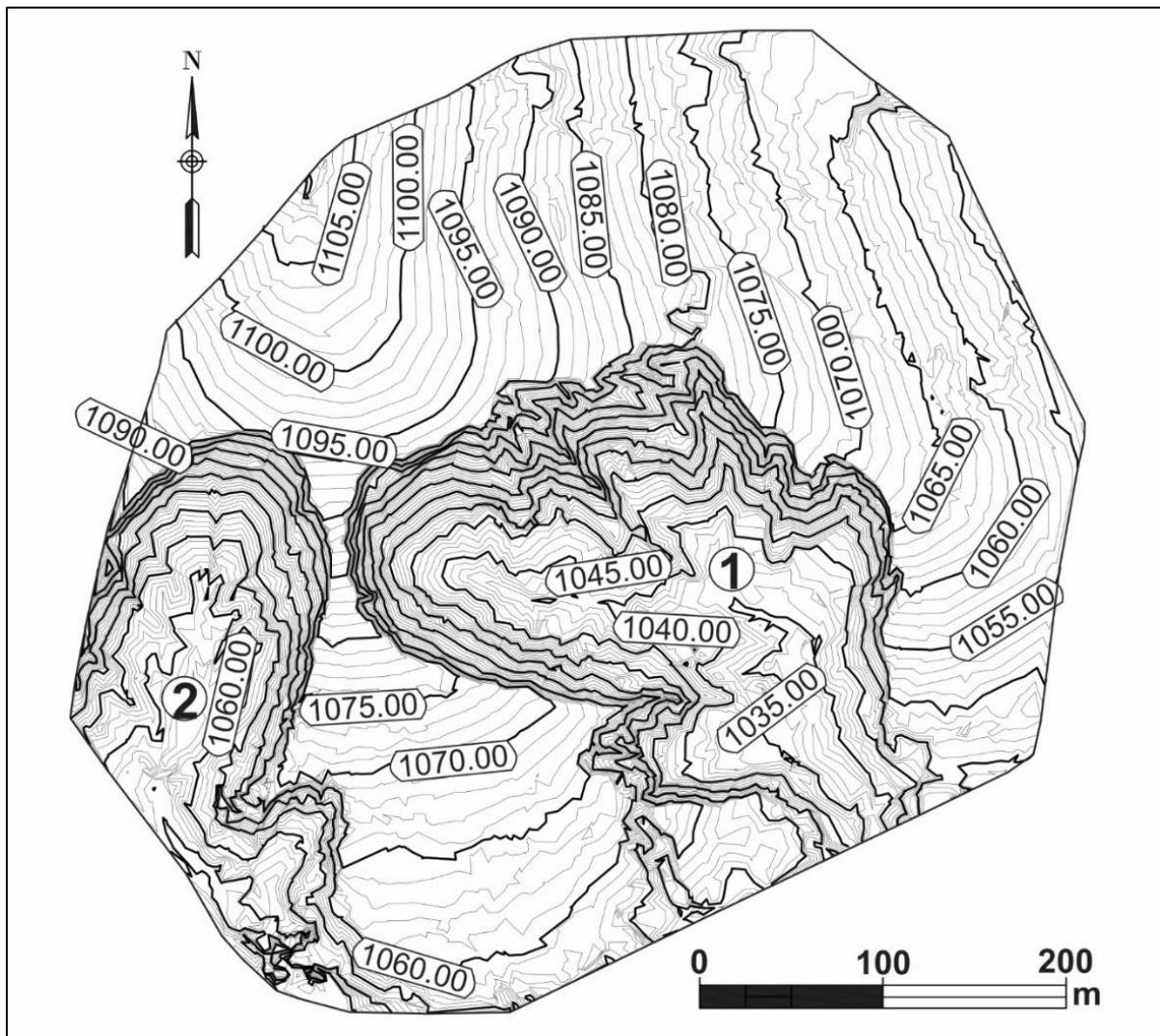


Figura 5.21 Mapa topográfico da área da voçoroca estudada (voçoroca 1) na estação Holanda estendendo-se até o divisor topográfico seguindo o aclave topográfico. Notar que há outra voçoroca se desenvolvendo a oeste (voçoroca 2).



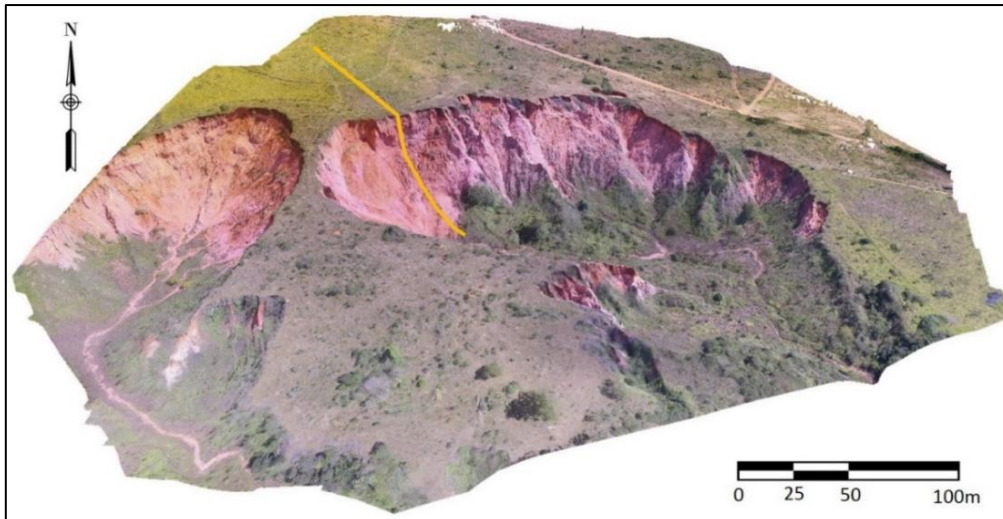


Figura 5.22 Modelo digital de superfície da área da voçoroca, com seção em estudo marcada em amarelo no talude NW da voçoroca, exibindo ausência de vegetação e evidência de um pequeno escorregamento recente nesse talude.

Para a execução das simulações de fluxo em regime transiente, foi preciso fazer inicialmente uma simulação de fluxo em regime permanente, para que existessem valores de carga hidráulica em todos os nós do modelo numérico. Esta simulação inicial foi feita com as condições de contorno especificadas no capítulo anterior (Figura 5.23). Os resultados dessa simulação representam as condições iniciais para a simulação em regime transiente do ano 1. Após a simulação desse ano hidrológico, os resultados apresentam as condições médias esperadas para a área (Figura 5.24).

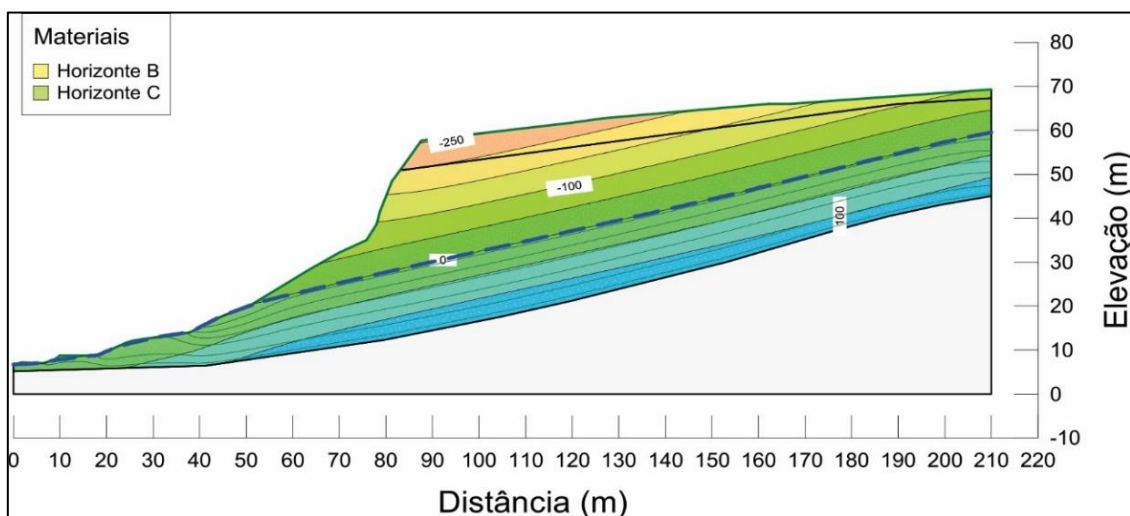


Figura 5.23 Resultados da simulação de fluxo em regime permanente, mostrando isolinhas dos valores iniciais de propressão a cada 50 kpa, representando os valores para cada nó do modelo.

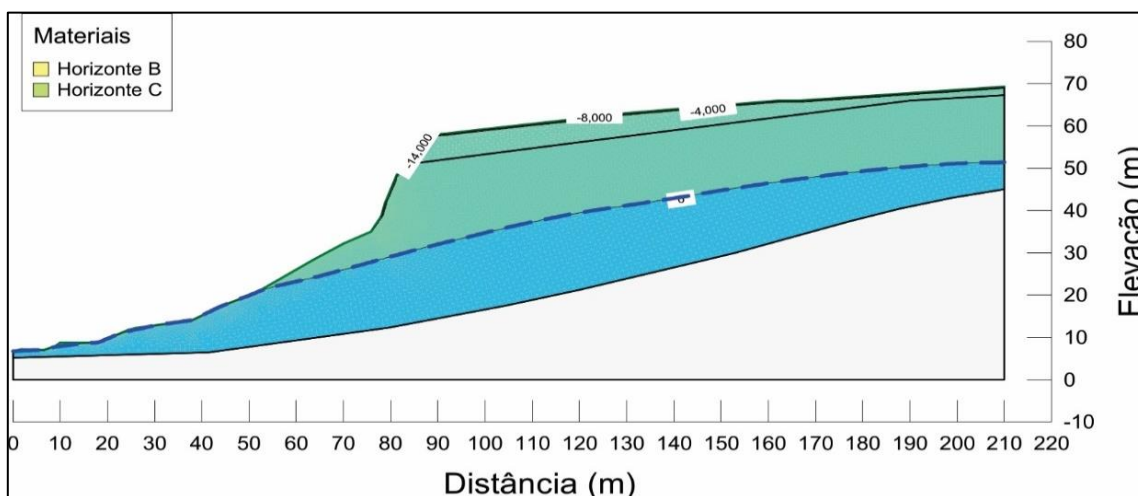


Figura 5.24 Resultado final da simulação de fluxo em regime transitório do ano 1. Notar que a zona não saturada é muito espessa e que o nível d'água aflora no sopé do talude, como identificado em campo, além de valores elevados de sucção próximos da superfície devido às condições climáticas.

Como apresentado no capítulo anterior, a simulação numérica em fluxo transitório foi feita considerando-se dois anos de simulação, com as condições climáticas do ano hidrológico 2018/2019. Os dados pluviométricos deste ano hidrológico são apresentados na Figura 5.25, observando-se um inverno seco, de abril a setembro, e um verão chuvoso, mas com mais chuvas no mês de Novembro e menos em Janeiro quando comparados com dados históricos (Figura 3.11), fenômeno denominado na região “veranico”. Também foram calculados valores de evapotranspiração potencial pelo método de Thornthwaite (1948) no período de análise (Figura 5.26). Tais dados foram utilizados para simular as condições de interação solo-atmosfera do modelo numérico de fluxo em regime transiente no *SEEP/W*.

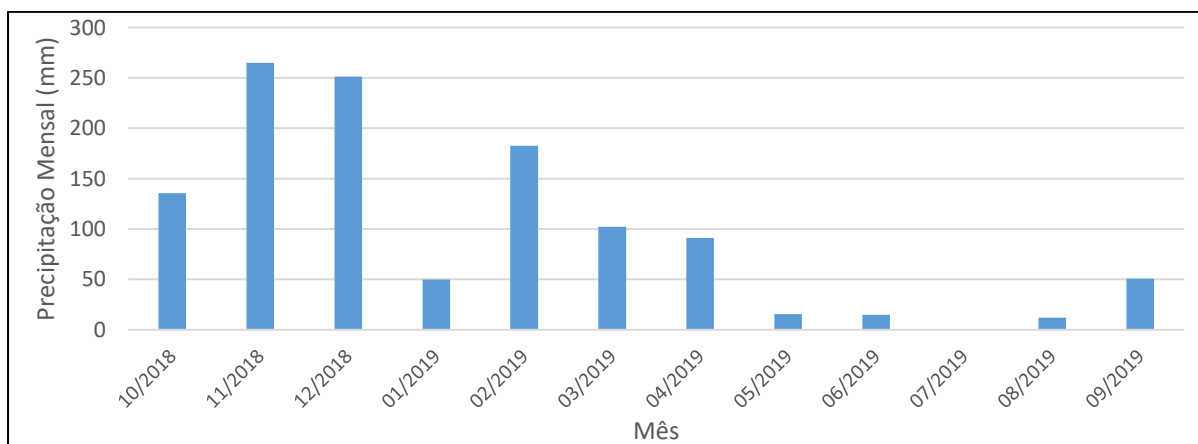


Figura 5.25 Dados pluviométricos do ano hidrológico estudado. Fonte dos dados: CEMADEN.

