



Marcela Strongylis

Relação Chuva vs. Umidade em Solos Não Saturados

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Vitor Nascimento Aguiar

Co-orientadores: Prof. Pedricto Rocha Filho

D.Sc. Mario Guilherme Garcia Nacinovic

Rio de Janeiro
Agosto de 2019



Marcela Strongylis

Relação Chuva vs. Umidade em Solos Não Saturados

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Vitor Nascimento Aguiar

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

D.Sc. Mario Guilherme Garcia Nacinovic

Co-Orientador

COPPETEC

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Willy Alvarenga Lacerda

Departamento de Engenharia Civil – UFRJ

Rio de Janeiro, 13 de agosto de 2019.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, da orientadora e da universidade.

Marcela Strongylis

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Católica de Petrópolis em 2015. Ingressou no mestrado em Geotecnia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2017, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia experimental aplicada a estabilidade de taludes.

Ficha Catalográfica

<p>Strongylis, Marcela</p> <p>Relação chuva vs. umidade em solos não saturados / Marcela Strongylis ; orientador: Vitor Nascimento Aguiar ; co-orientadores: Pedricto Rocha Filho, Mario Guilherme Garcia Nacinovic. – 2019. 159 f. : il. color. ; 30 cm</p> <p>Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019. Inclui bibliografia</p> <p>1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Solos não saturados. 3. Sucção mátrica. 4. Tensiômetro. 5. Sonda tipo TDR. I. Aguiar, Vitor Nascimento. II. Rocha Filho, Pedricto. III. Nacinovic, Mario Guilherme Garcia. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. V. Título.</p>

CDD: 624

Dedico essa dissertação
à minha família e a todos os moradores de áreas de risco.

Agradecimentos

À Deus pela oportunidade de uma nova vida após um período difícil. A experiência do mestrado me mostrou que nada é por acaso. Obrigada Pai pela Tua presença e por não me deixar desanimar.

Aos meus pais Márcia e Carlos, e à minha vó Léia. Obrigada pelo incentivo diário e pelo amor incondicional. Essa experiência só foi possível graças ao apoio familiar e financeiro de vocês.

À Verena e sua família por me acolherem em sua casa. Verena, seu carinho e incentivo constantes me tornaram uma pessoa mais forte. Obrigada por ter sido minha segunda mãe.

Ao meu orientador Vitor Aguiar por ter aceitado participar desse trabalho mesmo tardiamente, e por ter se comprometido a me auxiliar e a me orientar em um prazo tão curto. Obrigada por ter acreditado nesse projeto.

Ao meu co-orientador Pedricto Rocha Filho pela orientação, aprendizado, preocupação e paciência. Obrigada por ter acreditado no meu trabalho e na minha capacidade.

Ao meu co-orientador Mario Nacinovic por participar diretamente de todo o processo de montagem e calibração dos instrumentos e dos trabalhos de campo, e por me orientar em diversos momentos desse trabalho. Ter te conhecido nesse processo foi um grande presente! Obrigada por compartilhar esse sonho comigo.

Ao meu ex-professor Luiz Carlos Dias de Oliveira por ter me apresentado a esse projeto incrível e por ter me dado a oportunidade de trabalhar em prol da minha querida cidade, Petrópolis. Ao Igor por todas as ajudas concedidas.

Aos professores Claudio Mahler e Fernando Danziger, da COPPE/UFRJ, pelo aprendizado e apoio material. A todos os funcionários do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ por me acolherem com tamanha receptividade e por acreditarem nesse projeto.

Ao professor Willy Lacerda, da COPPE/UFRJ, grande inspiração e modelo de sabedoria e simplicidade. Conversar e aprender com o senhor é uma honra, sou extremamente grata pelo seu apoio e incentivo.

Aos colegas da COPPE/UFRJ Ricardo Gil, pelo fundamental auxílio na adaptação elétrica e eletrônica do datalogger, por ceder a seringa responsável pela calibração de tensões negativas e pelo auxílio na montagem da instrumentação em campo; Edgar, pela colaboração direta na saturação das pedras porosas; Sérgio Iorio “Serginho” pela calibração de pressões positivas do transdutor de pressão e pelos ensaios de permeabilidade; Helcio, que participou do desenvolvimento do tensiômetro imaginado pelo professor Mahler, pelas orientações concedidas; Luizão e Carlinhos, pelo auxílio nos ensaios de caracterização; e Mayara, pelas análises químicas do solo. A todos os demais técnicos da COPPE/UFRJ pelo apoio e acolhimento.

Ao Edson, Amaury e Josué, do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, pelo auxílio na realização dos ensaios de caracterização e pela obtenção das curvas de retenção do solo estudado.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, muito obrigada por todo o aprendizado. Aos funcionários da PUC-Rio, em especial à Rita e à Luana, obrigada por nos proporcionar um ambiente tão favorável aos estudos e por todos os auxílios concedidos ao longo dessa jornada. À PUC-Rio, pela Bolsa de Isenção de Mensalidade e, conseqüentemente, pela oportunidade de ter ingressado em seu programa de Mestrado, o primeiro na área de Geotecnia e um dos mais importantes do Brasil.

Ao Marcelo Balisteri, da CETUC/PUC-Rio, e à engenheira Vanessa Faustino, grande amiga e conhecedora de programação, pela orientação no que se refere ao protocolo FTP para possibilitar o envio automático dos dados obtidos em campo via internet.

Aos colegas da HOBECO Antônio Nascimento, Damião e Luiz Antônio pela disponibilidade e auxílio na montagem e programação da estação meteorológica.

Ao Sr. Afonso de Resende Chaves, da FASE/FMP, por nos autorizar a instalação da estação meteorológica nos fundos da sua Faculdade. Ao engenheiro Caike Souza por auxiliar em toda mobilização de campo e por ceder o apoio dos senhores Antônio, Sebastião, Josildo e Mário.

Aos colegas da Embrapa Solos pelas orientações e pelos anéis cedidos para coleta de solos. Ao Dr. Maurício Rizzato Coelho, pedólogo que se disponibilizou

em ir a campo para descrição do solo local e para indicação da melhor disposição dos instrumentos. Ao Dr. Wenceslau Geraldes Teixeira, pelas orientações e auxílios trocados.

Ao pessoal da Defesa Civil de Petrópolis, em especial ao Coronel Paulo Renato, pela atenção, pelos convites para participação de eventos da Defesa Civil na cidade, pelo apoio com informações e dados locais.

À minha turma de mestrado pelos dois anos e meio de intenso estudo e incentivo mútuo. Em especial aos amigos Rômulo, Gabi e Cristina, por terem se tornado meus grandes psicólogos, incentivadores e companheiros de vida, à Jéssica e aos amigos Celso “Celsito”, Erland e Kevin, da “máfia” peruana e boliviana, por serem tão queridos e sempre solícitos. À Ana Carolina pelo auxílio, sempre gentil, em solos não saturados. Todos vocês foram fundamentais para a concretização dessa etapa. Muito obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Strongylis, Marcela; Aguiar, Vitor Nascimento (Orientador); Rocha Filho, Pedricto (Co-orientador); Nacinovic, Mario Guilherme Garcia (Co-Orientador). **Relação chuva vs. umidade em solos não saturados**. Rio de Janeiro, 2019. 159 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O propósito do trabalho é avaliar a viabilidade técnica do uso de sondas tipo TDR e tensiômetros no monitoramento de encostas não saturadas. Com tais instrumentos, objetiva-se monitorar a variação da sucção mátrica e da umidade no solo em períodos chuvosos, visando aperfeiçoar os sistemas de alerta usados em áreas de risco e, conseqüentemente, minimizar perdas materiais e humanas. Para as medições, foram instalados uma estação meteorológica (munida de um pluviômetro, um *datalogger*, uma placa solar e uma antena para a transmissão de dados via internet), quatro sensores de umidade tipo TDR e um tensiômetro de alta capacidade em uma encosta localizada a montante da Faculdade de Medicina de Petrópolis, cidade da região serrana do estado do Rio de Janeiro. Foram registrados cerca de três meses de dados das sondas tipo TDR e, por conta de uma pane elétrica, apenas treze dias de dados do tensiômetro. As sondas tipo TDR apresentaram tempos de resposta rápidos, com nítidos aumentos de umidade volumétrica com o início de um evento chuvoso. Elas também apresentaram sensibilidade adequada para serem utilizadas em sistemas de alerta, sendo capazes de registrar alterações de umidade volumétrica com pequenos volumes de chuva. As curvas características encontradas através de ensaios de papel filtro mostraram um bom paralelo entre as sucções medidas diretamente pelo tensiômetro e aquelas obtidas indiretamente pelas sondas tipo TDR, através da conversão das umidades volumétricas em sucção.

Palavras-chave

Solos não saturados; sucção mátrica; tensiômetro; sonda tipo TDR.

Abstract

Strongylis, Marcela; Aguiar, Vitor Nascimento (Advisor); Rocha Filho, Pedricto (Co-advisor); Nacinovic, Mario Guilherme Garcia (Co-advisor). **Rain vs. moisture relationship in unsaturated soils.** Rio de Janeiro, 2019. 159 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The purpose of this work is to evaluate the technical feasibility of using TDR probes and tensiometers to monitor unsaturated slopes. The objective is to monitor with these instruments the variation of matric suction and soil moisture during rainy periods, aiming to improve the warning systems used in hazardous areas and, consequently, to minimize human and material loss. For the measurements, a meteorological station (equipped with a rain gauge, a datalogger, a solar panel and an antenna for data transmission via internet), four TDR-type humidity sensors and a high capacity tensiometer were installed in a slope located in the University of Medicine of Petrópolis, city of the mountainous region of the state of Rio de Janeiro. Approximately three months of data were collected from the TDR probes and only thirteen days of tensiometer data due to a power outage. TDR-type probes showed fast response time, with clear increases in volumetric humidity with the beginning of a rainfall event. They also showed adequate sensitivity to be used in warning systems, being able to register changes in volumetric humidity with small precipitation amounts. The characteristic curves found by the filter method showed a good correlation with the suctions measured directly by the tensiometer and those obtained indirectly by the TDR probes, by converting the volumetric humidity into suction.

Keywords

Unsaturated soils; matric suction; tensiometer; TDR soil moisture sensor.

Sumário

1 Introdução	24
1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa	24
1.2. Objetivos	25
1.3. Etapas da pesquisa	26
1.4. Descrição da área de estudo	26
1.4.1. Localização	26
1.4.2. Clima	27
1.4.3. Relevo	27
1.4.4. Solo	28
1.5. Organização da dissertação	28
2 Revisão Bibliográfica	29
2.1. Solos não saturados	29
2.1.1. Tensão superficial ou interfacial (T_s)	30
2.1.2. Sucção mátrica	32
2.1.3. Curva característica	35
2.1.3.1. Modelo dos tubos capilares	35
2.1.3.2. Formatos típicos de uma curva característica	36
2.1.3.3. Histerese e o efeito “Ink-Bottle”	37
2.1.3.4. Modelos matemáticos para curva característica	39
2.1.4. Métodos para avaliação de sucção mátrica	47
2.1.4.1. Método do papel filtro	48
2.1.4.2. Tensiômetro	49
2.1.4.3. TDR (Time Domain Reflectometry)	53
2.2. Permeabilidade em solos não saturados	54
2.2.1. Modelos matemáticos para condutividade hidráulica não saturada	54
2.2.1.1. Modelo de Brooks & Corey (1964)	55
2.2.1.2. Modelo de van Genuchten (1980)	56
2.2.1.3. Modelo de Fredlund <i>et al.</i> (1994)	57
2.3. Sistemas de alerta de risco	58
3 Materiais e Métodos	62
3.1. Introdução	62
3.2. Adaptações, montagem e calibrações pré-instalação em campo	62
3.2.1. Datalogger	62

3.2.2. Tensiômetro	65
3.2.2.1. Calibração do transdutor de pressão	65
3.2.2.2. Saturação da pedra porosa	69
3.2.2.3. Montagem do tensiômetro	70
3.3. Instalação da instrumentação em campo	73
3.4. Coleta de amostras de solo em campo	76
3.5. Ensaio de caracterização	80
3.6. Ensaio de papel filtro: obtenção das curvas características	80
3.6.1. Ensaio de papel filtro nas amostras coletadas de 20 cm ³ de volume	80
3.6.2. Ensaio de papel filtro nas amostras coletadas de 100 cm ³ de volume	84
3.7. Ensaio de Permeabilidade	88
4 Resultados e discussões	91
4.1. Descrição do perfil	91
4.2. Análise físico-química dos horizontes do quarto patamar	95
4.3. Caracterização do solo	97
4.3.1. Segundo patamar	98
4.3.1.1. Análise granulométrica	98
4.3.1.2. Limites de Atterberg	98
4.3.1.3. Índices físicos	99
4.3.1.4. Classificação do solo	99
4.3.2. Quarto patamar – panorama geral	100
4.3.2.1. Análise granulométrica	100
4.3.2.2. Limites de Atterberg	101
4.3.2.3. Índices físicos	101
4.3.2.4. Classificação do solo	101
4.3.3. Quarto patamar – detalhamento por horizonte	102
4.4. Ensaio de permeabilidade	106
4.5. Ensaio de papel filtro	106
4.5.1. Segundo patamar	107
4.5.2. Quarto patamar	109
4.5.2.1. Primeiro ensaio (anel com volume de 20 cm ³)	109
4.5.2.2. Segundo ensaio (anel com volume de 100 cm ³)	111
4.6. Tensiômetro	115
4.6.1. Calibração	115
4.6.2. Dados da tensiometria	116
4.7. Resultados obtidos pelas sondas tipo TDR	119

4.7.1. Comportamento geral	120
4.7.2. Comportamento padrão de um dia sem chuva	124
4.7.3. Umidades máximas e mínimas alcançadas	124
4.7.4. Chuvas que mobilizam a Defesa Civil de Petrópolis	130
4.7.4.1. Chuvas isoladas sem acumulados: 50 mm em 1 hora	130
4.7.4.2. Chuvas com acumulado de 55 mm em 48 horas: 40 mm em 1 hora	130
4.7.4.3. Intervalo entre chuvas menor do que 24 horas: 10 mm em 15 minutos e 15 mm em 30 minutos	131
4.7.5. Problemas encontrados	147
 5 Conclusões e sugestões	 148
5.1. Conclusões	148
5.2. Sugestões para pesquisas futuras	150
 Referências bibliográficas	 151
 Anexo 1 – Análises físico-químicas dos horizontes do quarto patamar	 158

Lista de Figuras

Figura 1.1: Localização aproximada da área de estudo.	27
Figura 2.1: Membrana formada pela interface ar – água em um tubo capilar (Romanel, 2018).	31
Figura 2.2: Cunha de capilaridade formada pela interface ar – água em meios porosos não saturados (adaptado de Venkatramaiah, 2012).	32
Figura 2.3: Envoltória estendida de Mohr-Coulomb para solos não saturados (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993).	33
Figura 2.4: Projeção horizontal da envoltória de ruptura de um solo não saturado, em que se apresenta tensão cisalhante x tensão normal para diferentes sucções mátricas (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993).....	34
Figura 2.5: Curva característica de tubos capilares análogas ao meio poroso. ...	36
Figura 2.6: Curvas características de diferentes tipos de solo (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993).	37
Figura 2.7: Histerese em curva característica (adaptado de Lu & Likos, 2004)..	38
Figura 2.8: Efeito “ink-bottle” (adaptado de Lu & Likos, 2004).....	39
Figura 2.9: Localizações aproximadas dos parâmetros teor de umidade saturado (θ_s), pressão de entrada de ar (Ψ_b) e teor de umidade residual (θ_r) em uma curva característica típica (adaptado de Lu & Likos, 2004).....	41
Figura 2.10: O efeito da variação da pressão de entrada de ar (Ψ_b) em curvas modeladas pelo modelo de Brooks & Corey (1964), mantendo λ constante (adaptado de Lu & Likos, 2004).	42
Figura 2.11: O efeito da variação de λ em curvas modeladas pelo modelo de Brooks & Corey (1964), mantendo a pressão de entrada de ar (Ψ_b) constante (adaptado de Lu & Likos, 2004).	42
Figura 2.12: O efeito da variação de n em curvas modeladas pelo modelo de van Genuchten (1980), mantendo α constante (adaptado de Lu & Likos, 2004).	44
Figura 2.13: O efeito da variação de α em curvas modeladas pelo modelo de van Genuchten (1980), mantendo n constante (adaptado de Lu & Likos, 2004).	44
Figura 2.14: O efeito da variação de a em curvas modeladas pelo modelo de Fredlund & Xing (1994), mantendo n e m constantes (adaptado de Lu & Likos, 2004).	46

Figura 2.15: O efeito da variação de n em curvas modeladas pelo modelo de Fredlund & Xing (1994), mantendo a e m constantes (adaptado de Lu & Likos, 2004).	46
Figura 2.16: O efeito da variação de m em curvas modeladas pelo modelo de Fredlund & Xing (1994), mantendo a e n constantes (adaptado de Lu & Likos, 2004).	47
Figura 2.17: (a) Ensaio com o papel filtro em contato direto com a amostra de solo para medir a sucção mátrica; (b) Ensaio em que não há contato do papel filtro com a amostra, com o propósito de medir a sucção total (Nacinovic, 2009).	48
Figura 2.18: Desenho esquemático de um tensiômetro convencional (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993).	49
Figura 2.19: Detalhe de uma pedra porosa de 15 bar e de um corpo de material acrílico.	51
Figura 2.20: Características diferenciadas de um tensiômetro de alta capacidade (Mahler <i>et al.</i> , 2004).	52
Figura 2.21: Alguns modelos de TDR comercializados pela Campbell® Scientific.	53
Figura 2.22: Variação do coeficiente de permeabilidade com a umidade volumétrica em dois tipos de areia e em pó de ardósia (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993)	54
Figura 2.23: Condutividade hidráulica em função da sucção do solo para um tipo de areia usando o modelo de Brooks & Corey (1964) (adaptado de Lu & Likos, 2004).	55
Figura 2.24: Condutividade hidráulica relativa em função da sucção mátrica segundo o modelo de van Genuchten (1980) para parâmetros α , n e m pré-definidos (adaptado de Lu & Likos, 2004).	57
Figura 2.25: Instrumentação usada por Biansoongnern <i>et al.</i> (2016): a) Modo de instalação do sensor; b) Haste de aço inoxidável com o sensor que amplifica vibrações (adaptado de Biansoongnern <i>et al.</i> , 2016).	60
Figura 2.26: PCD usada pelo CEMADEN com pluviômetro e sensores de umidade do solo (CEMADEN, 2019).	61
Figura 3.1: Datalogger Vaisala® modelo MAWS 100.	63
Figura 3.2: Datalogger após as adaptações, contendo quatro saídas para a conexão de tensiômetro e quatro saídas para a conexão de TDRs.	63
Figura 3.3: TDR Campbell® modelo CS650.	64

Figura 3.4: Transdutor de pressão Ashcroft® modelo K1.....	65
Figura 3.5: Calibração do transdutor de pressão do tensiômetro para pressões positivas.....	66
Figura 3.6: Saturação do transdutor de pressão do tensiômetro com o auxílio de um pissete.....	67
Figura 3.7: Gráfico do resultado da calibração com colunas de mercúrio.	67
Figura 3.8: Seringa para calibração manual.....	68
Figura 3.9: Sistema de aplicação de pressões positivas e negativas através da seringa ao transdutor de pressão do tensiômetro.....	68
Figura 3.10: Gráfico do resultado da calibração do transdutor de pressão do tensiômetro realizada com a seringa.....	69
Figura 3.11: Saturação da pedra porosa do tensiômetro.	70
Figura 3.12: Esquema ilustrativo da saturação da pedra porosa do tensiômetro.	70
Figura 3.13: Rosqueamento do transdutor de pressão no corpo acrílico.....	71
Figura 3.14: Colocação do parafuso no canal cônico.....	72
Figura 3.15: Preparo do tensiômetro para o transporte para campo.	72
Figura 3.16: Poste já instalado com o datalogger, a antena e a placa solar.	73
Figura 3.17: Instalação do tensiômetro em campo.....	74
Figura 3.18: Localização dos instrumentos em campo.....	75
Figura 3.19: Modelo esquemático dos equipamentos instalados em campo.	75
Figura 3.20: Modelo esquemático do sistema de alerta idealizado.	76
Figura 3.21: Locais de coleta das amostras de solo.....	77
Figura 3.22: Retirada dos anéis do solo.....	77
Figura 3.23: Cravação do anel metálico no solo com um amostrador adequado.....	78
Figura 3.24: Momento após a cravação dos onze anéis metálicos.	79
Figura 3.25: Retirada dos excessos de solo da amostra indeformada.	79
Figura 3.26: Amostra vedada com as tampas de plástico.	79
Figura 3.27: Amostras secando ao ar para a determinação da umidade mínima.	81
Figura 3.28: Amostras colocadas dentro do recipiente preparado para determinação da umidade máxima.	81
Figura 3.29: Amostra com o papel filtro posicionado em suas extremidades.	82
Figura 3.30: Amostra pronta para o ensaio.	82
Figura 3.31: Umedecimento das amostras que representavam as maiores umidades volumétricas com uma pipeta eletrônica.	84

Figura 3.32: As amostras que precisavam perder umidade foram deixadas secando ao ar.	85
Figura 3.33: Colocação dos três papéis filtros nas extremidades da amostra.	85
Figura 3.34: Amostra envolvida com papel filme.	86
Figura 3.35: Amostra envolvida com papel alumínio, após a colocação do papel filme.	86
Figura 3.36: Amostra pronta para o ensaio.	86
Figura 3.37: Colocação dos papéis filtro no dessecador para evitar perda de umidade.	87
Figura 3.38: Pesagem do papel filtro envolto em plástico ziplock em uma balança com cúpula.	87
Figura 3.39: Papéis filtro organizados em uma travessa de vidro para secagem em estufa a 105°C.	88
Figura 3.40: Equipamento utilizado para a realização do ensaio de permeabilidade de carga constante.	88
Figura 3.41: Permeâmetro de parede rígida com uma amostra de solo indeformada.	89
Figura 3.42: Permeâmetros imersos em água para a saturação das amostras de solo.	89
Figura 3.43: Medição da vazão para a obtenção da permeabilidade.	90
Figura 4.1: Descrição do perfil do solo em campo.	92
Figura 4.2: Horizontes identificados no perfil de solo do quarto patamar.	92
Figura 4.3: Solos referentes a cada horizonte.	93
Figura 4.4: Presença de raízes muito finas no horizonte BA.	95
Figura 4.5: Presença de poros muito pequenos e pequenos no horizonte BA. ..	95
Figura 4.6: Curva granulométrica do segundo patamar.	98
Figura 4.7: Curva granulométrica do quarto patamar.	100
Figura 4.8: Curva granulométrica do horizonte A.	102
Figura 4.9: Curva granulométrica do horizonte BA.	103
Figura 4.10: Curva granulométrica do horizonte BI.	104
Figura 4.11: Curva granulométrica do horizonte BC1.	104
Figura 4.12: Curva granulométrica do horizonte BC2.	105
Figura 4.13: Curva característica do segundo patamar.	107
Figura 4.14: Curva característica do quarto patamar sem considerar o ponto N2 para as amostras de 20 cm ³	109
Figura 4.15: Curva característica do quarto patamar para as amostras de 100 cm ³	111

Figura 4.16: Curvas geradas para o quarto patamar com o modelo Fredlund & Xing (1994) – Comparativo entre as amostras de 20 cm ³ e de 100 cm ³	113
Figura 4.17: Curvas características obtidas pelos três ensaios, geradas a partir do modelo Fredlund & Xing (1994).....	114
Figura 4.18: Gráfico comparativo entre as duas calibrações realizadas no transdutor de pressão do tensiômetro.	116
Figura 4.19: Comparativo entre as sucções medidas pela sonda tipo TDR instalada no segundo patamar e as medidas pelo tensiômetro.	117
Figura 4.20: Comparativo entre as sucções obtidas pelas diferentes curvas características realizadas no quarto patamar.	118
Figura 4.21: Variação de sucção medida pelo tensiômetro no momento da pane.....	119
Figura 4.22: Gráfico umidade volumétrica x chuva referente a todo o período de medição das sondas tipo TDR, entre 12 de dezembro de 2018 e 13 de março de 2019.....	121
Figura 4.23: Gráfico sucção x chuva para o segundo patamar, referente a todo o período de medição (13 de dezembro de 2018 a 12 de março de 2019).....	123
Figura 4.24: Gráfico sucção x chuva para o quarto patamar, referente a todo o período de medição (13 de dezembro de 2018 a 12 de março de 2019).....	123
Figura 4.25: Gráfico umidade volumétrica x chuva referente ao dia 14 de dezembro de 2018.	124
Figura 4.26: Umidades máximas e mínimas obtidas nos três patamares ao longo do período de medição.	125
Figura 4.27: Leituras dos TDRs no dia 24 de dezembro de 2018.....	126
Figura 4.28: Leituras dos TDRs entre os dias 01 de março de 2019 e 02 de março de 2019.	127
Figura 4.29: Leituras dos TDRs no dia 03 de janeiro de 2019.....	128
Figura 4.30: Leituras dos TDRs entre os dias 03 de fevereiro de 2019 e 04 de fevereiro de 2019.	129
Figura 4.31: Leituras das sondas TDR entre os dias 03 e 04 de janeiro de 2019.....	131
Figura 4.32: Valores de sucção entre os dias 03 e 04 de janeiro de 2019.	132
Figura 4.33: Valores de θ , ω e S entre os dias 03 e 04 de janeiro de 2019.....	133
Figura 4.34: Leituras das sondas TDR no dia 16 de janeiro de 2019.	134