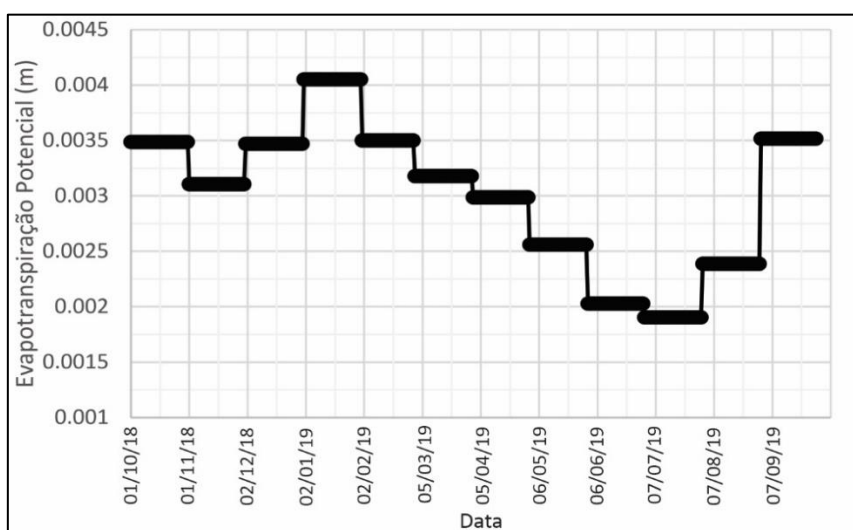


Figura 5.26 Valores de evapotranspiração potencial no ano hidrológico analisado, estimados mensalmente através do método de Thornthwaite (1948).

Com a simulação de fluxo em regime transiente foi possível estimar o balanço hídrico no modulo *SEEP/W* desde o primeiro dia (01/10/2018) da simulação (Figura 5.27). Nessa figura é exemplificada a sazonalidade climática ao longo do ano hidrológico, começando a simulação com um volume de água igual zero, partindo das condições da análise em regime permanente, podendo essa condição inicial de volume zero variar os valores finais do balanço hídrico.

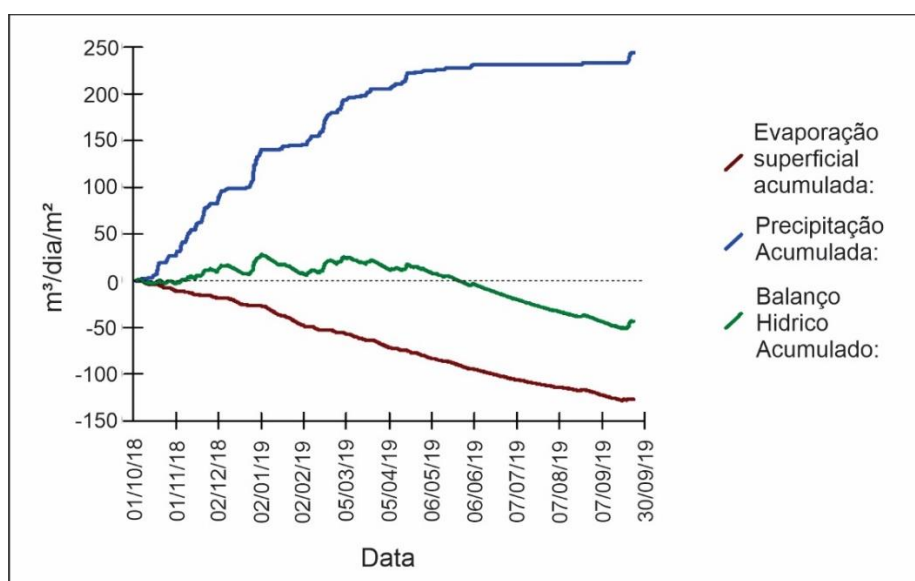


Figura 5.27 Resumo do balanço hídricos do modelo completo, ilustrando o aumento da precipitação no período de chuvas com posterior estabilização na seca, além do aumento da evaporação e a variação do balanço hídrico no ano hidrológico.

Na Figura 5.27, a parcela da precipitação representa a condição de entrada, mostrando o crescimento no período de chuva (01/10/18 - 05/04/19), e se estabilizando no período de estiagem (05/04/19 - 30/09/19), com um valor máximo acumulado de 250 m<sup>3</sup> no final de um ano hidrológico. A parcela da evaporação real acumulada representa a remoção da água da superfície do terreno, estimada segundo o método de Wilson et al. (1997), alcançando um valor máximo na faixa de 130 m<sup>3</sup>. A diferença de 120 m<sup>3</sup> representa o escoamento superficial e a infiltração acumulada no período de estudo. O balanço hídrico acumulado mostra a disponibilidade de água no período chuvoso, como também a deficiência no período de estiagem.

Na Figura 5.28 pode ser observada a variação do nível d'água entre o primeiro dia de simulação (01/10/18) e o dia 01/01/2019, correspondente ao ano 2 da simulação em regime transiente. Ressalta-se nessa figura duas estações de interesse, a estação 65m e 120m, representando o local de máxima variação do NA e a localização da SEV1, respectivamente. A profundidade simulada numericamente do NA após o primeiro ano de simulação, quando comparada novamente aos dados da SEV1 (Tabela 5.9), continua de acordo com a profundidade estimada nessa etapa, indicando boa calibração.

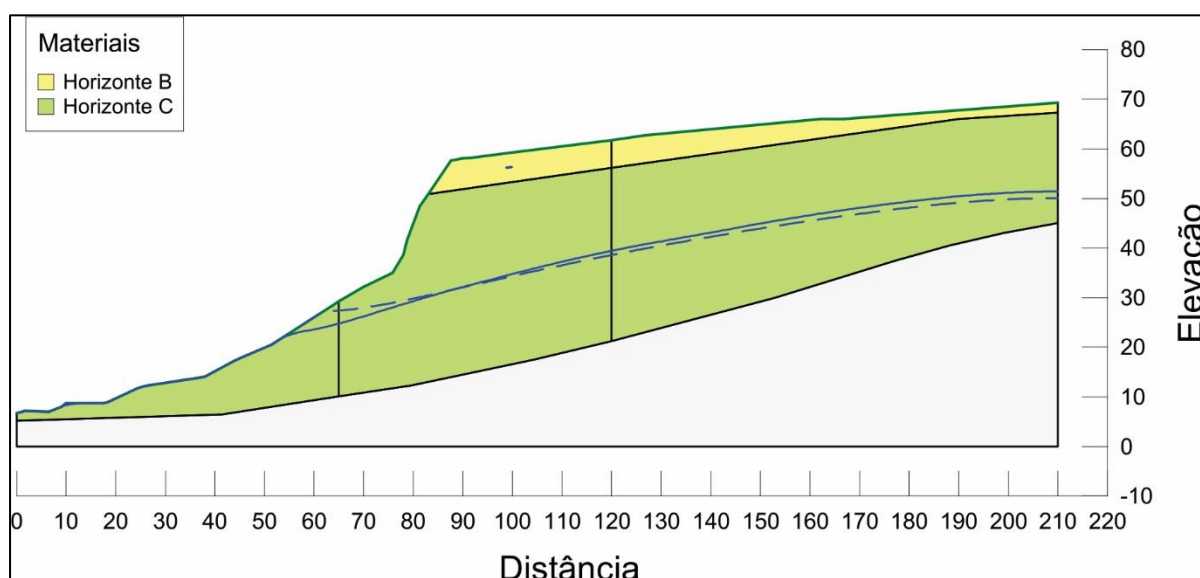


Figura 5.28 Posição do nível de água (NA) no início da simulação 01/10/2018 (dia 365) e no dia 01/01/2019 (dia 456), representado pela linha tracejada. Notar elevação do NA próximo à face do talude. As duas linhas verticais pretas representam estações de avaliação de resultados (65m e 120m) representados nas Figura 5.29 e Figura 5.30.

É possível observar um aumento do nível d'água próximo da face da voçoroca por causa das chuvas, e uma diminuição geral no restante do talude, ilustrando duas situações distintas do nível d'água. Próximo à face da voçoroca na estação 65 m (Figura 5.29) o NA varia entre os níveis 24,70 m e 27,67 m de elevação, com uma diferença anual de 2,97 m. O nível mínimo ocorre no final da estação seca, no início da simulação (01/10/18), atingindo o nível máximo no verão, em janeiro, influenciado diretamente pela infiltração superficial. Nesta estação o NA se encontra próximo à superfície (< 3m de profundidade), chuvas recarregam rapidamente por causa da franja de saturação capilar.

No restante da seção, representada pela estação 120 m, a variação do NA é menor (Figura 5.30) da elevação 38,23 m a 39,47 m, com diferença anual de 1,24 m. O nível de água mínimo é atingido no final do período chuvoso (01/03/19). Isto ocorre pois neste trecho a percolação de água até o NA é lenta devido à grande espessura da zona não saturada causando um *lag-time* de mais de 5 meses. Esse fato provoca que a elevação máxima do NA nesta estação seja atingido entre os meses de julho e agosto, quando a frente de saturação iniciada no período chuvoso o atinge. Drumond e Bacellar (2006) monitoraram o entorno de uma voçoroca na região com piezômetros e encontraram uma situação similar, com máximo do NA entre os meses de junho e julho. O tempo maior do recarregamento do aquífero encontrado neste estudo provavelmente se deve a espessura um pouco maior da zona não saturada que a mensurada por esses autores.

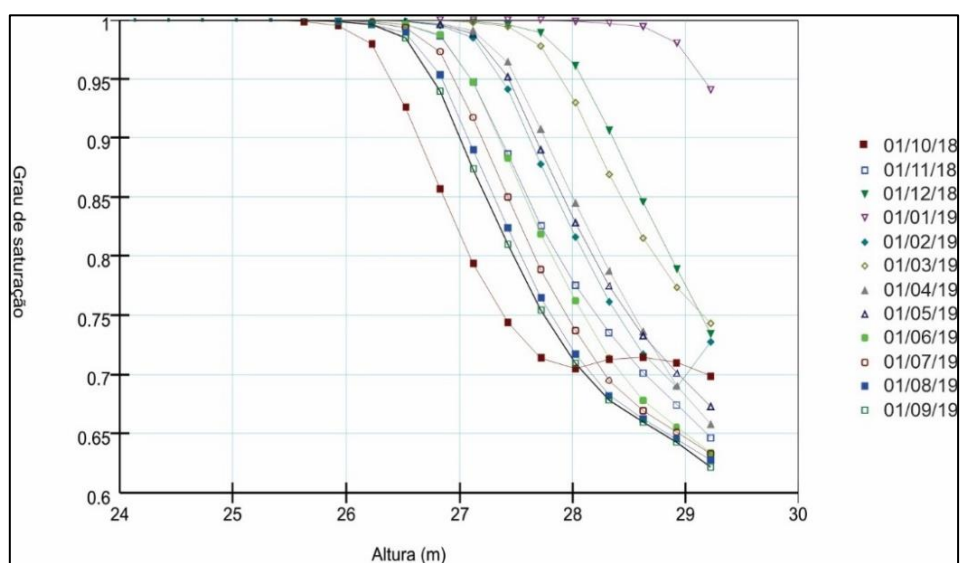


Figura 5.29 Variação anual do nível d'água na estação 65m (Figura 5.28). NA mínimo no dia 01/10/18 no final do período seco e o NA máximo no dia 01/01/19 no auge do período chuvoso.

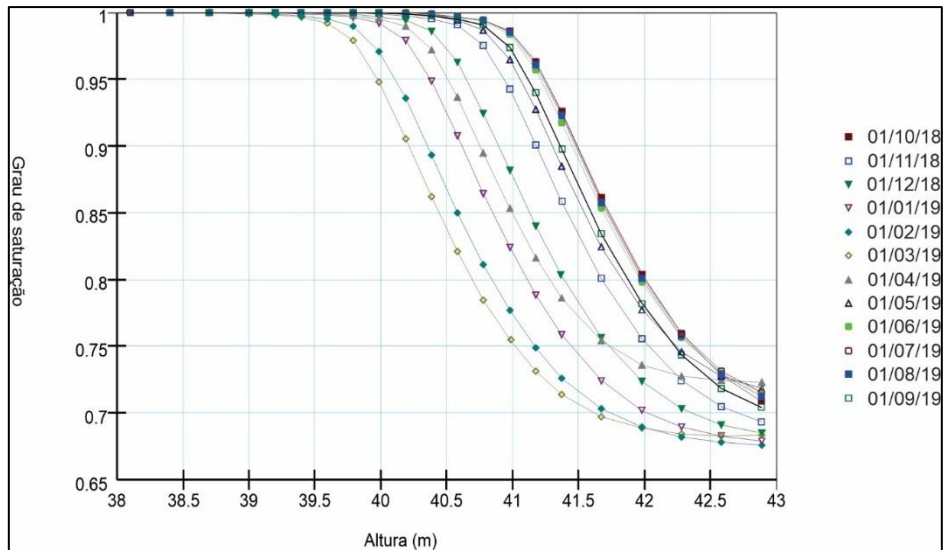


Figura 5.30 Variação anual do nível d'água na estação 120 m (Figura 5.28). NA mínimo no dia 01/03/19 no final da estação chuvosa e o NA máximo nos dias 01/10/18 e 01/06/19 e 01/07/19 no auge da estação seca.

Na Figura 5.31 são apresentadas as médias mensais de vazão de drenagem pela fronteira esquerda da seção, ou seja na face da voçoroca. Verifica-se que as maiores vazões ocorrem em janeiro e que há uma segunda elevação após o período de estiagem. Drumond e Bacellar (2006) encontraram situação similar ao monitorar por um ano o fluxo pelos canais de drenagem internos a uma voçoroca da região. Segundo estes autores, o primeiro e segundo aumento da vazão seriam consequência das chuvas e da recarga tardia do NA no restante da seção, respectivamente. Embora o mês de janeiro no ano hidrológico analisado tenha sido mais seco que a média na região, esta exfiltração pode ser consequência das maiores chuvas antecedentes, que foram muito elevadas, principalmente em novembro (Figura 5.25).

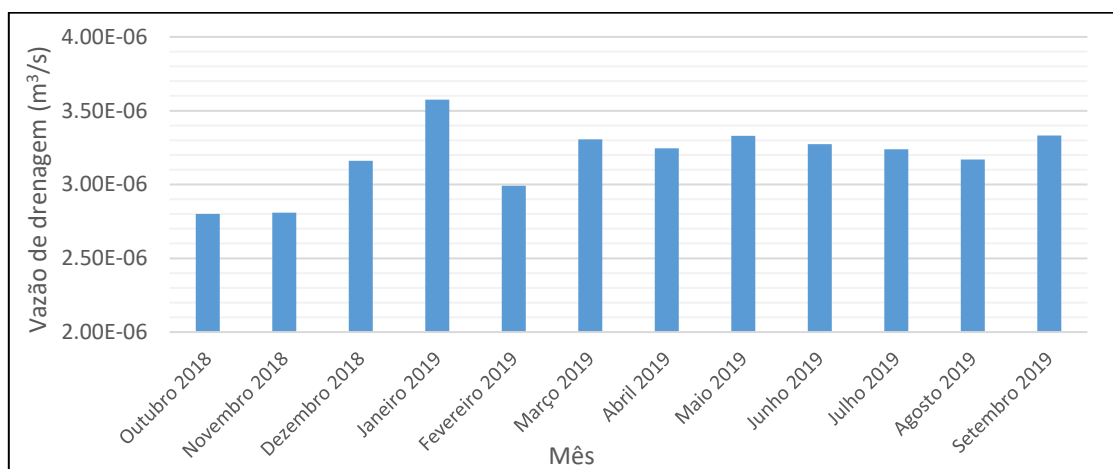


Figura 5.31 Exfiltração de água em direção à voçoroca durante o ano hidrológico, medidos nos nós correspondentes à face do talude na zona de exfiltração.

Depois dessas simulações de fluxo, foram acopladas simulações de estabilidade para todos os estágios de fluxo, objetivando identificar a superfície crítica e também a zona potencial de ruptura (Figura 5.32). Ao longo do ano hidrológico essa superfície crítica apresentou poucas variações no fator de segurança, mantendo-se sempre na faixa potencial de ruptura (Figura 5.33). Essas superfícies de ruptura se mostraram grandes e profundas, enquanto *in situ* são esperadas uma mistura de superfícies de ruptura, tanto superficiais, como consequência dos fatores deflagradores do processo erosivo da voçoroca (perda de material no sopé) quanto superfícies de ruptura mais profundas provocadas pela mudança da geometria do talude provocada pelos escorregamentos superficiais.

Verifica-se também um comportamento cíclico do fator de segurança, com dois valores mínimos, um no auge da estação chuvosa, em janeiro (01/01/19) e outro em abril (17/04/19), quando o NA sobe próximo ao sopé e depois no interior do talude, respectivamente. Há uma pequena subida no fator de segurança em janeiro em provável decorrência da falta de chuvas neste mês no ano analisado (Figura 5.25). O maior fator de segurança ocorre no final do período seco quando o NA se encontra mais profundo. Contudo, estas variações no fator de segurança mostraram ser quase desprezíveis, ficando na faixa de 3% de variação ao longo do ano hidrológico.

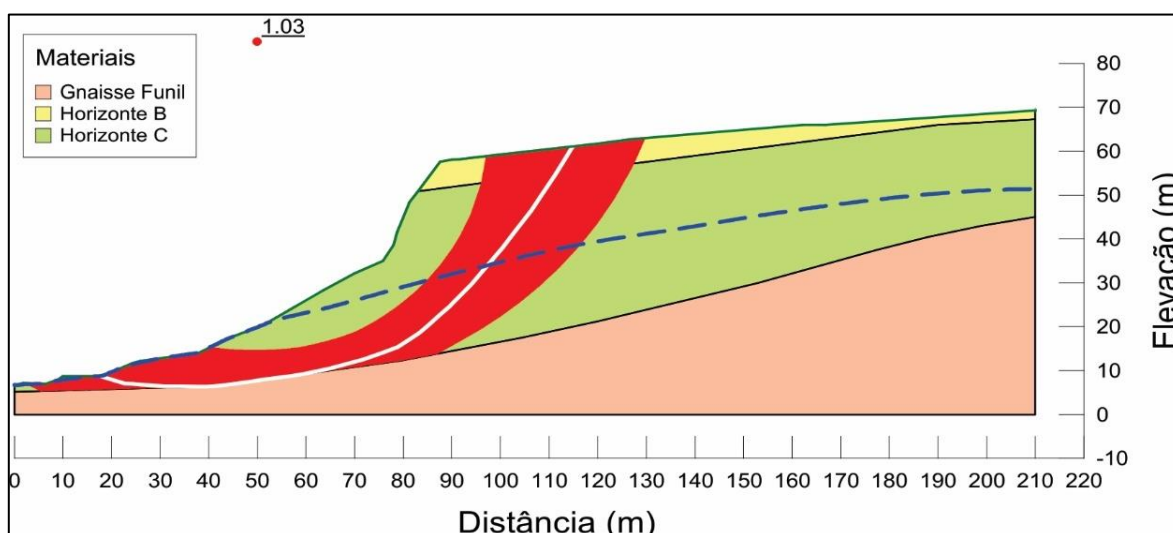


Figura 5.32 Superfície de ruptura no início do ano hidrológico. Mostrando uma superfície de ruptura profunda e uma massa de solo grande, com valor do FS baixo.

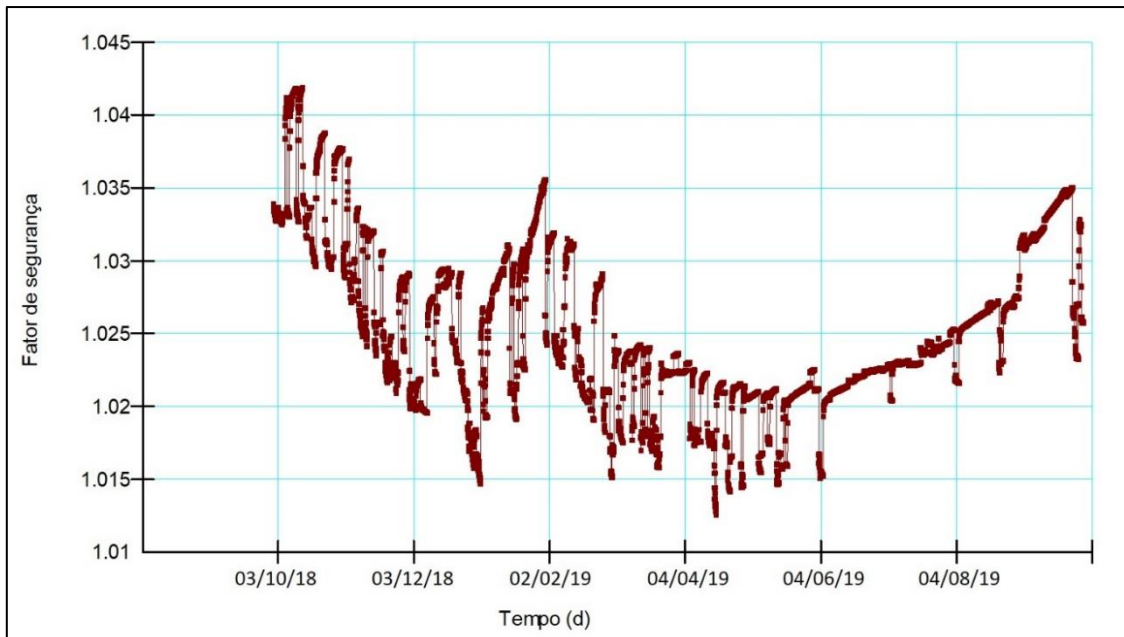


Figura 5.33 Variação do fator de segurança no ano hidrológico. Mostrando pouca variação no valor do FS ao longo do ano hidrológico. Levemente maior no final da estação seca e menor tanto na estação chuvosa como na estação seca.

Nas Figura 5.34 e Figura 5.35 são mostradas as superfícies de ruptura para os dias 371 (08/10/18), no início do ano hidrológico, e no dia 562 (17/04/19), no fim do período mais crítico, quando o fator de segurança é máximo e mínimo respectivamente. Nota-se que a superfície de ruptura apresenta pouca variação nestes dois extremos e que a diferença está relacionada com a variação das condições de fluxo.

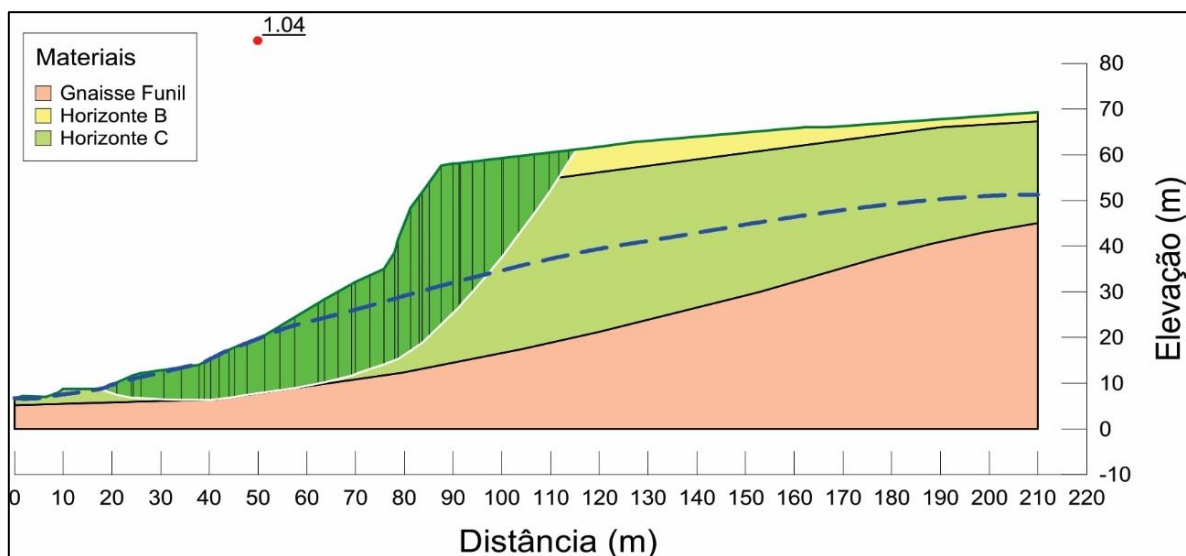


Figura 5.34 Superfície de ruptura e fator de segurança no dia 371 (08/10/18).