Figura 4.35: Valores de sucção referentes ao segundo patamar no dia 16 de janeiro de 2019.	134
Figura 4.36: Valores de θ , ω e S referentes ao segundo patamar no dia 16 de janeiro de 2019.	135
Figura 4.37: Valores de sucção referentes ao quarto patamar no dia 16 de janeiro de 2019.	136
Figura 4.38: Valores de θ , ω e S referentes ao quarto patamar no dia 16 de janeiro de 2019.	137
Figura 4.39: Leituras das sondas TDR no dia 19 de fevereiro de 2019.	137
Figura 4.40: Valores de sucção referentes ao segundo patamar no dia 19 de fevereiro de 2019.	138
Figura 4.41: Valores de θ , ω e S referentes ao segundo patamar no dia 19 de fevereiro de 2019.	139
Figura 4.42: Valores de sucção referentes ao quarto patamar no dia 19 de fevereiro de 2019.	139
Figura 4.43: Valores de θ , ω e S referentes ao quarto patamar no dia 19 de fevereiro de 2019.	140
Figura 4.44: Leituras das sondas TDR no dia 26 de fevereiro de 2019.	141
Figura 4.45: Valores de sucção referentes ao segundo patamar no dia 26 de fevereiro de 2019.	141
Figura 4.46: Valores de θ , ω e S referentes ao segundo patamar no dia 26 de fevereiro de 2019.	142
Figura 4.47: Valores de sucção referentes ao quarto patamar no dia 26 de fevereiro de 2019.	142
Figura 4.48: Valores de umidade θ , ω e S referentes ao quarto patamar no dia 26 de fevereiro de 2019.	143
Figura 4.49: Leituras das sondas TDR entre os dias 01 e 02 de março de 2019.	144
Figura 4.50: Valores de sucção referentes ao segundo patamar entre os dias 01 e 02 de março de 2019.	145
Figura 4.51: Valores de θ , ω e S referentes ao segundo patamar entre os dias 01 e 02 de março de 2019.	145
Figura 4.52: Valores de sucção referentes ao quarto patamar entre os dias 01 e 02 de março de 2019.	146
Figura 4.53: Valores de θ , ω e S referentes ao quarto patamar entre os dias 01 e 02 de março de 2019.	146

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Métodos mais usados de avaliação de sucção mátrica em laboratório e em campo (adaptado de Lu & Likos, 2004).	47
Tabela 2.2: Tipos de pedra porosa disponíveis pelo fabricante (adaptado de Soilmoisture Equipment Corp., 2000).	50
Tabela 3.1: Disposição dos TDRs em campo.	73
Tabela 4.1: Descrição morfológica do perfil.	94
Tabela 4.2: Análise físico-química dos horizontes do solo do quarto patamar. ..	96
Tabela 4.3: Granulometria do segundo patamar.	98
Tabela 4.4: Índices físicos do segundo patamar.	99
Tabela 4.5: Granulometria do quarto patamar.	100
Tabela 4.6: Limites de Atterberg do solo do quarto patamar.	101
Tabela 4.7: Índices físicos do quarto patamar.	101
Tabela 4.8: Caracterização do horizonte A.	102
Tabela 4.9: Caracterização do horizonte BA.	103
Tabela 4.10: Caracterização do horizonte BI.	103
Tabela 4.11: Caracterização do horizonte BC1.	104
Tabela 4.12: Caracterização do horizonte BC2.	105
Tabela 4.13: Coeficientes de permeabilidade referentes a cada patamar.	106
Tabela 4.14: Valores de sucção e de umidade volumétrica encontrados no ensaio de papel filtro referente ao segundo patamar.	107
Tabela 4.15: Segundo patamar: equações geradas para cada modelo.	108
Tabela 4.16: Valores de sucção e de umidade volumétrica encontrados no ensaio de papel filtro referente ao quarto patamar para as amostras de 20 cm ³	109
Tabela 4.17: Quarto patamar: equações geradas para cada modelo sem considerar o ponto N2 para as amostras de 20 cm ³	110
Tabela 4.18: Valores de sucção e de umidade volumétrica encontrados no ensaio de papel filtro referente ao quarto patamar para as amostras de 100 cm ³	111
Tabela 4.19: Quarto patamar: equações geradas para cada modelo para as amostras de 100 cm ³	112
Tabela 4.20: Comparativo entre os parâmetros gerados pelos ensaios com amostras de 20 cm ³ e de 100 cm ³	113

Tabela 4.21: Variação da pressão registrada pelo tensiômetro no momento da pane.....	119
Tabela 4.22: Panorama geral das chuvas ocorridas ao longo do período de medição.	122
Tabela 4.23: Umidades volumétricas máximas alcançadas pelos TDRs e os respectivos valores de sucção, umidade gravimétrica e grau de saturação.	125
Tabela 4.26: Umidades volumétricas mínimas alcançadas pelos TDRs e os respectivos valores de sucção, umidade gravimétrica e grau de saturação.	128
Tabela 4.27: Momento mais crítico da chuva ocorrida entre os dias 01 e 02 de março de 2019.	144

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DRM	Departamento de Recursos Minerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FTP	File Transfer Protocol
Geo-Rio	Fundação Instituto de Geotécnica
IP	Índice de Plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
PCZ	Ponto de Carga Zero
SNLCS	Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TDR	Time Domain Reflectometry

Lista de Símbolos

A	Área
a	Parâmetro relacionado à pressão de entrada de ar no modelo de Fredlund e Xing
c	Coesão aparente
c'	Coesão efetiva
e	Constante logaritmo natural; Índice de vazios
F	Força
G_s	Densidade relativa dos grãos
h	Altura do corpo de prova cilíndrico
h_m	Carga de pressão
K_i	Constante de ionização
K_a	Permissividade dielétrica
k	Permeabilidade
k_r	Condutividade hidráulica relativa
k_s	Condutividade hidráulica saturada
L	Altura do corpo de prova cilíndrico
m	Parâmetro relacionado ao formato da curva característica no modelo de van Genuchten e de Fredlund e Xing
n	Parâmetro relacionado à distribuição dos poros no solo no modelo de van Genuchten e de Fredlund e Xing; Porosidade
R_t	Fator de correção no cálculo da permeabilidade saturada
R	Raio da membrana contrátil
S	Grau de saturação
S_e	Grau de saturação efetivo
S_r	Grau de saturação residual
T_s	Tensão superficial ou interfacial
t	Tempo
u	Pressão
u_a	Pressão exercida pelo ar
u_w	Pressão exercida pela água
V	Volume
w_p	Umidade do papel filtro

α	Ângulo de contato entre a membrana contrátil e o tubo capilar; Parâmetro relacionado à pressão de entrada de ar no modelo de van Genuchten
ψ	Sucção
ψ_b	Pressão de entrada de ar ou pressão de borbulhamento
ψ_m	Sucção mátrica
σ	Tensão normal
τ	Tensão cisalhante
φ'	Ângulo de atrito do solo
φ^b	Acréscimo da coesão gerada pelo aumento de sucção no solo
θ	Umidade volumétrica
θ_r	Teor de umidade residual
θ_s	Teor de umidade saturado
Θ	Teor de umidade normalizado
Θ^q	Fator de correção que considera a tortuosidade no modelo de Fredlund, Xing e Huang
λ	Índice de distribuição granulométrica
η	Expoente relacionado ao índice de distribuição granulométrica do modelo de Brooks e Corey
ρ_d	Massa específica seca
ρ_s	Massa específica dos grãos
ρ_t	Massa específica total
ρ_w	Massa específica da água
ω	Umidade gravimétrica

1

Introdução

O trabalho consistiu no monitoramento de uma encosta localizada em Petrópolis, cidade da região serrana do estado do Rio de Janeiro. Foram implementados um conjunto de equipamentos em campo para a obtenção de valores de precipitação, umidade e sucção do solo local. A intenção é desenvolver um sistema de alerta de deslizamentos com os dados advindos desse monitoramento.

Foram instalados uma estação meteorológica modelo MAWS 100, da Vaisala®, munida de um pluviômetro automático, um datalogger, uma bateria de 12 V, uma antena para envio dos dados e uma placa solar; um tensiômetro com pedra porosa de alta pressão de borbulhamento de 15 bar e transdutor de pressão modelo K1, da Ashcroft®, cuja trava eletrônica foi retirada para a medição de pressões negativas; e quatro sondas tipo TDR modelo CS650, da Campbell® Scientific.

1.1.

Relevância e Justificativa da Pesquisa

A região serrana do estado do Rio de Janeiro é um dos locais que mais sofre quando atingido por chuvas por conta de seu relevo acidentado. Isso porque chuvas, aliadas a processos de desmatamentos e de ocupações irregulares, são grandes responsáveis pelos movimentos de massa em encostas.

Os intensos eventos pluviométricos ocorridos em janeiro de 2011 nessa região resultaram em diversos deslizamentos e inundações de proporções catastróficas, culminando na perda de milhares de vidas e em severos prejuízos econômicos. Isso chamou a atenção das autoridades e mostrou a grande vulnerabilidade dessas cidades. E problemas ocorridos em anos anteriores quantificam a questão: Petrópolis, uma das cidades mais atingidas, apresenta ocorrências quase que anualmente em decorrência das chuvas. Além de 2011, os verões de 1966, 1988, 2001 e 2013 também tiveram grandes perdas materiais e humanas devido à chuva.

Os movimentos de massa podem ser ocasionados por cortes no pé de taludes, por afloramento do lençol freático (acarretando em solapamento, efeito da poro-pressão positiva da água), ou por infiltração de água da chuva ou de vazamentos no solo (o que aumenta a poro pressão da água e, conseqüentemente, acarreta em redução na resistência ao cisalhamento do solo). Portanto, é inegável a importância do monitoramento da umidade para a prevenção de deslizamentos em áreas de risco.

Vale destacar que a maioria dos solos encontra-se em condição não saturada, em que as poro-pressões da água são negativas e culminam no surgimento da sucção matricial. O aumento dessa sucção controla o comportamento mecânico dos solos, visto que os meniscos que surgem da sucção atraem as partículas do solo e aumentam as tensões efetivas nele exercidas, proporcionando um aumento de sua resistência ao cisalhamento. Isso é primordial na engenharia de estabilidade de taludes. A compreensão e mensuração do fenômeno da sucção são fundamentais para uma efetiva sinalização de deslizamentos.

1.2. Objetivos

O principal objetivo dessa pesquisa foi mensurar a precipitação, a umidade do solo e a sucção com a finalidade de avaliar a viabilidade técnica desses instrumentos no monitoramento de encostas. Pretende-se desenvolver, futuramente, um sistema de alerta.

Alguns objetivos mais específicos foram traçados:

- Montagem e calibração do tensiômetro, e adaptação elétrica/eletrônica do datalogger para a recepção dos dados referentes ao tensiômetro e à sonda TDR;
- Instalação da instrumentação em campo;
- Obtenção de medições de sucção matricial utilizando um tensiômetro e correlação delas com o teor de umidade do solo;
- Obtenção de medições de umidade volumétrica do solo utilizando sondas tipo TDR e correlação delas com a sucção do solo;
- Obtenção das curvas características de dois patamares distintos da região de estudo através de ensaios de papel filtro para o conhecimento da relação umidade x sucção;

- Desenvolvimento de um sistema de transmissão direta de dados para uma futura estação central receptora e coordenadora;
- Averiguação do funcionamento de diferentes instrumentos instalados em campo (tensiômetro e sonda tipo TDR) para estabelecimento de vantagens e desvantagens do seu uso em sistemas de alertas de deslizamentos de encostas.