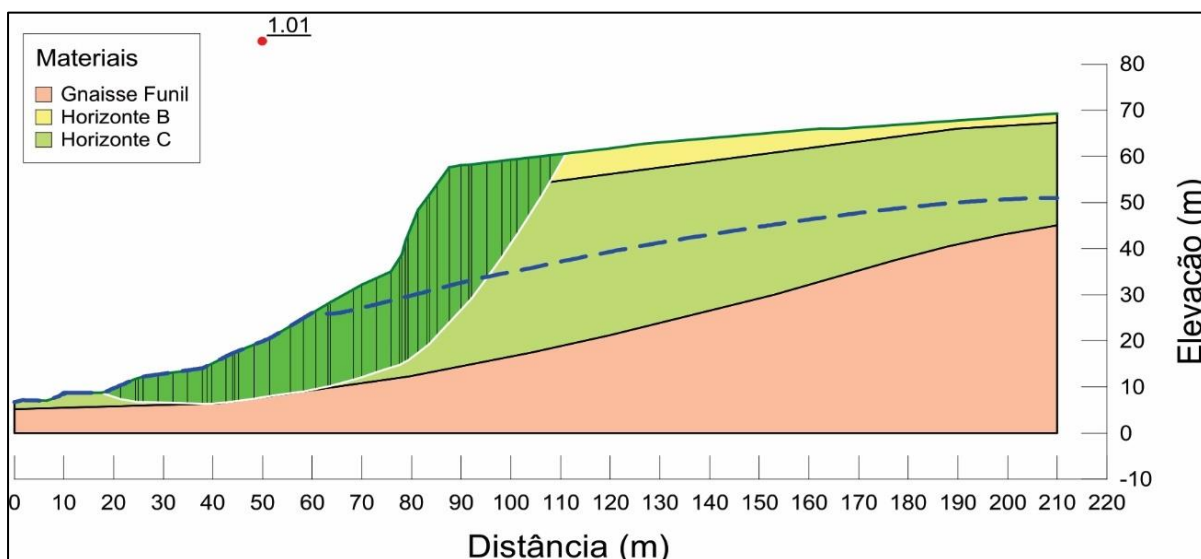


Figura 5.35 Superfície de ruptura e fator de segurança no dia 562 (17/04/19).

Na Figura 5.36 é mostrada a variação da poropressão nas fatias da massa do solo ao longo das superfícies de ruptura correspondentes aos dias 371 (08/10/18) e 562 (17/04/19). Observa-se a existência de maiores valores de poropressão positiva devido à ascensão do nível d'água com consequentes valores negativos menores, com exceção das fatias mais próximas à face da voçoroca no dia 562 (17/04/19), explicando o aumento da situação de instabilidade.

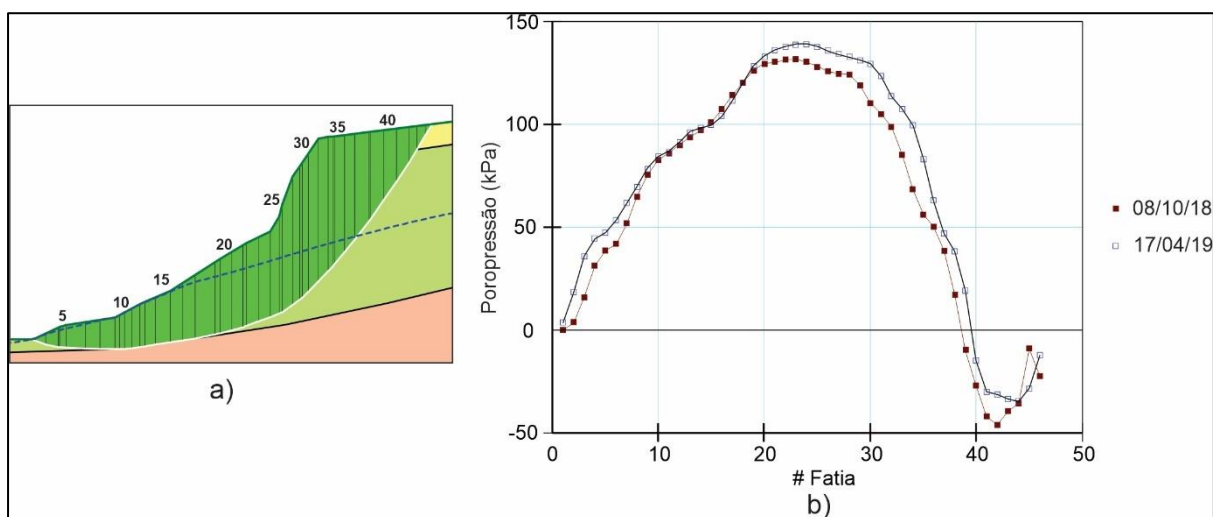


Figura 5.36 a) Esquema do numero de fatias na superfície de ruptura. b) Variação da poropressão nos dias 371 (08/10/18) e 562 (17/04/19) da simulação.

Observando as análises de fluxo é possível observar a existência de componentes ascendentes do gradiente hidráulico no sopé do talude (Figura 5.37). Os valores do gradiente de hidráulico nesse ponto apresentam valores de 0,66 a 0,75 ao longo do ano hidrológico, exibindo existência de valores elevados, além de possibilidade de *piping* e carreamento de material. Além de coincidir com a localização do efeito areia movediça no material acarreado, mencionado por Bacellar et al. (2005).

Em suma, as simulações efetuadas mostram que este talude da voçoroca se encontra em situação meta-estável, com baixos fatores de segurança, e que este fator decresce em função do comportamento do nível d'água. Devido a configuração não usual dos taludes desta voçoroca, praticamente vertical com um sopé menos inclinado, a alimentação do NA ocorre em dois tempos. No sopé do talude a recarga ocorre em decorrência das chuvas de verão, enquanto que para o interior do talude a recarga é atrasada devido à espessa zona não saturada. Desta forma, o FS é levemente afetado pelas condições de fluxo, decrescendo no período de chuvas em função da subida do NA no sopé do talude e no período seco em decorrência da subida do NA pela recarga atrasada. As superfícies de ruptura grandes e profundas encontradas, em conjunto com os fatores deflagradores da estabilidade (fluxos verticais e valores elevados de gradiente hidráulico) poderiam se ajustar melhor ao comportamento encontrado *in situ*, diminuindo o tamanho destas superfícies de ruptura.

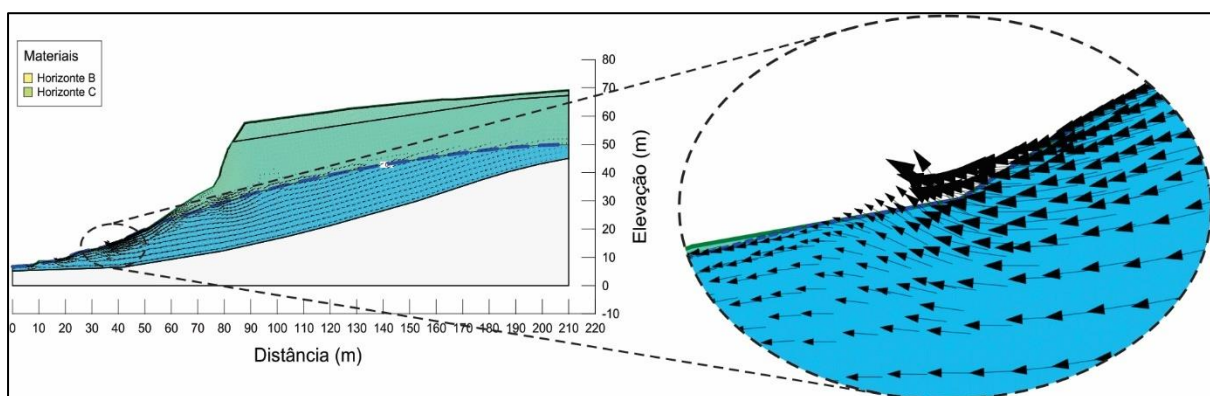


Figura 5.37 Gradiente hidráulico com forte componente ascendente no sopé do talude no dia 30/09/19.

## 7. CONCLUSÕES

O estudo de um talude de uma voçoroca instável localizada no Complexo do Bação permitiu chegar às seguintes conclusões:

- Os valores obtidos da caracterização dos solos dos horizontes B e C (saprolito) resultaram similares aos de trabalhos anteriores, o que viabilizou a utilização de alguns dos resultados desses trabalhos;
- As curvas de retenção obtidas neste estudo mediante o método do papel filtro apresentaram um comportamento bimodal, correspondente à distribuição bimodal de poros, comportamento pouco comum para solos do horizonte C. O comportamento dessas curvas mostrou diferenças, em comparação com as curvas apresentadas na literatura desses mesmos horizontes do solo;
- A relação entre a resistividade elétrica e a sucção dos horizontes de solo estudados, apesar da redução de acurácia dos resultados de resistividade elétrica devido tanto ao efeito de borda como também as trincas no solo para pequenos valores de umidade, apresentaram uma alta significância e uma correlação de razoável a boa, mostrando uma maior correlação, especialmente no horizonte C; estes resultados permitiram melhor interpretação das sondagens elétricas verticais (SEV) de campo
- O modelo numérico na simulação de fluxo aderiu-se ao esperado, corroborando estudos anteriores no complexo Bação. No fluxo subsuperficial o nível de água sob os efeitos de interação solo-atmosfera mostrou duas diferentes variações cíclicas, a primeira próxima do sopé do talude, influenciado pela infiltração superficial (maior nível no período de chuvas) e a segunda no aquífero local, recarregado pela percolação profunda atrasada (maior nível do NA no período de estiagem). Essas variações do NA podem ser consideradas pequenas comparadas às grandes dimensões do talude da voçoroca sob análise.
- A vazão de exfiltração do talude para a voçoroca apresentou também variação cíclica, mostrando aumento de fluxo devido às chuvas de verão e aumentos subsequente devido à recarga atrasada. A existência de fluxo ascendente também foi confirmada no modelo, exibindo valores elevados de gradiente hidráulico no sopé do talude, considerando-se um fator deflagrador da estabilidade. A simulação de estabilidade exibiu valores de fator de segurança baixos, próximos da instabilidade, como também pequena variação ao longo do período de estudo, provocadas pelas condições ambientais. O fator de segurança apresentou tendência cíclica ao longo do ano hidrológico, atingindo o menor valor no período de estiagem, comprovando o maior potencial de escorregamento nesse período. Tais valores coincidiram

com o aumento do nível de água, mostrando uma relação forte com a profundidade do nível d'água.

- O uso da resistividade elétrica na análise de estabilidade tem um potencial enorme, principalmente como um sistema de alerta inicial. Mostra-se útil no monitoramento das condições de umidade por ser método não destrutivo e de baixo custo. Porém apresenta ainda algumas limitações, como: a variabilidade das leituras no método da resistividade devido aos diversos mecanismos que interferem na sua obtenção; poucos estudos sistemáticos em grande escala que possam analisar a variabilidade da resistividade com a sazonalidade climática. No entanto, superando as limitações encontradas, pode-se considerar uma ferramenta útil nesta área.
- Com as informações obtidas, acredita-se ser mais exequível projetar métodos de estabilização destas feições erosivas, que têm proporcionado muitos danos a moradores e benfeitorias na região.

## **7.1. Sugestões para futuras pesquisas**

Para estudos futuros, recomenda-se:

- Melhorar o monitoramento hídrico da área da voçoroca;
- Acompanhar os futuros processos de instabilização neste talude para confirmar a sazonalidade desses processos;
- Obtenção de amostras de solo em profundidade, para estudo da variação nos parâmetros de comportamento mecânico na espessura total do perfil.
- Melhorar as curvas de calibração de resistividade elétrica X teor de umidade com ensaios em amostras maiores;
- Com dados de resistividade elétrica mais calibrados, fazer outros levantamentos elétricos de campo visando obter mais valores de sucção no talude estudado. Com dados de sucção é possível calibrar com mais acuraria os resultados da simulação de fluxo.
- Propor medidas de baixo custo para estabilizar os taludes desta voçoroca com controle de fluxo.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABU-HASSANEIN, Z. S.; BENSON, C. H.; BLOTZ, L. R. B. ELECTRICAL RESISTIVITY OF COMPACTED CLAYS. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 5, p. 397–406, 1996.

AITCHINSON, G. D.; RICHARD, B. G. A broad-scale study of moisture conditions in pavement subgrades throughout Australia. In: *Moisture in soils beneath covered areas.* . p.198–204, 1965. Butterworths, Australia.

AMIDU, S. A.; DUNBAR, J. A. Geoelectric Studies of Seasonal Wetting and Drying of a Texas Vertisol. **Vadose Zone Journal**, v. 6, n. 3, p. 511–523, 2007.

AMORIM, L. Q.; RUBIO, R. F.; ALKMIN, F. F. The Effects of Mining Capão Xavier Iron Ore Deposit on the Water Supply of Belo Horizonte , Minas, Gerais. *Mine, Water & Environment*, 1999 IMWA Congress. **Anais...** . p.359–366, 1999. Sevilla, España.

AQUINO, F. R. DE. **Estudo Comparativo Entre a Resistividade Eletrica e Carateristicas Geotécnicas de um Solo Argiloso Compactado**, 2010. Universidade de Brasilia.

ARCHIE, G. E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. **Society of Petroleum Engineers**, v. 146, n. 1, p. 54–62, 1942.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6508: Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica. , 1984. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10838: Determinação da massa especifica aparente de amostras indeformadas, dom emprego da balança hidrostática. , 1988. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variavel. , 2000. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez. , 2016a. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7180:

Determinação do Limite de Plasticidade. , 2016b. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7181: Análise Granulométrica. , 2016c. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. , 2016d. Rio de Janeiro.

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

BACELLAR, L. D. A. P.; COELHO NETTO, A. L.; LACERDA, W. A. Controlling factors of gullyng in the Maracujá Catchment, southeastern Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, n. 11, p. 1369–1385, 2005.

BACELLAR, L. DE A. P. **Condicionantes Geológicas, Geomorfológicas e Geotécnicas dos Mecanismos de Voçorocamento na Bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG**, 2000. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BAKER, R. Determination of the Critical Slip Surface. **International Journal for numerical and Analytical methods in Geomechanics**, v. 4, n. 4, p. 333–359, 1980.

BICALHO, K. V.; BERTOLDE, A. I.; CUPERTINO, K. F.; FLEUREAU, J. M.; CORREIA, A. G. Single-function approach to calibrating Whatman no. 42 filter paper based on suction versus water content relationships. **Geotechnical Testing Journal**, v. 38, n. 1, p. 113–118, 2015.

BRAGA, A. C. DE O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**, 2006. Universidade Estadual Paulista.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic Properties of Porous Media. **Colorado State University, Hidrology Papers**, v. 3, 1964.

BULUT, R.; LEONG, E. C. Indirect measurement of suction. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26, n. 6, p. 633–644, 2008.

CAMAPUM, J. DE C. Os Solos Não Saturados no Contexto de Alguns Problemas Socioambientais no Brasil. VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. **Anais...** , 2011.

CAMAPUM, J. DE C.; GITIRANA, G. DE F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M.

- M. DOS A.; CHAGAS, F. DA S. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.
- CAMPOS, L. G. **Variação da resistividade elétrica para três solos não saturados**, 2015. Universidade Estadual Paulista Julio Mesquita Filho.
- CARVALHO, G. B. **Determinação do teor de umidade de solos tropicais da região de Cachoeira do Campo (MG) por eletrorressistividade**, 2016. Universidade Federal de Ouro Preto.
- CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; SMITH, M. G.; RICKEARD, T. S. a Low-Cost Method of Assessing Clay Dessication for Low-Rise Buildings. Discussion. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, v. 92, n. 2, p. 82–89, 1992.
- CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. Florida, USA, 2007.
- DOOR, J. V. N. **Physiographic , Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilatero Ferrifero Minas Gerais , Brazil**. 1969.
- DRUMOND, F. N. **Caracterização e quantificação dos processos erosivos atuantes na evolução de uma voçoroca na bacia do riacho Manoel Felix no complexo metamórfico do Bação, quadrilatero ferrifero - MG**, 2006. Universidade Federal de OUro Preto.
- DRUMOND, F. N.; BACELLAR, L. D. A. P. Caracterização Hidrossedimentológica e dos Processos Evolutivos de Voçoroca em Área de Rochas Gináissicas do Alto Rio das Velhas (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2, p. 87–96, 2006.
- DUNCAN, J. M. State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 124, n. 7, p. 577–596, 1996.
- DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Soil Strength and Slope Stability**. Hoboken, New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc., 2014.
- DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v. 30, n. 2, p. 211–223, 1994.
- EDIL, T. B.; MOTAN, S. E.; TOHA, F. X. Mechanical Behavior and Testing Methods of Unsaturated Soils. **Laboratory Shear Strength of Soil**, p. 114–129, 1981.
- ESCARIO, V.; SÁEZ, J. The shear strength of partly saturated soils. **Geotechnique**, v. 36, n. 3, p. 453–456, 1986.



FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3º ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FONSECA, A. P. **Compressibilidade e Resistência ao Cisalhamento dos Solos de uma Voçoroca em Ouro Preto - MG**, 2000. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FREDLUND, D. G. Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 16, n. 1, p. 121–139, 1979. Canadian Science Publishing. Disponível em: <<http://10.0.4.115/t79-011>>. .

FREDLUND, D. G.; KRAHN, J. Comparison of Slope Stability Methods of Analysis. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 14, n. 3, p. 429–439, 1977.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of The Geotechnical Engineering Division**, , n. 103, p. 447–466, 1977.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 15, n. 3, p. 313–321, 1978.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2012.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; GAN, J. K.-M. Non-linearity of strength envelope for unsaturated soils. 6th International Conference on expansive soils. **Anais...** . p.49–54, 1987. New Delhi.

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

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 533–546, 1994. Canadian Science Publishing. Disponível em: <<http://10.0.4.115/t94-062>>. .

FREDLUND, M. D.; FREDLUND, D. G.; WILSON, G. W. An equation to represent grain-size distribution. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 4, p. 817–827, 2000. Canadian Science Publishing. Disponível em: <<http://10.0.4.115/t00-015>>. .

FREITAS NETO, O. **Resistência ao Cisalhamento de um Solo Não Saturado com Medida Direta de Sucção**, 2008. Universidade de São Paulo. Disponível em:

<<https://dx.doi.org/10.11606/D.18.2008.tde-10102008-092325>>. .

FUTAI, M. M. **Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Solos Tropicais Não-Saturados: Aplicação a um Caso de Voçorocamento**, 2002. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S. An experimental investigation of the mechanical behaviour of an unsaturated gneiss residual soil. **Géotechnique**, v. 55, n. 3, p. 201–213, 2005. Thomas Telford Ltd. Disponível em: <<http://10.0.6.144/geot.2005.55.3.201>>. .

GANDOLFO, O. C. B. **Um Estudo Do Imageamento Geométrico na Investigação Rasa**, 2007. Universidade de São Paulo.

GARDNER, R. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. **Soil Science**, v. 43, n. 4, p. 277–283, 1937.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

GEOSTUDIO. **Heat and mass transfer modeling with geostudio**. Calgary, Alberta, Canada, 2020a.

GEOSTUDIO. **Stabilty Modeling with GeoStudio**. Calgary, Alberta, Canada, 2020b.

GITIRANA, G. DE F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 2, p. 209–212, 2004.

GOUDSWAARD, W. On the effect of the tank material in geoelectrical model experiments. **Geophysical Prospecting**, v. 5, n. 3, p. 272–281, 1957.

GRECO, V. R. Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 7, p. 517–525, 1996.

HUANG, H.-C.; TAN, Y.-C.; LIU, C.-W.; CHEN, C.-H. A novel hysteresis model in unsaturated soil. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 8, p. 1653–1665, 2005. Wiley. Disponível em: <<http://10.0.3.234/hyp.5594>>. .

JENNINGS, J. E. B.; BURLAND, J. B. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. **Geotechnique**, v. 12, n. 2, p. 125–144, 1962.

JONG VAN LIER, Q. **Física do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciencia do solo,

2010.

KALINSKI, R. J.; KELLY, W. E. Estimating Water Content of Soils from Electrical Resistivity. **Geotechnical Testing Journal**, v. 16, n. 3, p. 323–329, 1993.

KRAHN, J. The 2001 R.M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 40, n. 3, p. 643–660, 2003.

KRAHN, J.; FREDLUND, D. G. On total, matric and osmotic suction. **Soil Science**, v. 114, n. 5, p. 339–348, 1972.

LACERDA, W. A. Shear strength of soils derived from the weathering of granite and gneiss in Brazil. **Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications**, v. 23, n. 1, p. 167–182, 2010.

LEONG, E. C.; HE, L.; RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, n. 3, p. 322–333, 2002.

LONG, M.; DONOHUE, S.; L'HEUREUX, J.-S.; et al. Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 49, n. 10, p. 1158–1168, 2012. Canadian Science Publishing. Disponível em: <<http://10.0.4.115/t2012-080>>. .

LÓPEZ-SÁNCHEZ, M.; MANSILLA-PLAZA, L.; SÁNCHEZ-DE-LAORDEN, M. Geometric factor and influence of sensors in the establishment of a resistivity-moisture relation in soil samples. **Journal of Applied Geophysics**, v. 145, p. 1–11, 2017. Elsevier BV. Disponível em: <<http://10.0.3.248/j.jappgeo.2017.07.011>>. .

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated Soil Mechanics**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2004.

LUCAS, J. F. R.; TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L.; CÁSSARO, F. A. M. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 6, p. 1967–1973, 2011.

MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M. The filter paper method revisited. **Geotechnical Testing Journal**, v. 29, n. 3, p. 250–258, 2006.

MARTINHO, E.; ALMEIDA, F.; SENOS MATIAS, M. J. An experimental study of organic pollutant effects on time domain induced polarization measurements. **Journal of Applied**

**Geophysics**, v. 60, n. 1, p. 27–40, 2006. Elsevier BV. Disponível em: <<http://10.0.3.248/j.jappgeo.2005.11.003>>. .

MENEZES, L. P. **Determinação da curva de retenção de água em solos utilizando a bomba de fluxo**, 2013. Universidade Federal de Ouro Preto.

MONTEITH, J. L. Evaporation and Environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205–234, 1965.

MORAIS, F.; BACELLAR, L. A. P.; SOBREIRA, F. G. Análise da erodibilidade de saprolitos de gnaiss. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 1055–1062, 2004. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://10.0.6.54/s0100-06832004000600014>>. .

MORAIS, F.; BACELLAR, L. DE A. P.; SOBREIRA, F. G. Avaliação da Susceptibilidade de Solos Gnaissicos à Erosão Subsuperficial. **Sociedade & natureza**, v. 19, n. 2, p. 233–241, 2007.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The Analisis of the Stability General Slip Surfaces. **Geotechnique**, v. 15, n. 1, p. 79–93, 1965.

PACHECO, A. DE O. **Ensaio com Cone Resistivo em Solos Saturados**, 2004. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PEIXOTO, A. S. P.; YAMASAKI, M. T.; CONTE JUNIOR, F. Development of an electrical resistivity measure for geotechnical and geoenviromental characterization. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. **Anais...** . p.63–70, 2010. Huntington Beach, California.

PENMAN, H. L. Natural Evaporation From Open Water, Bare Soil and Grass. **Proceedings of the royal society A**, v. 193, n. 1032, p. 120–145, 1948.

POZDNYAKOV, A. I.; POZDNYAKOVA, L. A.; KARPACHEVSKII, L. O. Relationship between water tension and electrical resistivity in soils. **Eurasian Soil Science**, v. 39, n. S1, p. S78–S83, 2006.

POZDNYAKOVA, L. **Electrical properties of soils**, 1999. University of Wyoming.

RAHARDJO, H.; LEE, T. T.; LEONG, E. C.; REZAUR, R. B. Response of a residual soil slope to rainfall. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 42, n. 2, p. 340–351, 2005.

RHOADES, J. D.; KADDAH, M. T.; HALVORSON, A. D.; PRATHER, R. J. Establishing

Soil Electrical Conductivity-Salinity Calibrations Using Four-Electrode Cells Containing Undisturbed Soil Cores. **Soil science**, v. 123, n. 3, p. 137–141, 1977.