1.3.

Etapas da pesquisa

Foram realizadas as seguintes etapas ao longo dessa pesquisa:

1. Escolha do local para instalação da instrumentação;
2. Levantamento bibliográfica acerca dos temas abordados no projeto;
3. Adaptação elétrica/eletrônica do datalogger para instalação em campo;
4. Calibração dos transdutores de pressão de água e teste dos transdutores modificados;
5. Saturação da pedra porosa e confecção do tensiômetro;
6. Coleta das amostras;
7. Instalação da estação meteorológica, do tensiômetro e das sondas tipo TDR;
8. Coleta dos dados em campo;
9. Ensaios laboratoriais: caracterização do solo e obtenção das curvas características de dois patamares distintos;
10. Análise e discussão dos resultados.

1.4.

Descrição da área de estudo

1.4.1.

Localização

Os instrumentos dessa pesquisa foram instalados nos fundos da FASE/FMP (Faculdade de Medicina de Petrópolis), localizada na Avenida Barão do Rio Branco, nº 1003, no Centro da cidade de Petrópolis-RJ. A Figura 1.1 mostra a sua localização aproximada, obtida através do site “Google Maps”. As coordenadas obtidas foram 22°29'41.3"S, 43°10'53.6"W.

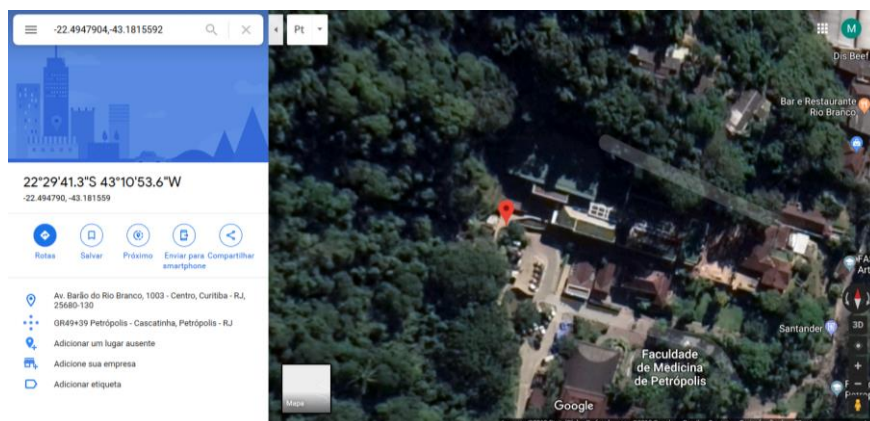


Figura 1.1: Localização aproximada da área de estudo.

O local foi escolhido por ser um centro de estudos, com laboratórios disponíveis para análises simples, e segurança suficiente para que os instrumentos não fossem danificados ao longo da pesquisa.

1.4.2. Clima

De acordo com a classificação de Köppen (1948), Petrópolis possui clima tropical de altitude (Cwb), com verões úmidos e invernos secos. Seu índice pluviométrico tem média de 2400 mm anuais, e sua temperatura média anual é de 19°C. Nimer (1972) afirma que, por localizar-se em região de transição entre o clima quente das latitudes baixas e o clima ameno das latitudes médias, a região sudeste sofre, como um todo, influências de sistemas característicos do clima tropical e do clima temperado, como a formação das frentes frias. Além disso, os sistemas convectivos se fazem presentes nos meses mais quentes e elevam consideravelmente os índices pluviométricos locais. Também são frequentes as chuvas orográficas, resultado da associação relevo – altitude – maritimidade.

1.4.3. Relevo

O município, localizado em região serrana, estrutura-se sobre rochas com falhas e fraturas. De acordo com Filho (1999), Petrópolis possui encostas íngremes, com alguns pontos de perfis de solo bastante profundo, mas com grande maioria de perfis mais rasos. Seu relevo é formado por montanhas abruptas com topos aplainados, compartimentadas por serras e vales.

1.4.4. Solo

De acordo com o Dr. Maurício Rizzato Coelho, da EMBRAPA Solos, o solo dominante da encosta em estudo é classificado como Cambissolo Háplico Tb distrófico típico. A encosta sofreu alterações antrópicas, tendo sido retalhada para melhor estabilidade e para a construção de um aterro a jusante.

1.5. Organização da dissertação

A seguinte dissertação foi organizada em cinco capítulos. O Capítulo 1 contempla a sua introdução e apresenta sucintamente o trabalho realizado, seus objetivos, a metodologia empregada e seu local de instalação.

O Capítulo 2 mostra a revisão bibliográfica, que apresenta os principais tópicos relacionados ao trabalho e necessários para o seu entendimento.

O Capítulo 3 apresenta todos os procedimentos adotados em laboratório e em campo para a elaboração dessa dissertação, descrevendo ensaios realizados, materiais utilizados e métodos seguidos, em acordo com as normas vigentes.

O Capítulo 4 traz os resultados obtidos nos ensaios de caracterização e nos ensaios para a obtenção das curvas características para cada solo, bem como as análises efetuadas com os dados coletados no campo com a sonda tipo TDR e com o tensiômetro.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e as recomendações para próximas pesquisas.

2

Revisão Bibliográfica

2.1.

Solos não saturados

Os solos não saturados compreendem um meio poroso formado por grãos minerais em que parte dos seus vazios está preenchida com fluido (em geral, água) e parte está preenchida com ar. Apesar de a engenharia considerar em seus cálculos o solo na condição saturada por tratar-se da situação mais crítica em termos de análise de estabilidade (ruptura), a maior parte dos solos que formam as encostas encontra-se superficialmente não saturada, e dificilmente satura-se totalmente pela ação das chuvas. A coesão aparente, que “une” as partículas de solos não saturados, é comumente desprezada por motivos de segurança, já que a variação do teor de umidade nos solos provocada pelas chuvas e pela evaporação da água dos poros dificulta a sua consideração nos cálculos. Porém, é inegável a importância dessa coesão aparente na estabilidade dos taludes, visto que, sem ela, a maioria deles já teria sofrido algum tipo de movimentação.

Existe uma variedade de materiais cujo comportamento não é consistente com os princípios e conceitos da mecânica dos solos clássica. A presença de mais de duas fases (sólida e líquida) em um solo é um fator que gera dificuldades técnicas em projetos de engenharia. Os solos não saturados formam, talvez, a maior categoria de materiais que não seguem o comportamento clássico da mecânica dos solos saturados. Um solo não saturado possui, distintamente, quatro fases: sólida, líquida, gasosa e interface ar – água (ou membrana contrátil). Outra característica inerente aos solos não saturados é a poro-pressão negativa da água em relação a poro-pressão do ar.

Um dos possíveis motivos para a desconsideração da coesão aparente, promovida pela poro-pressão negativa em solos não saturados, são as dificuldades associadas à medição dessas poro-pressões negativas. Trabalhar com solo saturado implica em simplificação de cálculos. Todavia, situações de lençóis freáticos profundos ou de regiões que sofrem rupturas superficiais exigem a consideração dos ganhos de resistência advindos da coesão aparente.

Nessa dissertação, o foco foi entender a variação de umidade e, consequentemente, de sucção que um solo sofre ao longo do tempo. A redução da coesão aparente causada por chuvas é um fator que deve ser considerado em sistemas de alerta de escorregamentos.

2.1.1.

Tensão superficial ou interfacial (T_s)

A tensão superficial é um fenômeno que ocorre na interface entre dois fluidos. No caso dos solos não saturados, essa tensão é resultado do contato entre ar e água dentro dos poros.

A interface ar - água (membrana contrátil) tem como propriedade primordial a tensão superficial. O fenômeno da tensão superficial resulta da ação das forças intermoleculares na membrana contrátil, que diferem das forças atuantes nas moléculas no interior da água. As moléculas no interior da água possuem forças iguais em todas as direções. Entretanto, as moléculas de água na membrana contrátil possuem forças não equilibradas voltadas para o interior da água. O equilíbrio fica estabelecido com o tracionamento da membrana contrátil. A tensão superficial é a propriedade da membrana contrátil que habilita este tracionamento, e lhe confere o comportamento de uma membrana elástica.

A Figura 2.1 mostra o menisco ou membrana formada dentro de um tubo capilar e o aparecimento da tensão superficial. Essa membrana funciona como um elemento distinto e é resultado da interface ar – água e dos esforços intermoleculares entre os diferentes fluidos. Ela tem como característica ser contrátil e isso permite que objetos mais densos do que a água sejam capazes de flutuar e que a gota tenha seu formato peculiar. Sua propriedade mais característica é a sua capacidade de exercer uma tensão superficial. Um solo não saturado pode ser visto como uma mistura de duas fases que entram em equilíbrio perante gradientes de tensão (i.e., partículas de solo e a membrana contrátil) e duas fases onde há fluxo mediante um gradiente de tensão (i.e., ar e água).

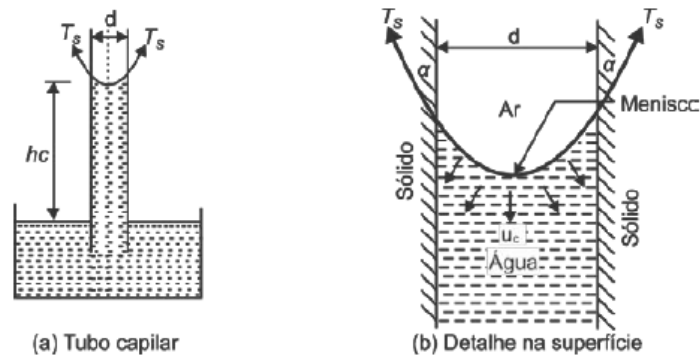


Figura 2.1: Membrana formada pela interface ar – água em um tubo capilar (Romanel, 2018).

A curvatura côncava que a membrana apresenta indica que a pressão exercida pelo ar é maior do que aquela exercida pela água contida dentro do tubo capilar. O equilíbrio dessas pressões se dá pela tensão superficial, que produz uma força vertical para cima. Isso pode ser demonstrado a partir da Eq. (2.1). Sabe-se que:

$$u = \frac{F}{A} \therefore F = u \times A$$

Desse modo:

$$\begin{aligned} u_a \pi r^2 - u_w \pi r^2 &= T_s \cos \alpha 2\pi r \\ \pi r^2 (u_a - u_w) &= 2\pi r T_s \cos \alpha \\ r(u_a - u_w) &= 2T_s \cos \alpha \\ u_a - u_w &= \frac{2T_s}{r} \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.1)$$

onde:

u: pressão

F: força

A: área

u_a : pressão exercida pelo ar (geralmente é a pressão atmosférica);

u_w : pressão exercida pela água;

T_s : tensão superficial ou interfacial;

r: raio da membrana formada;

α : ângulo de contato entre a membrana e o tubo.

Em um meio poroso, os vasos capilares não apresentam formato tão regular como o exemplificado anteriormente. Os grãos possuem formatos diversos, o que modifica continuamente o formato dos vasos. Em solos não saturados, a interface

ar – água forma uma espécie de cunha de capilaridade entre os grãos, mostrada na Figura 2.2. Da mesma forma que no tubo capilar, a curvatura dessa cunha indica que a pressão exercida pelo ar é maior do que aquela exercida pela água.

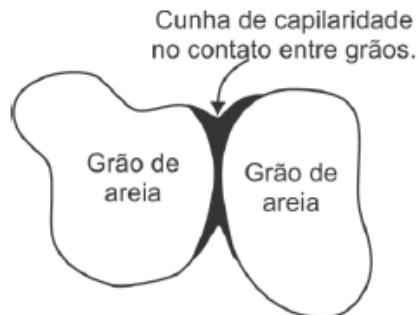


Figura 2.2: Cunha de capilaridade formada pela interface ar – água em meios porosos não saturados (adaptado de Venkatramaiah, 2012).