RIDLEY, A. M.; BURLAND, J. B. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. **Geotechnique**, v. 43, n. 2, p. 321–324, 1993.

ROLIM, G. DE S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 133–137, 1998.

RÜCKER, C.; GÜNTHER, T. The simulation of finite ERT electrodes using the complete electrode model. **Geophysics**, v. 76, n. 4, p. F227–F238, 2011.

SALAROLI, I. S. **Mapeamento litoestrutural da região de Santo Antônio do Leite, Ouro Preto**. Ouro Preto, MG, 1999.

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173–193, 2005.

SANTOS, C. A. DOS; SOBREIRA, F. G.; COELHO NETO, A. L. Comportamento hidrológico superficial e erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto - MG. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 55, n. 4, p. 285–290, 2002.

SEKI, K. SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 4, n. 1, p. 407–437, 2007.

SILVA, T. R. M. **Caracterização e Erodibilidade dos Solos de uma Voçoroca na Região de Ouro Preto, Minas Gerais**, 2000. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach Toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

VARGAS, M. “Characterization, Identification and Classification of Tropical Soils”. II International Conference on Geomechanics of Tropical Soils. **Anais...**, 1988. Singapore.

DE VITA, P.; DI MAIO, R.; PIEGARI, E. A study of the correlation between electrical resistivity and matric suction for unsaturated ash-fall pyroclastic soils in the Campania region (southern Italy). **Environmental Earth Sciences**, v. 67, n. 3, p. 787–798, 2012.

WEEMEES, I. A. **Development of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies**, 1990. University of British Columbia. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.14288/1.0062547>>. .

WILSON, G. W. **Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems**, 1990. University of Saskatchewan.

WILSON, G. W.; FREDLUND, D. G.; BARBOUR, S. L. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 34, n. 1, p. 145–155, 1997.

ZHANG, F.; FREDLUND, D. G.; WARD WILSON, G. Water Permeability Function for Soils that Undergo Volume Change as Suction Changes. **Indian Geotechnical Journal**, v. 46, n. 3, p. 210–227, 2016. Springer India.

## ANEXO 1

### Resistividade Horizonte B

Anel	Resistividade			Teor de umidade
	(R1)	Resistividade Media (k=0.0628)	% de variação	Teor de umidade Volumetrico
30	61690	3826.88	3.960229188	0.434
	59340			
	61690			
34	33600	2110.94	0.567164179	0.498
	33690			
	33500			
36	61730	3949.4	3.353312814	0.449
	63800			
	63040			
33	72190	4556.15	0.748026042	0.451
	72620			
	72730			
21	50430	3050.91	5.923125394	0.406
	47630			
	47610			
40	73730	4581.91	1.851084404	0.329
	72390			
	72650			
32	74310	4692.7	1.873820437	0.333
	74180			
	75570			
10	70880	4458.55	0.19751693	0.333
	70980			
	71020			
22	72460	4580.65	1.090256693	0.352
	73000			
	73250			
37	101800	6477.96	2.161100196	0.249
	103500			
	104000			
27	81720	5099.85	1.755696675	0.269
	81470			

	80310			
31	70910	4432.79	0.7960199	0.261
	70350			
	70390			
35	154400	9531.59	5.248807089	0.136
	146700			
	154000			
28	98110	5168.97	46.62980123	0.143
	81780			
	66910			
28A	64630	3994.43	4.613143412	0.226
	64310			
	61780			
34A	100000	6194.59	2.522042239	0.219
	97540			
	98230			



Resistividade Horizonte C

Anel	Resistividade			Teor de umidade
	(R1)	Resistividade Media (k=0.0628)	% de variação	Teor de umidade volumetrico
4	18080	1135.79	0.055340343	0.479
	18070			
	18080			
20	18660	1166.58	0.974025974	0.526
	18560			
	18480			
1	32030	2077.64	5.276303466	0.439
	33720			
	33450			
6	39060	2449.19	0.30816641	0.454
	38940			
	38940			
7	44000	2767.32	0.227272727	0.344
	44030			
	44100			
8	44560	2801.25	0.089766607	0.365
	44590			
	44600			
9	55680	3508.74	0.700431034	0.318
	55780			
	56070			
11	69130	4368.49	1.099377984	0.292
	69890			
	69560			
13	103800	6553.36	1.05973025	0.248
	104200			
	104900			
15	109200	6871.71	0.274725275	0.263
	109400			
	109500			
23	134800	8614.25	6.497386109	0.121
	133900			
	142600			
14	299000	19316.61	6.18729097	0.109
	317500			
	305800			

17	216100	14063.86	7.450254512	0.124
	223200			
	232200			
12	113200	7118.85	0.619469027	0.175
	113000			
	113700			
16	126900	7923.1	1.035031847	0.165
	125600			
	125800			
4A	105400	6622.48	0.189933523	0.187
	105300			
	105500			
6A	87030	5471.4	0.31045188	0.218
	87240			
	86970			

## ANEXO 2

Dados dos fatores climáticos utilizados na simulação de interação solo – atmosfera.

Data	Insolação (hr)	Umidade	Velocidade do vento (m/s)	Temp. Max. (°C)	Temp. Min. (°C)
1/10/2018	5.402897835	0.737047806	0.885853529	29.39498711	18.85108757
2/10/2018	7.596648216	0.614816132	0.749973536	30.68187141	18.96045685
3/10/2018	9.678408623	0.558148842	1.156507492	32.1521225	20.01088905
4/10/2018	6.360557556	0.590638657	1.175059676	32.610569	20.99551201
5/10/2018	4.926340103	0.672898254	2.035264015	31	20.31778717
6/10/2018	0.438714504	0.739242249	1.755502462	25.15638733	19.66777039
7/10/2018	1.762846589	0.74444397	1.354510307	24.46278572	18.15497589
8/10/2018	7.190921783	0.597878189	1.554867983	29.71707153	18.31030655
9/10/2018	3.938984394	0.601636086	1.230322123	29.45343208	19.41113853
10/10/2018	4.056098938	0.62	1.580102444	32.55387878	21.13942909
11/10/2018	3.528427601	0.64952179	1.600514054	30.67650223	21.9153347
12/10/2018	1.366850615	0.668653412	1.583417058	27.32529449	21.04826164
13/10/2018	10.0879631	0.558368835	0.834975064	33.79689026	20.10790634
14/10/2018	5.884028912	0.605165558	1.341286659	32.61239624	20.29606247
15/10/2018	1.224364042	0.811687317	0.904060066	27.97523689	20.45343208
16/10/2018	6.727479935	0.705868835	1.510737419	27.79754639	19.57782745
17/10/2018	0.820487797	0.716385422	1.135633469	28.20843124	20.73295212
18/10/2018	2.607566118	0.846226807	0.740865767	28.15085793	18.58756638
19/10/2018	1.781372547	0.7	0.987922907	28.22034073	18.47816277
20/10/2018	4.289818287	0.581862755	2.55261445	26.43375969	18.26520348
21/10/2018	6.56887722	0.679879303	2.167957067	24.5463295	14.89930344
22/10/2018	8	0.6	1.559455872	27.48565674	15.11833286
23/10/2018	10.89068604	0.544494629	1.667523503	28	16.37511253
24/10/2018	5.604252338	0.693845444	1.360633731	30.05957603	18.93103218
25/10/2018	0.258536935	0.844897003	1.092405558	25.03230286	18.22344971
26/10/2018	4.481988907	0.769035721	1.373615861	28.72317123	19.06810379
27/10/2018	4.856292248	0.843066711	1.351290226	29.54547501	19.41679382
28/10/2018	5.538629055	0.8	1.277161121	28.47962952	19.12405968
29/10/2018	0.665850043	0.77	1.646620274	23.83446121	17.96166229
30/10/2018	5.045068264	0.748077927	1.216519833	28.04121399	17.12248611
31/10/2018	6.849481106	0.656883392	1.532166958	29.56388664	18.68947029
1/11/2018	5.679061413	0.748641052	2.161486864	31.07191467	18.98426437
2/11/2018	5.300294876	0.616977272	1.22741878	29.85374832	18.73715019
3/11/2018	9.078976631	0.569318199	1.463639021	31.13989449	20.42158127

4/11/2018	2.438399553	0.715864639	1.13425982	28.8726635	20.74661636
5/11/2018	0	0.777234344	1.607991457	23.50964165	18.85629272
6/11/2018	2.102538347	0.7	1.089184642	25.60970306	17.52083206
7/11/2018	4.021233082	0.650018158	1.539260149	26.96931839	18.66807747
8/11/2018	0	0.887390366	2.268293381	23.21529007	16.04328918
9/11/2018	0	0.892272644	1.701957345	18.80940247	15.09232807
10/11/2018	0.981719315	0.8	1.567503214	22.89276886	16.88031769
11/11/2018	6.409632683	0.699676437	1.638974428	27.28032303	16.34153366
12/11/2018	7.837706089	0.660918579	1.583423615	29.23584557	18.87405586
13/11/2018	8.931948662	0.645751877	1.70929718	30.25108337	19.96876907
14/11/2018	7.1	0.623290138	1.5	31.30927849	20.49521637
15/11/2018	5.672490597	0.753151703	1.325091481	30.39151192	19.66099739
16/11/2018	1.991238952	0.760928726	1.781704068	28.68709373	19.81893349
17/11/2018	5.508697033	0.649357834	1.275157332	27.56615448	19.98788071
18/11/2018	7.663311958	0.7	1.274108768	28.5157547	19.85702705
19/11/2018	0.417229205	0.845368805	0.833490789	25.61877823	19.36028671
20/11/2018	0	0.902155609	1.307718873	23.06028557	18.00673866
21/11/2018	0	0.86309227	1.822825313	20.86893463	17
22/11/2018	2.363331079	0.79	1.701407671	25.12629128	16.51709366
23/11/2018	3.385598183	0.69457283	1.443398356	26.8776722	18.36260605
24/11/2018	0.646010041	0.657908173	1.2	25.21368408	18.44799805
25/11/2018	0.987342834	0.790451279	0.90177393	24.87681389	18.36707115
26/11/2018	9.640235901	0.60433239	1.924060702	27.90046501	17.0775688
27/11/2018	10.44213581	0.573913689	1.806964874	27.85103226	17.61940765
28/11/2018	10.01774788	0.577061615	0.994982243	28.65180588	18.09477615
29/11/2018	9.58331871	0.564451141	1.425981402	29.49988747	17.93273354
30/11/2018	8.187421799	0.618116531	1.312979102	31.05002975	19.13539124
1/12/2018	0	0.888463593	1.140146255	25.00266647	19.28217125
2/12/2018	1.506874084	0.852024536	1.625406027	27.1159935	19.44336128
3/12/2018	0.175206542	0.827342148	1.53531456	23.77599907	18.04239273
4/12/2018	7.103086948	0.709340973	1.364513993	28.12057304	19
5/12/2018	8.443704605	0.648605957	1.106214643	31.38236046	18.68815994
6/12/2018	7.182032108	0.726466293	1.456085563	31.37814522	18.87882996
7/12/2018	2.573941708	0.785552826	1.207067609	27.54878044	18.64240074
8/12/2018	8.249898911	0.75	1.716012836	25.86728096	17.76109123
9/12/2018	5.68266058	0.700603104	1.573729753	23.2381382	14.92859745
10/12/2018	8.130271912	0.67812706	1.167093754	26.66499138	15.919384
11/12/2018	8.932130814	0.643427734	1.127434254	28.38415909	17.59258652
12/12/2018	10.19548702	0.610070572	1.707220435	30.64065742	18.89477348
13/12/2018	7.193440437	0.55	1.07821393	30.80567169	19.71167755
14/12/2018	10.2062006	0.509481087	0.922880113	31	19.16972733
15/12/2018	11.18289661	0.5	1.153290391	32.15608597	20.81343842
16/12/2018	10.32178879	0.519239502	1.716952443	31.69109344	21.65974617
17/12/2018	10.69077873	0.544593773	1.563416362	30.91276169	20.31114197
18/12/2018	9.562101364	0.555255508	1.261198878	32.94070435	20.41248512
19/12/2018	9	0.569638748	1.126189828	32.91156769	22.06566238