2.1.2. Sucção mátrica

Levando-se em conta que os fenômenos ocorridos em um meio poroso e em um tubo capilar sejam semelhantes, a Eq. (2.1) pode ser utilizada em ambos os casos. Em um solo não saturado, a membrana contrátil está sujeita à pressão do ar (u_a), que é maior do que a pressão da água (u_w). Como a pressão do ar (u_a) geralmente é a pressão atmosférica, a pressão da água (u_w) assume valor negativo. A diferença entre as pressões do ar e da água é conhecida como sucção mátrica (ψ_m), indicada na Eq. (2.2):

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (2.2)$$

A sucção mátrica proporciona um aumento da resistência ao cisalhamento em solos não saturados. Isso pode ser melhor compreendido através da plotagem tridimensional de círculos de Mohr, demonstrado na Figura 2.3. O eixo das ordenadas segue fornecendo as tensões cisalhantes, mas agora tem-se duas abcissas, $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$. Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), no plano frontal o eixo $(\sigma - u_a)$ converte-se no eixo $(\sigma - u_w)$, uma vez que a pressão do ar torna-se igual à pressão da água na saturação. Já o eixo $(u_a - u_w)$ representa a sucção mátrica – quando esta é zero, o gráfico torna-se bidimensional e tem-se a representação de um solo saturado, onde $u_w = u_a$.

A envoltória tridimensional gerada pode ser uma superfície planar ou curva. Fredlund & Rahardjo (1993) assumem uma envoltória planar, descrita pela Eq. (2.3):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2.3)$$

onde:

τ : tensão cisalhante;

c' : coesão efetiva ou intercepto coesivo (contemplada pela mecânica dos solos saturados);

φ' : ângulo de atrito do solo;

φ^b : acréscimo da coesão gerada pelo aumento de sucção no solo, geralmente igual ou menor do que φ' .

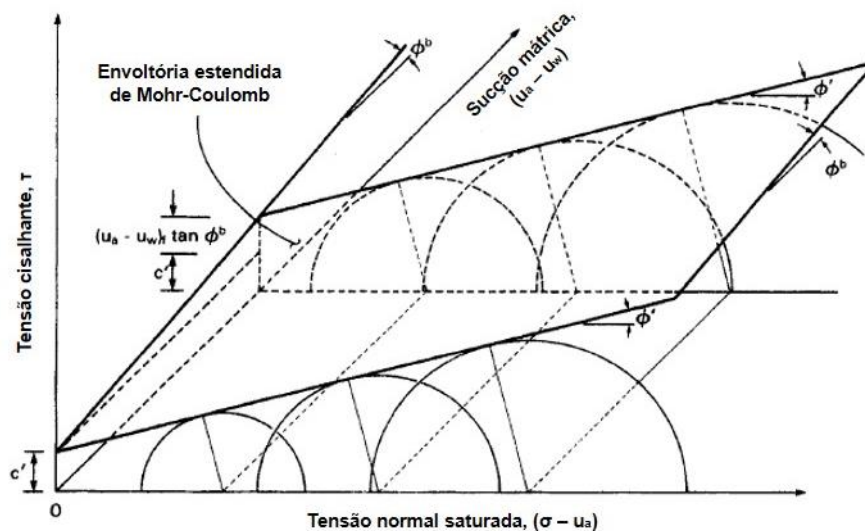


Figura 2.3: Envoltória estendida de Mohr-Coulomb para solos não saturados (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993).

De acordo com Fredlund & Rahardjo (1993), a coesão efetiva c' e os ângulos φ' e φ^b são parâmetros de resistência que representam diversos fatores simulados em testes: compactidade relativa, índice de vazios, grau de saturação, composição mineral, histórico de tensões e taxa de deformação, entre outros.

A coesão aparente resultante da sucção mátrica fica mais evidente na projeção horizontal mostrada na Figura 2.4, que apresenta o plano $\tau \times (\sigma - u_a)$ e diferentes envoltórias de ruptura. Considerando uma envoltória de ruptura planar, todas as envoltórias possuem φ' igual. O que muda, porém, é o intercepto coesivo, que é c' quando a sucção mátrica é zero, e que cresce conforme o aumento da

sucção mátrica, tornando-se a chamada coesão aparente. Desse modo, para uma dada tensão normal, nota-se um incremento de tensão cisalhante (resistência ao cisalhamento) como resultado do aumento da sucção mátrica.

A variação da coesão aparente gerada pela sucção mátrica é demonstrada através da Eq. (2.4):

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2.4)$$

onde:

c: coesão aparente.

A Eq. (2.4) indica que a coesão aparente do solo cresce linearmente com o aumento da sucção, traduzido por um φ^b constante.

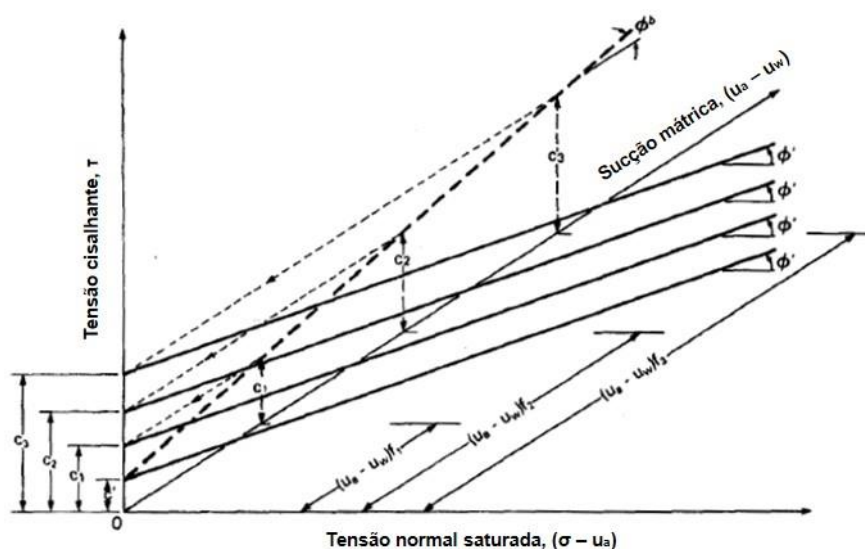


Figura 2.4: Projeção horizontal da envoltória de ruptura de um solo não saturado, em que se apresenta tensão cisalhante x tensão normal para diferentes sucções mátricas (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993).

As poro-pressões negativas da água controlam o comportamento mecânico dos solos não saturados. Mudanças nas poro-pressões negativas da água associadas a precipitações elevadas são as causas de inúmeros deslizamentos. Oscilações na poro-pressão induzem variações de volume, pela alteração no estado de tensões efetivas. A dinâmica das condições de contorno do fluxo acarretadas por variações no ambiente, como a presença de raízes e folhas e os diferentes horizontes de um solo, é fundamental no caso de soluções de problemas com solos não saturados.

2.1.3. Curva característica

A sucção de um solo não saturado varia conforme o seu grau de saturação, seu teor de umidade volumétrica e seu teor de umidade gravimétrica. Basicamente, quanto maior a saturação de um solo, menor o seu valor de sucção. Em outras palavras, a sucção em um solo aumenta com a redução de sua saturação.

Uma forma de demonstrar essas variações que ocorrem no solo é através da chamada curva de retenção ou curva característica do solo, que relaciona, mais comumente, sucção mátrica (ψ_m) ou carga de pressão (h_m) com a umidade volumétrica (θ) de determinado solo. Cada solo tem a sua curva característica, e ela pode ser determinada em campo ou em laboratório (sendo a segunda alternativa a mais comum).

A obtenção de uma curva característica envolve dificuldades, seja em laboratório ou em campo. Em laboratório, por exemplo, existem cuidados associados com a obtenção de amostras indeformadas, seu transporte e o preparo dos corpos de prova para a realização dos ensaios. Além disso, as pequenas amostras usadas são incapazes de captar a variabilidade espacial das propriedades do solo e das condições de tensão do campo. Por outro lado, em campo, os custos com instrumentação são altos, além de exigirem gastos extras com instalação, manutenção e monitoramento das informações. Possíveis danos também devem ser considerados, já que essa instrumentação está exposta às descargas elétricas e vandalismo.

Apesar dessas dificuldades, a curva característica de um solo é imprescindível, visto que assume grande importância para previsões de fluxo, tensão e deformação deste, além de ser uma ferramenta valiosa para a compreensão da própria sucção e de sua colaboração na estabilidade de taludes. A sua descrição em formato matemático, apesar de complexa, é fundamental para a atual pesquisa.

2.1.3.1. Modelo dos tubos capilares

Para facilitar o entendimento de uma curva característica, faz-se uma analogia entre o meio poroso e tubos capilares de diferentes raios, conforme mostra a Figura 2.5.

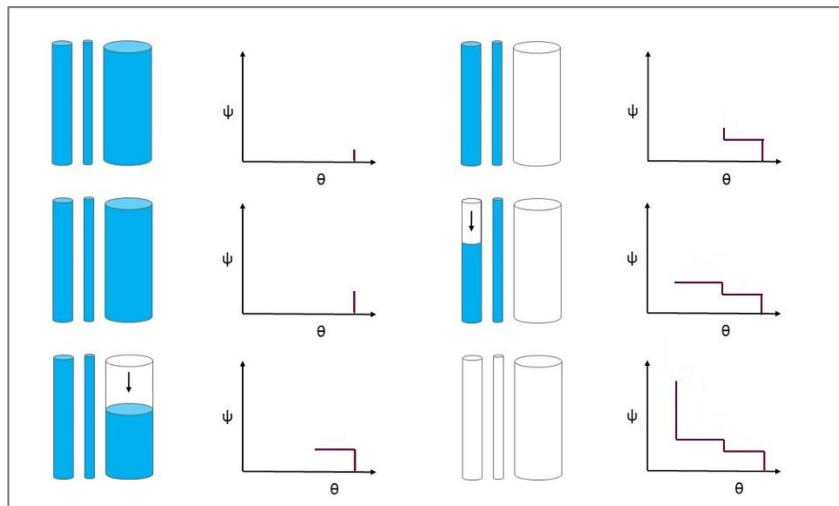


Figura 2.5: Curva característica de tubos capilares análogas ao meio poroso.

A primeira imagem da sequência indicada na Figura 2.5 mostra três tubos com diferentes diâmetros. Inicialmente, todos eles estão saturados e, mesmo que se tenha sucção (ψ), essa não é suficiente para modificar a umidade volumétrica (θ).

Na terceira imagem, já é possível identificar uma mudança na curva. Aqui, a sucção atingiu um valor alto o suficiente para retirar umidade do tubo com maior diâmetro, lembrando que quanto maior o diâmetro do tubo, mais fácil é a sua perda de umidade. O ponto de mudança na curva é denominado pressão de entrada de ar e, a partir dele, já ocorre perda de água (e de saturação) no tubo. Assim que esse tubo esvazia-se, ocorre uma nova estagnação de umidade volumétrica, até que a sucção atinja um valor mais alto, capaz de retirar água de um tubo com diâmetro menor.

O processo irá se repetir até que todos os tubos fiquem sem água. O formato da curva é similar ao que se vê normalmente em uma curva característica.

2.1.3.2. Formatos típicos de uma curva característica

Quanto ao formato da curva característica, este é influenciado pelo tipo de solo. A Figura 2.6 traz diferentes tipos de solo e os consequentes formatos de curva característica. Basicamente, solos argilosos possuem grandes valores de pressão de entrada de ar, fazendo com que o solo permaneça saturado até altos níveis de pressão. Já solos arenosos perdem saturação rapidamente, pois

possuem pequenos valores de pressão de entrada de ar. Isso é facilmente visto na Figura 2.6: o solo representado pela curva característica 1 (areia de duna) possui valor de pressão de entrada de ar bastante inferior ao solo da curva 7 (argila marinha). Ambos os solos nos fornecem um modelo de formato de curva bastante distinto para areias e argilas.

Uma outra questão relevante apresentada em curvas características é a própria relação entre a umidade volumétrica do solo e a sucção mátrica. Fredlund (1964) explica, baseado em resultados experimentais, que a sucção mátrica tende a um limite que varia entre 620 a 980 MPa conforme o teor de umidade do solo aproxima-se de 0%. Portanto, a sucção mátrica de um solo tende a aumentar conforme a sua umidade volumétrica diminui, até alcançar o limite estabelecido nesses experimentos. O próprio gráfico mostra valores máximos de sucção mátrica aproximando-se de 10^6 kPa (980 MPa ou $9,8 \times 10^5$ kPa).