20/12/2018	8.767169952	0.568975563	1.28653872	33.60454941	21.92603302
21/12/2018	7.315856934	0.68	0.651431024	33.06816864	22.20661736
22/12/2018	6.83537817	0.728745117	0.634650409	32.6507988	19.12450409
23/12/2018	6.805109501	0.634653206	1.255072594	32.82305145	19.69530487
24/12/2018	4.12886095	0.751803207	1.614853978	32.24114609	19.16073227
25/12/2018	5.727561951	0.676028595	1.426288247	29.91036034	18.71172142
26/12/2018	1.627321005	0.816226044	0.995291889	27.40115929	19.729002
27/12/2018	0	0.884457245	0.704320848	24.44620514	19.15039063
28/12/2018	0.87173003	0.874747696	0.813762188	25.55907249	18.68136215
29/12/2018	2.246972084	0.885439072	0.833763599	26.22930717	17.43202972
30/12/2018	4.841897964	0.798996735	0.867882788	28.12466049	18.33195305
31/12/2018	2.770305157	0.840765457	0.822856903	26.12731361	18.91529274
1/1/2019	5.239641666	0.857260742	0.680439115	28.45025063	18.68316841
2/1/2019	8.19685936	0.668904648	0.561996937	30.46638489	19.44030952
3/1/2019	3.583191872	0.649676437	1.069740176	31.32212257	20.67285919
4/1/2019	2.30560565	0.724635391	1.075308561	27.41087532	18.98405075
5/1/2019	9	0.617853966	1.012075424	30.26726723	19.04799271
6/1/2019	10.79573154	0.545702171	1.637519121	32.01509476	20.24158478
7/1/2019	10.39728451	0.584364777	1.37773478	31.43575096	21.34182358
8/1/2019	9.847502708	0.660033035	1.513647676	30.08265877	20.34807968
9/1/2019	10.32850742	0.549388275	1.172734737	29.502285	20.16501236
10/1/2019	11	0.52	1.501292825	29.80504417	19.77637291
11/1/2019	8.097350121	0.53	0.948529541	30.18507385	20.3020401
12/1/2019	9	0.563164482	0.956371307	30.7334671	20.68078804
13/1/2019	10.02016068	0.575555191	1.186198473	30.98459244	20.16981888
14/1/2019	10.53824329	0.550188751	1.874631763	31.30568886	19.99131203
15/1/2019	9.957302094	0.554708786	1.300069332	32.28720093	20.72296715
16/1/2019	7.817877769	0.579439392	0.923540294	32.86362457	21.74862289
17/1/2019	8.604483604	0.595465698	1.348312974	32.782444	21.30575562
18/1/2019	9.890686035	0.53	1.231538415	32.46170425	21.45122528
19/1/2019	10.33858776	0.470873413	1.671530604	32.39066696	21.47710609
20/1/2019	7.254533768	0.672566986	1.392995715	33.16236496	21.01271057
21/1/2019	8.032416344	0.622265167	1.489866972	31.63253403	21.24541664
22/1/2019	8.776646614	0.57	1.639284015	32.42717361	21.92504692
23/1/2019	11.01196194	0.545148582	1.539849401	32	21.50829124
24/1/2019	11.65566063	0.565459175	1.529845715	31.91524696	20.57137871
25/1/2019	8.582747459	0.582215157	1.87553072	30	20.85095978
26/1/2019	5.708920002	0.663117676	1.6060853	29.11195946	20
27/1/2019	9.761435509	0.564967384	1.512535095	31.11200333	19.94034576
28/1/2019	10.52241898	0.554251518	1.327196121	32	20.71363831
29/1/2019	10.21844673	0.49557724	1.592521787	33.16461563	21.15100861
30/1/2019	10.07436466	0.488417702	1.611320376	33.1364212	21.19155312
31/1/2019	9.09590435	0.472845268	1.182082415	33	21.28515434
1/2/2019	11.24524975	0.470535164	1.570752621	32.8510704	21.97995186
2/2/2019	11.55054951	0.469517441	1.196202159	33.39547729	21.7690506
3/2/2019	9.318479538	0.471699486	1.665178895	32	22.12865448

4/2/2019	1.287415028	0.634618454	1.795487762	30.91851425	19.78709984
5/2/2019	6.942886829	0.699054031	1.485718012	30.45388603	19.63826561
6/2/2019	0.56380707	0.89351738	0.915301561	26.60144424	19.2718029
7/2/2019	0.882919371	0.870473099	0.846744418	24.40725327	18.97095108
8/2/2019	7.769859314	0.678520432	1.359498978	27	18.52548409
9/2/2019	9.239285469	0.651006088	1.650736332	30.83785629	19.60190773
10/2/2019	9.475515366	0.6	1.406873107	31.98604965	20.73792076
11/2/2019	8.339147568	0.609976692	0.975876689	31.35987663	21.10784721
12/2/2019	4	0.57149662	1.259751558	31.46035194	20.93948364
13/2/2019	3.7390728	0.787387466	1.679847121	29	18.86587334
14/2/2019	2.79619813	0.756341476	0.76464659	27.42425728	18.55167389
15/2/2019	1.044246078	0.849716797	1.101199746	26.0336895	19.23201942
16/2/2019	0.582182467	0.877694778	0.982613802	25.72862434	19.68583488
17/2/2019	2.117596865	0.87193924	0.996190786	26.77445984	18.82067871
18/2/2019	3	0.854187393	1.25774014	27.65513039	19.40566635
19/2/2019	5.604601383	0.75	0.758761823	29.26708221	19.38958359
20/2/2019	5.351183414	0.737977295	1.133839369	30.17945671	20.9335537
21/2/2019	2.156050682	0.810273743	0.849091887	27.11936569	19.13200951
22/2/2019	10.94496155	0.65	1.118536592	32.09273529	18.76904106
23/2/2019	10.5	0.563029175	1.164432883	33.67041016	19.5
24/2/2019	10.43031883	0.537004356	1.048834085	34.04456711	21.67616653
25/2/2019	9.340551376	0.538739624	1.201530457	34.77629852	21.61868286
26/2/2019	7.579415321	0.709747009	1.408638716	34.33367538	20.06844711
27/2/2019	6.405784607	0.626820602	1.095309258	29	19.4733448
28/2/2019	3.668027639	0.765875168	0.832311332	28.50615501	20.15308571
1/3/2019	4	0.75633255	0.804414511	30.14890671	19.26735687
2/3/2019	1.932072759	0.7	0.975317597	25.65673447	19
3/3/2019	8.38343811	0.665600891	1.582521796	29.48235321	19.50804329
4/3/2019	6.428133011	0.640112534	1.149753213	29.35140419	20.30143166
5/3/2019	6.982833385	0.659003983	1.017643809	30.47487068	20.0069046
6/3/2019	5.63324976	0.720505295	0.998854637	29.96093369	20.21346664
7/3/2019	8.398471832	0.634629211	1.649314046	31.18522835	20.29800606
8/3/2019	8.656671524	0.614658127	1.474534869	32.25958633	20.57468987
9/3/2019	9.616937637	0.604616241	0.538986206	32.70837021	21.51806068
10/3/2019	7.788725853	0.67	0.998194396	31.65689659	21.84730911
11/3/2019	3.747508287	0.730295334	1.17561233	29.05474091	19.77962112
12/3/2019	7.153480053	0.68	1.274181008	29.63602638	20.25952148
13/3/2019	6.891854763	0.7	1.067971587	30.8412056	21.24755859
14/3/2019	8.458127975	0.61875843	1.244176626	32.61223602	20.5
15/3/2019	8.303257942	0.655668869	0.724634945	32.27178574	20.12594604
16/3/2019	4.199765205	0.739337006	1.12708509	30.14768982	20.56980324
17/3/2019	0.42200315	0.82124733	1.017650366	26.59566879	20.73002052
18/3/2019	6.747531891	0.790268631	1.170656562	31.3499794	20.17878151
19/3/2019	5.081192017	0.676397095	1.359525323	31	20.77766418
20/3/2019	5.2811656	0.732995148	0.868510008	29.5992775	20.90844154
21/3/2019	0.324379712	0.830833664	1.643615484	26.31846428	19.04904938

22/3/2019	0	0.853489227	1.451137185	22.01380539	17.58594131
23/3/2019	3.251028061	0.694742737	1.060560703	26.03172112	16.61979866
24/3/2019	2.968705893	0.73308403	0.950541019	27.76834297	19.07138443
25/3/2019	8.430857658	0.639592323	1.548084378	29.49349785	17.72463989
26/3/2019	6.295477867	0.585962906	1.652193904	29.89069939	18.96398544
27/3/2019	6.976495743	0.615368118	1.203537703	29.97651863	18.55786705
28/3/2019	7.198046207	0.616278152	1.602749467	28.31133652	17.66234016
29/3/2019	5.89050436	0.68939682	1.334754825	27.44311523	17.66810608
30/3/2019	6.900537491	0.66114769	0.701973379	27.80041122	17.07306862
31/3/2019	7.15199852	0.639179497	0.573422968	29.38246536	17.41064835
1/4/2019	7	0.724330292	1.087416887	28.75818825	19.27152443
2/4/2019	5.662430286	0.693605423	0.631084859	28.60645294	18.37546539
3/4/2019	4.430136204	0.787110062	0.907313049	27.99520874	18.5
4/4/2019	4.7	0.650059509	0.832867622	28	18.98826218
5/4/2019	4.5	0.731441345	0.708753169	30.70957947	20.54524803
6/4/2019	4.849493027	0.744777298	0.584881723	29.86535072	20.92814636
7/4/2019	8.017098427	0.672910309	0.911429107	30.58743095	20.47577858
8/4/2019	7.40683651	0.731284409	1.619279623	30.12157822	19
9/4/2019	3.696315527	0.739009094	1.269479394	28.29258919	18.58567047
10/4/2019	4.354498863	0.686235275	1.41539526	27.79763985	18.84587097
11/4/2019	7.100854397	0.68	0.930876374	29.12057304	18.26646042
12/4/2019	6.484831333	0.684298172	1.216519833	28.68546104	19.23086166
13/4/2019	7.148311138	0.688259354	1.57130599	29.2753315	19.88562393
14/4/2019	1.998158574	0.772690353	1.146193385	27.89094162	20.38198471
15/4/2019	2.14575839	0.805307236	0.793195724	27.18323898	20.23797607
16/4/2019	2.122332096	0.828940659	1.317719579	26.66262436	19.20616913
17/4/2019	2	0.855085678	1.031769991	25.66565895	18.49905396
18/4/2019	8.359457016	0.643979874	0.784067571	28.85658646	19.4093399
19/4/2019	9.181159019	0.6	1	29.28201103	16.88994217
20/4/2019	9.25561142	0.590173225	0.890871346	30.38729095	17
21/4/2019	2	0.657035217	0.693763852	30.83394623	18.14795303
22/4/2019	6.480356216	0.659676437	0.989437222	29.39688873	20.01926422
23/4/2019	8.963545799	0.660059509	1.182425022	29.39761162	19.26608276
24/4/2019	7.665060997	0.680697021	1.572514653	28.28218651	19.84210777
25/4/2019	3.012210608	0.711634064	0.706981719	27.41584778	19
26/4/2019	8.858137131	0.66	1.12030232	28.80166817	18.56506348
27/4/2019	8.398815155	0.669517899	1.27740109	29.24238777	19.2665329
28/4/2019	8.1	0.647630768	0.960301816	29	18.2165966
29/4/2019	8.04050827	0.685230713	1.040625453	29.00637436	18.89068604
30/4/2019	6.514678001	0.669888077	1.217415094	27.7765255	18.34940338
1/5/2019	7.748704433	0.8	0.59754622	28.87225533	19.00609589
2/5/2019	2.094571829	0.850364456	0.999098241	28.03615761	19.62904167
3/5/2019	5	0.76	1.22741878	27.95540237	18.66122246
4/5/2019	5.881724358	0.713117676	1.221531153	28.43494225	19.5867424
5/5/2019	7.661672592	0.678583984	1.538976789	27.14580345	19.37414551
6/5/2019	7.827524662	0.66	0.811438024	28.62297249	18.3404274