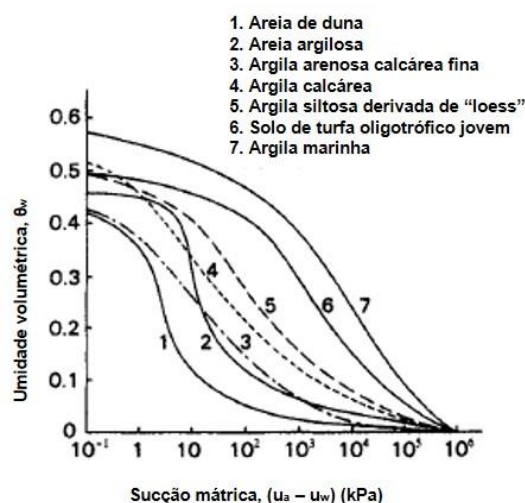


Figura 2.6: Curvas características de diferentes tipos de solo (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993).

2.1.3.3.

Histerese e o efeito “Ink-Bottle”

Uma propriedade complicadora existente nas curvas características é a histerese. A Figura 2.7 mostra uma curva característica com essa propriedade, onde observa-se que a trajetória de umedecimento é diferente da trajetória de secagem da amostra.

Lu & Likos (2004) explicam que solos em processo de secagem (i.e., evaporação) tendem a reter uma quantidade de água maior para a mesma

magnitude de sucção se comparado ao processo de umedecimento (i.e, infiltração ou capilaridade). A linha horizontal pontilhada no gráfico da Figura 2.7 mostra o mesmo valor de sucção para duas umidades volumétricas diferentes, sendo a umidade volumétrica da trajetória de secagem maior do que a umidade volumétrica da trajetória de umedecimento.

Observa-se que a histerese é mais pronunciada na região do gráfico que indica uma drenagem mais rápida (as linhas encontram-se mais horizontais). Ela diminui nas extremidades do gráfico, especialmente próximo a umidade volumétrica residual. O gráfico também mostra que a saturação total do solo não consegue ser alcançada na trajetória de umedecimento por conta do aprisionamento de bolhas de ar nos poros do solo.

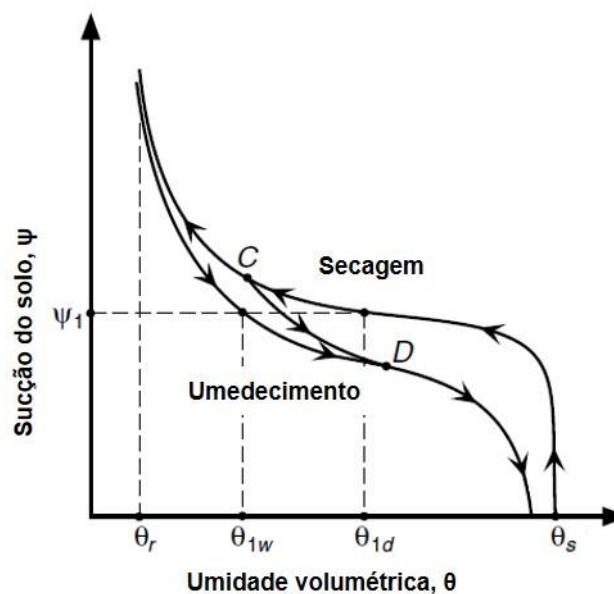


Figura 2.7: Histerese em curva característica (adaptado de Lu & Likos, 2004).

Uma maneira de explicar a ocorrência da histerese é o efeito “ink-bottle”. Ele surge devido a não-homogeneidade no tamanho e no formato dos poros. Vamos analisar a Figura 2.8 para fazer uma analogia entre os tubos capilares não uniformes mostrados e a distribuição de poros em solos.

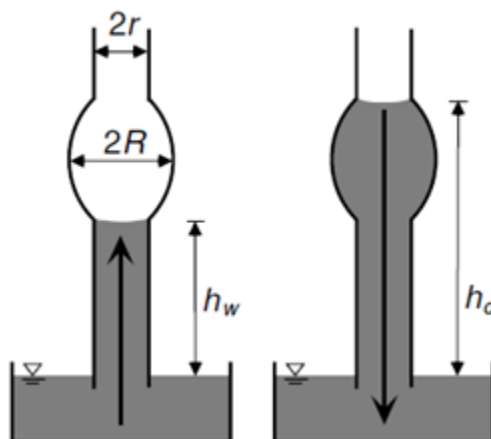


Figura 2.8: Efeito “ink-bottle” (adaptado de Lu & Likos, 2004).

Durante o fluxo de ascendência da capilaridade, no processo de umedecimento, a altura máxima que a capilaridade pode atingir é controlada pelo menor raio, r , e o fluxo ascendente irá cessar quando encontrar o maior raio, R . Por outro lado, se o tubo está inicialmente cheio, então a altura da capilaridade ao longo do processo de secagem pode reduzir até alcançar o maior raio, R . Em ambos os casos, considerando um ângulo de contato igual a zero, a sucção é igual a $2T_s/r$. Percebe-se uma similaridade com a curva característica, em que se tem duas umidades volumétricas diferentes para um mesmo valor de sucção, e onde a umidade volumétrica na trajetória de umedecimento é menor do que na de secagem.

Voltando à Figura 2.7, é possível ver os pontos C e D, que representam uma curva de “reumedecimento”. Pode-se dizer que a verdadeira curva característica do solo está definida entre as trajetórias de secagem e de umedecimento, pois as condições do solo no campo mudam constantemente. Porém, Lu & Likos (2004) afirmam ser possível que o solo possua apenas uma curva característica, desde que pequenos ciclos de umedecimento e de secagem aconteçam. Na prática, a histerese acaba sendo desprezada.

2.1.3.4.

Modelos matemáticos para curva característica

Para que seja possível obter modelos matemáticos para uma curva característica, é necessário que se estabeleçam alguns parâmetros (ver Figura 2.9):

- Teor de umidade saturado (θ_s): representa, na curva característica, o ponto em que todos os poros de um solo estão preenchidos por água. Ele usualmente pertence à trajetória de secagem;
- Pressão de entrada de ar, também conhecida como pressão de borbulhamento (Ψ_b): representa, na curva característica, o ponto em que a sucção mátrica, na trajetória de secagem, é alta o suficiente para permitir a entrada de ar nos poros e, conseqüentemente, a perda de saturação do solo;
- Teor de umidade residual (θ_r): representa a condição em que é necessária uma sucção extremamente alta para que se consiga extrair água do sistema, já que o solo encontra-se praticamente seco;
- Teor de umidade normalizado (θ): é uma variável adimensional calculada pela Eq. (2.5) cujo valor varia de 0 a 1. Se a umidade volumétrica θ possui valor próximo ao do teor de umidade residual, seu valor tenderá a 0; caso seja próximo ao teor de umidade saturado, seu valor tenderá a 1; se a umidade residual for 0, então o teor de umidade normalizado será igual ao grau de saturação S .

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.5)$$

- Grau de saturação efetivo (S_e): é uma normalização semelhante, mostrada na Eq. (2.6) Se a saturação residual S_r for 0, o grau de saturação efetivo é igual ao grau de saturação S .

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (2.6)$$

onde:

$$\theta = S_e \quad (2.7)$$

A Figura 2.9 ilustra a localização do teor de umidade saturado (θ_s), da pressão de entrada de ar (Ψ_b) e do teor de umidade residual (θ_r) em uma curva característica.

De acordo com Lu & Likos (2004), para uma boa representação de uma curva característica por um modelo matemático são necessários entre 5 e 10 pontos de sucção mátrica x umidade volumétrica.

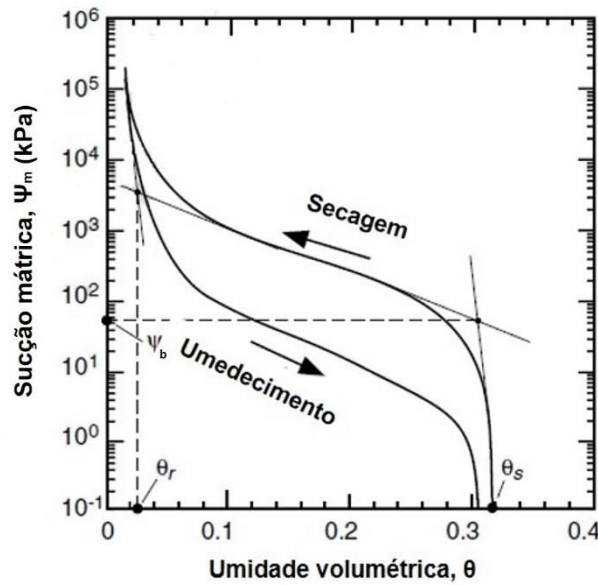


Figura 2.9: Localizações aproximadas dos parâmetros teor de umidade saturado (θ_s), pressão de entrada de ar (ψ_b) e teor de umidade residual (θ_r) em uma curva característica típica (adaptado de Lu & Likos, 2004).

2.1.3.4.1.

Modelo de Brooks & Corey (1964)

Este modelo é um dos primeiros de curva característica e incorpora informações relacionadas à distribuição granulométrica do solo através do parâmetro λ , denominado “índice de distribuição granulométrica”. Ele baseia-se, também, na pressão de entrada de ar (ψ_b) e é representado pela Eq. (2.8) ou pela Eq. (2.9):

$$\theta = S_e = \begin{cases} 1 & \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda & \psi \geq \psi_b \end{cases} \quad (2.8)$$

ou

$$\theta = \begin{cases} \theta_s & \psi < \psi_b \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda & \psi \geq \psi_b \end{cases} \quad (2.9)$$

A Figura 2.10 e a Figura 2.11, a seguir, mostram uma série de curvas modeladas através do modelo de Brooks & Corey (1964), todas considerando que a saturação residual (S_r) é igual a zero. Desse modo, $\Theta = S_e = S$.

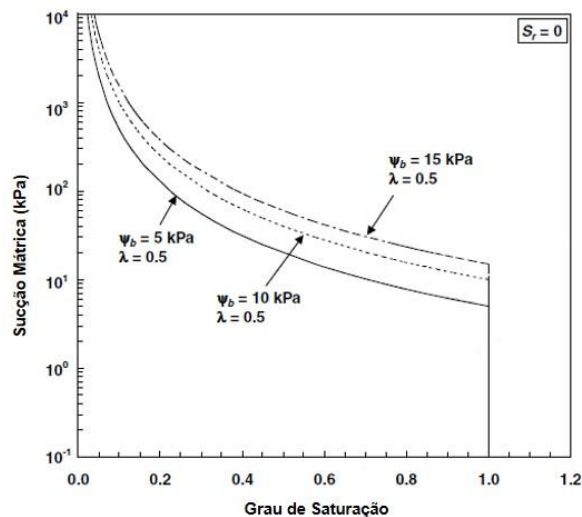


Figura 2.10: O efeito da variação da pressão de entrada de ar (Ψ_b) em curvas modeladas pelo modelo de Brooks & Corey (1964), mantendo λ constante (adaptado de Lu & Likos, 2004).

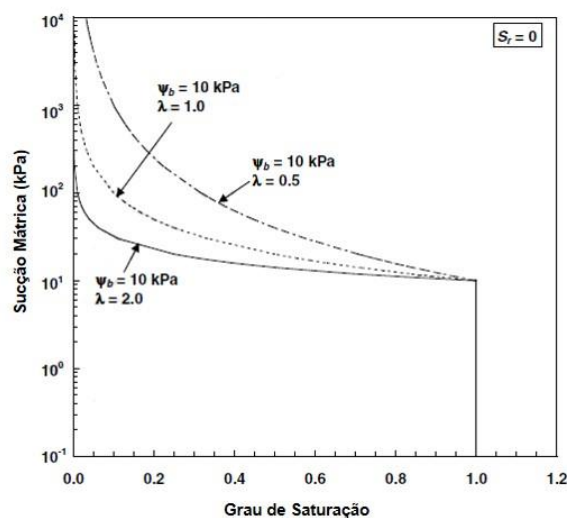


Figura 2.11: O efeito da variação de λ em curvas modeladas pelo modelo de Brooks & Corey (1964), mantendo a pressão de entrada de ar (Ψ_b) constante (adaptado de Lu & Likos, 2004).

As curvas apresentadas na Figura 2.10 e na Figura 2.11 mostram que a variação de λ causa mudanças muito mais drásticas no formato da curva do que a variação de Ψ_b . Valores mais altos de λ tornam a curva característica mais achatada, indicando que a drenagem no tipo de solo em questão é relativamente mais rápida, e que esta ocorre em um pequeno intervalo de sucção. Portanto, pode-se considerar que o modelo de Brooks & Corey (1964) é mais apropriado

para solos de granulometria relativamente grossa, quando esse tipo de comportamento é mais comum.

Uma outra questão importante é a falta de suavidade observada entre a curva e o ponto da pressão de entrada de ar. Lu & Likos (2004) indicam que isso pode gerar instabilidades numéricas na tentativa de modelagens do comportamento do fluxo em um ponto próximo ao da saturação.

2.1.3.4.2.

Modelo de van Genuchten (1980)

O modelo de van Genuchten (1980) promove uma melhor flexibilidade para um intervalo maior de sucção, permitindo a obtenção de formatos mais adequados às curvas. Ele é representado pela Eq. (2.10):

$$\theta = S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (2.10)$$

onde:

α : parâmetro relacionado à pressão de entrada de ar, e obtido pela Eq. (2.11):

$$\alpha = \left(\frac{0,78}{\psi_b} \right)^{1,26} \quad (2.11)$$

n : parâmetro relacionado à distribuição dos poros no solo;

m : parâmetro relacionado ao formato da curva característica.

Os parâmetros m e n relacionam-se mais comumente pela Eq. (2.12):

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2.12)$$

Os parâmetros citados acima podem ser determinados a partir de ensaios de laboratório.

A Figura 2.12 e a Figura 2.13, a seguir, mostram uma série de curvas modeladas através do modelo de van Genuchten (1980), todas considerando que a saturação residual (S_r) é igual a zero.

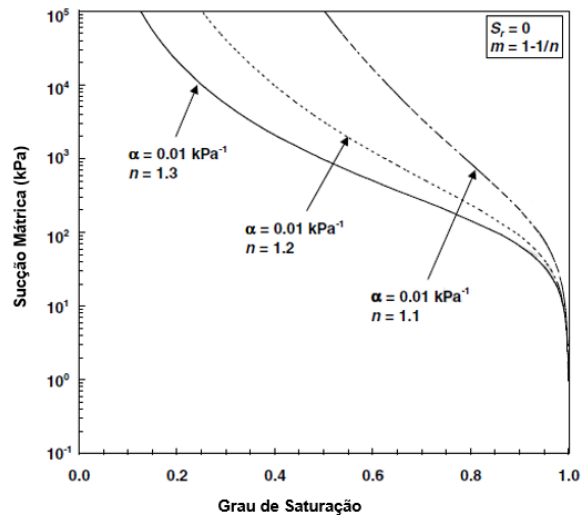


Figura 2.12: O efeito da variação de n em curvas modeladas pelo modelo de van Genuchten (1980), mantendo α constante (adaptado de Lu & Likos, 2004).

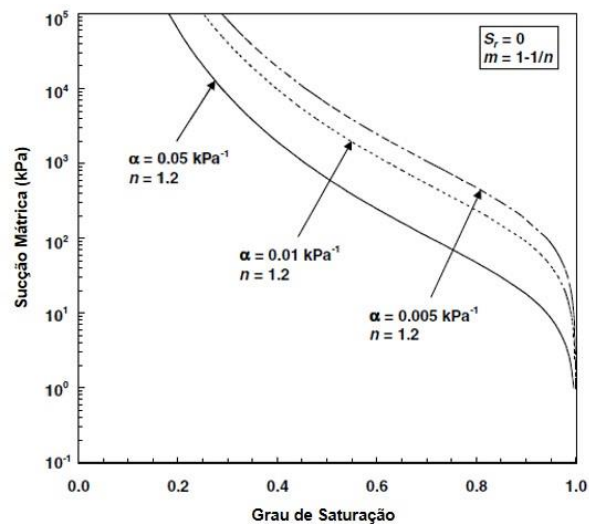


Figura 2.13: O efeito da variação de α em curvas modeladas pelo modelo de van Genuchten (1980), mantendo n constante (adaptado de Lu & Likos, 2004).

Pela Figura 2.12 é possível traçar uma semelhança entre os modelos de Brooks & Corey (1964) e de van Genuchten (1980): percebe-se que o aumento do valor de n gera curvas mais achatadas, assim como ocorre no modelo de Brooks & Corey (1964) com relação à λ . Já a Figura 2.13 mostra que valores de α menores caracterizam solos com maior pressão de entrada de ar.

2.1.3.4.3.

Modelo de Fredlund & Xing (1994)

O modelo de Fredlund & Xing (1994) também considera a distribuição dos poros no solo, sendo similar ao modelo de van Genuchten (1980). De acordo com Lu & Likos (2004), dados experimentais apontam que esse modelo é capaz de descrever adequadamente a curva característica em um intervalo de sucção variando de 0 kPa até 10^6 kPa. Ele é caracterizado pela Eq. (2.13):

$$\theta = C(\psi)\theta_s = \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (2.13)$$

onde:

a : parâmetro relacionado à pressão de entrada de ar;

n : parâmetro relacionado à distribuição dos poros;

m : parâmetro relacionado ao formato da curva característica;

e : número exponencial e ;

$C(\Psi)$: fator de correção calculado pela Eq. (2.14):

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right] \quad (2.14)$$

A Figura 2.14, a Figura 2.15 e a Figura 2.16, a seguir, mostram uma série de curvas modeladas através do modelo de Fredlund & Xing (1994). A Figura 2.14 mostra os efeitos da variação do parâmetro a para valores de n e m constantes. Fica claro que menores valores de a indicam menores pressões de entrada de ar. A Figura 2.15 mostra os efeitos da variação do parâmetro n para valores de a e m constantes. Observa-se que altos valores de n provocam variações mais acentuadas da curva próximo ao valor da pressão de entrada de ar. Ademais, pelo formato gerado pela curva, pode-se afirmar que maiores valores de n implicam em solos com distribuição granulométrica mais uniforme. Por fim, a Figura 2.16 mostra os efeitos da variação do parâmetro m para valores de a e n constantes. Percebe-se que m controla o formato da curva quando os valores de sucção são maiores. Altos valores de m representam solos cujo teor de saturação residual aproxima-se de zero.

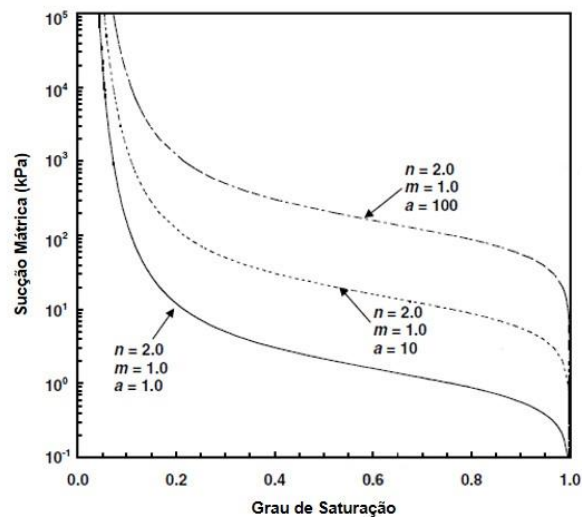


Figura 2.14: O efeito da variação de a em curvas modeladas pelo modelo de Fredlund & Xing (1994), mantendo n e m constantes (adaptado de Lu & Likos, 2004).

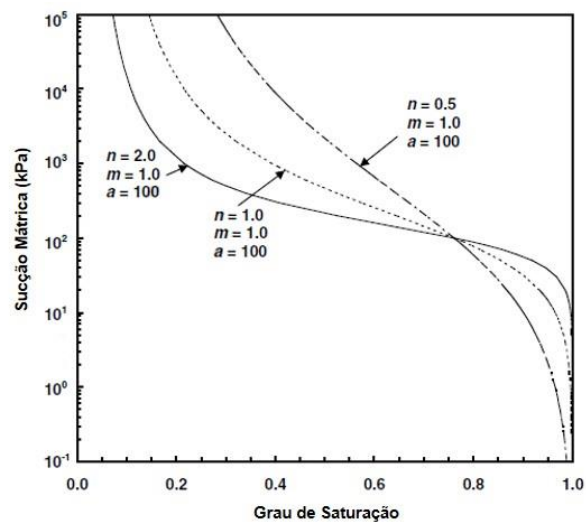


Figura 2.15: O efeito da variação de n em curvas modeladas pelo modelo de Fredlund & Xing (1994), mantendo a e m constantes (adaptado de Lu & Likos, 2004).

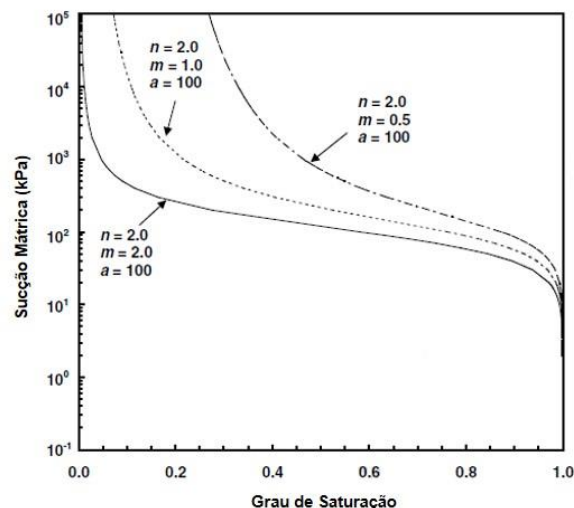


Figura 2.16: O efeito da variação de m em curvas modeladas pelo modelo de Fredlund & Xing (1994), mantendo a e n constantes (adaptado de Lu & Likos, 2004).

2.1.4. Métodos para avaliação de sucção mátrica

São vários os métodos disponíveis para a avaliação de sucção mátrica, seja em laboratório ou em campo. Essas medições possibilitam a obtenção de uma curva característica que correlaciona sucção com umidade volumétrica de um solo específico. Primeiramente, é necessário diferenciar os métodos que fornecem sucção total daqueles que fornecem sucção mátrica, foco desse trabalho. Cada método possui particularidades quanto ao custo, complexidade e intervalo de medição. Para melhor entendimento, a Tabela 2.1 traz uma classificação simplificada dos métodos de medição de sucção mátrica utilizados atualmente.

Tabela 2.1: Métodos mais usados de avaliação de sucção mátrica em laboratório e em campo (adaptado de Lu & Likos, 2004).

Técnica / Sensor	Intervalo prático de medição (kPa)	Laboratório / Campo
Tensiômetros	0 - 100	Laboratório e campo
Sensores de condutividade elétrica / térmica	0 - 400	Laboratório e campo
Método do papel filtro (com contato)	todo o intervalo	Laboratório e campo

Aqui serão abordados os métodos utilizados ao longo dessa pesquisa: método do papel filtro, tensiômetro e TDR (Time Domain Reflectometry), que é um

sensor que mede a constante dielétrica do meio. Para pesquisar outros métodos disponíveis, consultar Lu & Likos (2004) e Fredlund & Rahardjo (1993).

2.1.4.1.

Método do papel filtro

Esse método, inicialmente desenvolvido para uso na agronomia, é relativamente simples, de baixo custo e razoável exatidão, e pode ser executado tanto em campo como em laboratório. Não existe normatização brasileira, mas seu procedimento é descrito pela norma americana ASTM D5298 (2013).

O método do papel filtro é capaz de fornecer tanto a sucção total como a sucção mátrica, dependendo da técnica de ensaio. Admite-se que quando há contato direto do papel filtro com a amostra obtém-se a sucção mátrica, e que quando não há esse contato obtém-se a sucção total (Figura 2.17). Em ambos os casos, a sucção é estimada indiretamente e admite-se que a sucção do papel filtro é a mesma da amostra de solo. Mede-se a umidade do papel filtro e relaciona-se essa umidade com a sucção do solo através de uma curva de calibração do papel filtro utilizado no ensaio. Os tipos de papel filtro mais utilizados são: Whatman #42, Schleicher and Schuell #589, White Ribbon e Fisher 9-790A. Estes possuem tipicamente formato circular com diâmetro de 5,5 cm e peso aproximado de 0,2 g.