7/5/2019	8.290604591	0.651880722	1.217385888	30.26138496	18.14860916
8/5/2019	2.725952625	0.79284584	1.234208822	26.36660385	19.01511765
9/5/2019	2.060286283	0.765779953	1.280651212	24.30640793	16.79224396
10/5/2019	3.524425268	0.743175507	1.245628119	26.23879623	16.66291618
11/5/2019	5.444153786	0.722115784	0.874084949	25.63780785	16.80382729
12/5/2019	8.772287369	0.698219604	0.866004825	29.52644157	16.67846298
13/5/2019	7.47954607	0.645343018	1.056173921	29.5342617	17
14/5/2019	6.765368462	0.693738708	0.535766125	27	19.11763573
15/5/2019	1.906096697	0.812998657	1.703970432	26.99114227	18.01537704
16/5/2019	0.718456864	0.810399246	1.199421644	23.40414238	17.20266724
17/5/2019	0	0.828577957	1.362163544	20.75336075	16.35571098
18/5/2019	3.583590269	0.780694885	0.964971364	24.26669884	16.42910004
19/5/2019	7.493968487	0.733179398	1.182082415	25.04922676	15.69809341
20/5/2019	8.565336227	0.637125168	1.314186096	27.98983192	15.44874191
21/5/2019	8.787958145	0.609273758	0.823760033	28.59485435	15.4291172
22/5/2019	8.690121651	0.61704258	1.351533055	28.98231888	15.96380901
23/5/2019	8.8	0.597001572	1.037650943	29.17708015	16.50238037
24/5/2019	7.403881073	0.63242382	0.790534794	28.88729668	16.81720352
25/5/2019	8.206380844	0.657541809	1.422485709	27.34284401	16.5
26/5/2019	8.545841217	0.608648567	1.057967901	27.95643806	16
27/5/2019	8.502367973	0.700287018	1.18388021	28.04466629	16.5514679
28/5/2019	8.42360878	0.659070282	1.206757784	28.58996964	16.34638596
29/5/2019	8.558580399	0.631777878	0.780531228	29.35796928	17.05362511
30/5/2019	8.632543564	0.650699997	1.255971551	27.17491341	17.65586472
31/5/2019	9	0.609956779	1.16209197	29.02027512	17
1/6/2019	8.996604919	0.558901825	0.503094375	30.2592411	16.92770195
2/6/2019	8.749026299	0.641693497	1.142074466	30.1581707	16.65520477
3/6/2019	8.586210251	0.715748291	1.668429017	28.95139313	16.10039139
4/6/2019	6.8	0.664792709	1.709616303	25.04578972	14.53181744
5/6/2019	8.436841965	0.643210144	1.414532065	22.49669266	9.75448513
6/6/2019	7.386432648	0.631623039	1.819634438	21.99765778	11.96999359
7/6/2019	8.436695099	0.619091225	1.080293536	24.04467583	11.98077583
8/6/2019	6.201721668	0.643367004	1.194746971	24.76254463	11.7
9/6/2019	8.753893852	0.639236183	1.419511318	24.11182594	11.59434319
10/6/2019	7.925933361	0.708636169	2.058485746	24.17321587	13.08806896
11/6/2019	7.26856041	0.727278671	1.23007977	24.65596771	14.96095085
12/6/2019	6.410812378	0.722024841	1.758749604	24.54298592	16.14113045
13/6/2019	8.273509026	0.705568542	1.272755027	25.58714294	16.07573128
14/6/2019	8.517834663	0.611069069	1.348312974	26.60328865	15.45316982
15/6/2019	6.587835312	0.6	1.31276381	25.46038818	15.8606348
16/6/2019	5.294229031	0.639258575	1.415974975	26.24962616	14
17/6/2019	5.77112484	0.63624836	1.184743404	23.8417778	13.74281311
18/6/2019	6.460253239	0.629780922	1.07942462	25.27044487	14.64611053
19/6/2019	6.217476368	0.581596375	1.08385694	26.00640297	15.6509161
20/6/2019	7.1	0.63	0.928146243	26.33415794	14.59537411
21/6/2019	6.157755852	0.673652191	1.732206941	23.95401382	13.97161579



22/6/2019	6.696407318	0.704140854	1.254203081	23.21643829	13.74633789
23/6/2019	6.052631855	0.709818954	1.451281309	23.54210281	14.62580776
24/6/2019	7.687901974	0.624210777	0.767866671	26.81169319	15.02794838
25/6/2019	7.26588583	0.688930435	1.180630922	27.57006836	14.92814636
26/6/2019	8.58788681	0.58	1.455403924	28.82348061	16.6161499
27/6/2019	5.341910839	0.601067238	1.11531651	27.88772964	17.04464722
28/6/2019	8.707233429	0.59	1.119189739	26.13672066	16.53885841
29/6/2019	7.775333881	0.650059509	0.797318339	25.00485039	15.16730404
30/6/2019	8.7315979	0.610861511	0.73197484	27.11919212	14.34448624
1/7/2019	8.609725952	0.62	0.767310321	27.96362495	14.84905338
2/7/2019	8.932971954	0.551200562	0.661092043	27.17085075	14.12192822
3/7/2019	7.797259808	0.5	1.14453733	28	14.90679264
4/7/2019	8.596780777	0.454142647	1	29.11704636	14.65486526
5/7/2019	5.739619732	0.51	1.613708496	28.24834251	17.31400681
6/7/2019	6	0.499995613	1.592808962	23.66881943	13.73566055
7/7/2019	6	0.55	1.495377779	22.93124962	9.844696999
8/7/2019	8.817734718	0.582894325	1.348312974	21.03257561	10.42987919
9/7/2019	8.161837578	0.616150513	1.871357322	22.12726212	11.47133255
10/7/2019	8.17	0.588577309	1.391854405	22.55238533	11.30593491
11/7/2019	9.1	0.558781395	0.681099296	25.44251633	10.86810589
12/7/2019	9.280724525	0.601681442	0.780531228	26.63656425	12.38251591
13/7/2019	9.212984085	0.523707542	0.794650912	27	12.93724918
14/7/2019	9.108251572	0.525040665	0.817319036	28.85548401	14.47558594
15/7/2019	8.737872124	0.498069611	0.810535491	29.39906883	15.84095192
16/7/2019	8.099071503	0.537255135	1.490706682	28.35596085	15.20725918
17/7/2019	7.532821655	0.642071381	2.428295612	21.97795105	14.48318386
18/7/2019	6.95853281	0.591153297	1.870171785	21.26072121	11.84967136
19/7/2019	7.004360199	0.62	1.661952257	20.81195259	11.71048546
20/7/2019	7.761864662	0.672376938	1.986266732	21.11745834	12.74906826
21/7/2019	6.484237194	0.663158264	2.9	22.90953255	14.1357317
22/7/2019	5.518199921	0.652420883	2.119986534	22.59863091	14.70873356
23/7/2019	8.492774963	0.63215519	1.396283984	24.78814888	14.48150826
24/7/2019	9.115493774	0.6	0.813202977	26.92574501	15.24675751
25/7/2019	8.597371101	0.653706512	1.515412569	25.50314331	14.55434513
26/7/2019	8.589323044	0.552375183	1.270647526	25.5	16.05978584
27/7/2019	8.886310577	0.57	0.90142554	25.62383652	13.98899841
28/7/2019	9.238129616	0.5	1.092961788	26.37747383	14.1318903
29/7/2019	8.172356606	0.556598816	1.37039578	25.44311523	14.93049145
30/7/2019	7.89393568	0.58	1.517181158	26.17757988	15.53881645
31/7/2019	8.840164185	0.53	1.025609612	28.21605301	15.44323444
1/8/2019	9.250636101	0.568410912	1.771080971	27.4156971	16
2/8/2019	9.118973732	0.450463524	1.107081413	30.43625641	16.04626846
3/8/2019	5.046586514	0.549286652	1.586927891	27.35577583	16.51230812
4/8/2019	3.43589139	0.71	2.307957411	22.56757164	15.60607624
5/8/2019	5.663568497	0.663534775	2.618195295	21.30071831	15
6/8/2019	1.112871289	0.682933655	2.373299599	21.19101334	14.78893757

7/8/2019	4.105696201	0.655439453	1.670187354	24.03824806	16.46138
8/8/2019	7.512349606	0.653823242	1.154739022	28.18767166	17.07113647
9/8/2019	9.402581215	0.568448029	1.745189071	28.56391525	17
10/8/2019	8.520479202	0.554726563	0.872557938	28.83599854	16.74186325
11/8/2019	8.703866005	0.501785469	1.091199636	29.68883896	17.10394096
12/8/2019	9.267302513	0.543398323	1.097976685	30	18.13775444
13/8/2019	9.20265007	0.51	1.690168262	30.6455574	15.37179375
14/8/2019	5.738140106	0.685722656	2.454157591	24.73929787	16.67364311
15/8/2019	8.570593834	0.59	1.517526627	23.7721405	13.15008831
16/8/2019	9.56625843	0.521012192	2.121504307	24.53162384	11.63055801
17/8/2019	9.774823189	0.451850586	0.984734952	24.62638283	11.39652157
18/8/2019	8.615686417	0.502154274	1.050631881	28.51688004	13.15679073
19/8/2019	7.869189739	0.473205757	1.478938103	30.42019081	15.61097717
20/8/2019	3.861893177	0.55	1.496859193	28	18.56092262
21/8/2019	6.542045116	0.623887253	1.308305144	27.79241943	17.57625198
22/8/2019	3.819141388	0.724538422	1.882284284	25.40609169	17.45343208
23/8/2019	2.523795366	0.757656631	1.626302004	23.67125511	16.01802444
24/8/2019	8.415248871	0.624681091	1.587089062	26.80150604	14.3077755
25/8/2019	8.758854866	0.59059761	1.996744275	25.47831917	14.86492062
26/8/2019	6.868692398	0.596115646	1.701960206	24.81319046	15.4069891
27/8/2019	6	0.603140526	1.58307457	26.42355537	15.3443594
28/8/2019	3.878699064	0.535951653	1.435423017	24.68917274	14.72663498
29/8/2019	6.5	0.5917416	2.030828953	23.67045784	13.8499136
30/8/2019	8.336009026	0.554245682	1.518632174	28.22712135	13.82215691
31/8/2019	9.177689552	0.485089302	0.823206604	30.65651703	15.77239323
1/9/2019	8.993825912	0.469467964	1.094759583	32.45456314	17.50263786
2/9/2019	6.987481117	0.526026344	1.117085099	30.89048576	18.58405304
3/9/2019	8.786673546	0.471738968	2.101405144	32.96567154	19.4881916
4/9/2019	8.727749825	0.429485779	1.038594484	32.9971962	19.94062424
5/9/2019	6.407722473	0.668404388	1.613947272	27.25596046	19.86575508
6/9/2019	4.282388687	0.670859985	2.559814215	27.5	17.51605606
7/9/2019	5.496409893	0.610397797	1.726083636	27.57631683	16.60884476
8/9/2019	7.841491222	0.625540085	2.065854788	26.25310326	16.97239113
9/9/2019	8.995466232	0.487729187	1.424839735	28.58132744	15.82478905
10/9/2019	8.704738617	0.448909988	1.139753222	32.91520309	16.82672119
11/9/2019	9.079619408	0.438527985	1.13	33.94063568	18.97111893
12/9/2019	9.202105522	0.404488068	1.122412801	35.15821457	19.00895309
13/9/2019	8.844391823	0.358598328	1.950605035	34.61185074	20.41878319
14/9/2019	2.470524549	0.568652763	1.855497122	29.88392258	19.27685165
15/9/2019	7.246906757	0.601583786	1.331872106	28.03376961	18.15596008
16/9/2019	8.453431129	0.568205338	1.413071156	29	18.65783119
17/9/2019	9.215938568	0.436924782	1.399533987	33.10692978	17.61397934
18/9/2019	9.277160645	0.371458054	1.248874068	34.13618851	19.67356682
19/9/2019	8.021019936	0.367062836	1.310728908	34.79322052	21.32275772
20/9/2019	8.233333588	0.490954056	1.583633184	34.29233933	21.49205208
21/9/2019	7.783762455	0.511661148	0.850307167	34.26864624	21.18467331

22/9/2019	6.591291428	0.669605179	1.884055614	29.23258209	20.43683434
23/9/2019	1.460114241	0.680769577	2.03722167	23.3417263	16.16463852
24/9/2019	6.997852325	0.559527092	2.107940912	27.21921921	14.35183907
25/9/2019	0	0.785216141	1.417187214	20.78775215	15.50230217
26/9/2019	0	0.918771133	0.829960108	18.63407135	15.87886524
27/9/2019	6.351139069	0.65	1.110055089	27.12678909	14.89671707
28/9/2019	4.36380434	0.693811874	1.549263835	26.67784691	16.95306969
29/9/2019	5.567423821	0.710327454	1.218624592	27.99151611	17.97528648
30/9/2019	8.191259384	0.6	1.368636608	28	17.67205811