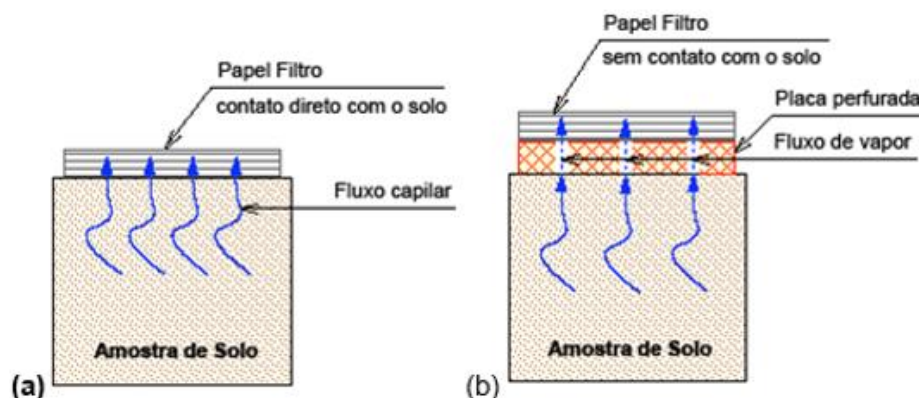


Figura 2.17: (a) Ensaio com o papel filtro em contato direto com a amostra de solo para medir a sucção mátrica; (b) Ensaio em que não há contato do papel filtro com a amostra, com o propósito de medir a sucção total (Nacinovic, 2009).

Chandler *et al.* (1992) estabeleceu a curva de calibração (sucção x umidade) para o papel filtro Whatman #42 através da Eq. (2.15), na qual ψ representa a sucção (em kPa) e w_p a umidade do papel filtro (em %):

$$\psi = \begin{cases} 10^{(6,05-2,48 \log w_p)} & w_p > 47\% \\ 10^{(4,84-0,0622 w_p)} & w_p \leq 47\% \end{cases} \quad (2.15)$$

Esse método necessita de várias amostras de solo com diferentes teores de umidade, pois cada amostra irá corresponder a um ponto na curva característica. O processo de amostragem deve ser criterioso, especialmente em taludes que apresentam solos heterogêneos. As amostras precisam ser indeformadas, o que exige cuidados especiais em sua coleta e transporte. Eventualmente, alguma amostra pode ser descartada ao longo do ensaio por perda excessiva de material ou por algum outro tipo de comprometimento. Isto exige uma quantidade razoável de amostras para a execução do ensaio.

2.1.4.2. Tensiômetro

Um tensiômetro padrão (Figura 2.18) é, basicamente, um tubo preenchido com água que possui uma pedra porosa (ou elemento poroso) de alta capacidade de entrada de ar em sua extremidade inferior, em contato com o solo, e um sensor capaz de medir poro-pressões negativas próximo ao topo, que é fechado com uma tampa.

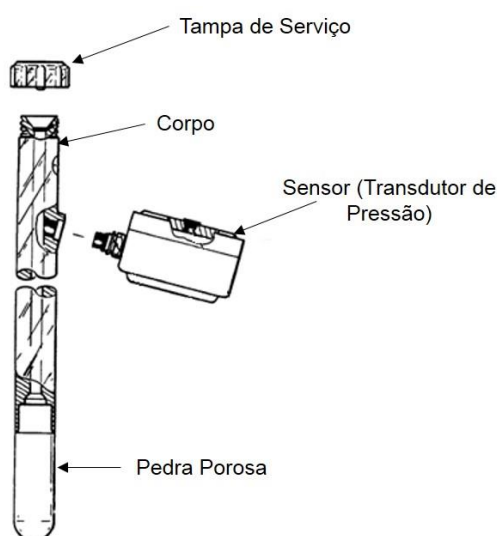


Figura 2.18: Desenho esquemático de um tensiômetro convencional (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993).

A pedra porosa deve estar saturada de modo a criar uma conexão hidráulica entre os poros do solo e o sensor. Desse modo, quando há diferença de carga hidráulica entre o tensiômetro e o solo não saturado, ocorre uma tendência de fluxo de água do tensiômetro para o solo até que a pressão interna do sensor seja equivalente ao potencial mátrico do solo. Entretanto, o fluxo é evitado porque o tubo é fechado para a atmosfera. Não obstante, a água do tensiômetro fica submetida à sucção do solo que, por sua vez, é registrada pelo sensor.

A Figura 2.18 mostra o desenho esquemático de um tensiômetro convencional, usado tanto em laboratório como em campo. Para facilitar seu entendimento, cada elemento é explicado separadamente, a seguir.

- Pedra porosa: Lu & Likos (2004) explicam que, quando a pedra porosa é saturada com água, a tensão superficial que surge na interface ar – água dentro dos poros da pedra passa a atuar como uma membrana que separa as duas fases, permitindo que a poro-pressão negativa seja diretamente medida pelo tensiômetro. A Tabela 2.2 mostra os tipos comerciais de pedra porosa. Através dela é possível ver os valores de pressão necessários para vencer a membrana formada por essa tensão superficial. Isso é fundamental para impedir a entrada de bolhas de ar no tensiômetro.

Tabela 2.2: Tipos de pedra porosa disponíveis pelo fabricante (adaptado de Soilmoisture Equipment Corp., 2000).

Tipo da pedra porosa	Pressão de borbulhamento	Porosidade aproximada	Condutividade hidráulica	Tamanho máximo dos poros
	(kPa)	(%vol)	(cm/s)	(μm)
1/2 bar High Flow	48 - 62	50	$3,11 \times 10^{-5}$	6,00
1 bar High Flow	131 - 193	45	$8,60 \times 10^{-6}$	2,50
1 bar	138 - 207	34	$7,56 \times 10^{-7}$	1,70
2 bar	262 - 310	32	$6,30 \times 10^{-7}$	1,10
2 bar High Flow	221 - 290	38	$6,93 \times 10^{-7}$	1,30
3 bar	317 - 483	34	$2,50 \times 10^{-7}$	0,70
5 bar	552	31	$1,21 \times 10^{-7}$	0,50
15 bar	1517	32	$2,59 \times 10^{-9}$	0,16

Vale ainda destacar que pedras porosas de 15 bar (1517 kPa) são de alta pressão de entrada de ar (ou alta pressão de borbulhamento), e referem-se a um tipo especial de cerâmica caracterizada por poros de tamanho microscópico com tamanho e distribuição relativamente uniformes. A Figura

2.19 mostra uma pedra porosa de 15 bar e um corpo constituído de material acrílico.



Figura 2.19: Detalhe de uma pedra porosa de 15 bar e de um corpo de material acrílico.

- Sensor: A sucção pode ser obtida através de manômetros ou de transdutores de pressão. Os transdutores de pressão são a forma mais usual de se obter os valores de sucção, pois as medidas são automatizadas – o que permite um monitoramento com leituras com maior frequência.
- Corpo: Peça que une a pedra porosa e o transdutor de pressão, e que serve como reservatório de água. Para a escolha do seu material, é importante que se tenha em mente tipos mais lisos para evitar o acúmulo de ar em suas paredes.

Alguns cuidados devem ser tomados ao longo da montagem e da instalação de um tensiômetro. Antes do encaixe do sensor no corpo, ele precisa ser saturado com água deaerada e receber vácuo para que possíveis bolhas de ar possam ser removidas. Também é necessário estabelecer, no momento da instalação em campo, uma boa relação entre o tensiômetro e o solo para que se possa manter a pedra porosa sempre saturada. Para isso, é necessário atentar-se para que os espaços vazios entre o instrumento e o solo intacto sejam devidamente preenchidos com solo. Manutenções periódicas exigem que o reservatório contido dentro do corpo do tensiômetro seja reabastecido com água deaerada para expulsar possíveis bolhas de ar (exceto em tensiômetros do tipo Jet Fill, em que esse processo é automático).

O tempo de resposta de um tensiômetro convencional é função da compressibilidade do sistema, da condutividade hidráulica e da espessura da

ponta do sensor. Lu & Likos (2004) afirmam que são comuns tempos entre 1 e 10 minutos; já Fredlund & Rahardjo (1993) afirmam que o tempo máximo admissível deve ser de 5 minutos.

Uma limitação desse tipo de instrumento é o seu intervalo de medição de sucção mátrica. Gases que se encontram dissolvidos na água transformam-se em bolhas (cavitação) dentro do tensiômetro a uma sucção aproximada de 1 atm ou 100 kPa no nível do mar, e essa sucção diminui proporcionalmente conforme o aumento da altitude. Portanto, são consideradas leituras confiáveis sucções de 70 a 80 kPa. Outras questões que implicam em cavitação são: impurezas na água, gases dissolvidos e bolhas de ar.

Tendo em vista o aumento da capacidade de medição e a redução do tempo de resposta, foram desenvolvidos tensiômetros de alta capacidade com leituras de sucção que aproximam-se de 1500 kPa. Um deles foi desenvolvido através dos estudos de Mahler *et al.* (2004), Diene & Mahler (2007) e Ridley & Burland (1993). Apesar de consistir dos mesmos elementos de um tensiômetro convencional (pedra porosa, transdutor de pressão e corpo), foram feitas modificações estratégicas visando aumentar a sua capacidade de leitura. Resumidamente, o corpo é feito de material acrílico e possui um pequeno reservatório de água interligando a pedra porosa e o transdutor de pressão. A pedra porosa de alta pressão de entrada de ar é de 15 bar, e o transdutor de pressão foi alterado para permitir a leitura de poro-pressões positivas e negativas. A Figura 2.20 mostra detalhes desse tipo de tensiômetro.



Figura 2.20: Características diferenciadas de um tensiômetro de alta capacidade (Mahler *et al.*, 2004).

2.1.4.3. TDR (Time Domain Reflectometry)

TDR (“Time Domain Reflectometry” ou Reflectometria no Domínio do Tempo, em português) é um instrumento capaz de medir a umidade volumétrica de um solo ou outro tipo de meio poroso. Uma vez determinada a umidade volumétrica, a sucção do solo é obtida a partir de sua curva característica, que correlaciona a umidade volumétrica com a sucção. É um instrumento composto por hastes paralelas de aço inoxidável ligadas em sua extremidade por uma placa de circuitos digitais inteligentes (ver Figura 2.21).



Figura 2.21: Alguns modelos de TDR comercializados pela Campbell® Scientific.

A técnica para obtenção da umidade volumétrica consiste na emissão de um pulso elétrico de curta duração e na análise de sua reflexão. A velocidade de propagação da onda eletromagnética emitida depende da permissividade dielétrica do meio. O aumento da umidade causa uma redução dessa velocidade por conta do aumento da permissividade dielétrica. Portanto, a umidade do meio poroso interfere no tempo de reflexão da onda – por isso o nome TDR. Atenuações no sinal são corrigidas através de medidas da condutividade elétrica. Uma equação de calibração converte o tempo de reflexão da onda e a condutividade elétrica em permissividade dielétrica. A equação de Topp *et al.* (1980) é usada para converter os dados de permissividade dielétrica (K_a) em umidade volumétrica (θ), como mostrado na Eq. (2.16):

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} K_a - 5,5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (2.16)$$

De acordo com o manual do instrumento CS650, da Campbell® Scientific (2011 – 2012), a Eq. (2.16) funciona muito bem na maioria dos minerais encontrados no solo, o que tornaria desnecessária a calibração do equipamento. Trintinalha *et al.* (2001) afirma, porém, que existem poucas informações a respeito do uso do TDR em solos tropicais.

2.2. Permeabilidade em solos não saturados

Assim como nos solos saturados, a Lei de Darcy também é aplicável aos solos não saturados. O coeficiente de permeabilidade, porém, passa a ser função da umidade volumétrica ou da sucção mátrica do solo em questão. A Figura 2.22 apresenta verificações experimentais da Lei de Darcy para fluxo em solos não saturados, e mostra a variação do coeficiente de permeabilidade para diferentes valores de umidade volumétrica em dois tipos de areia e em pó de ardósia.

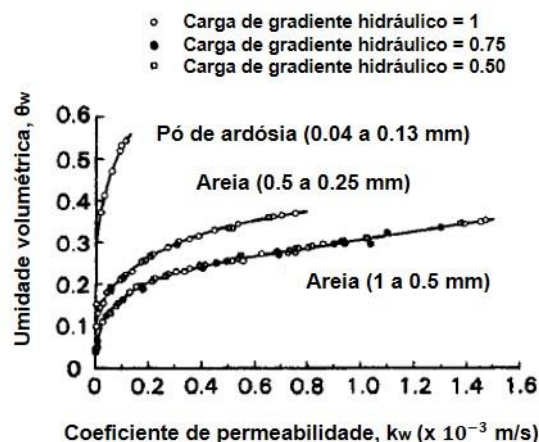


Figura 2.22: Variação do coeficiente de permeabilidade com a umidade volumétrica em dois tipos de areia e em pó de ardósia (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993)

2.2.1. Modelos matemáticos para condutividade hidráulica não saturada

Uma variedade de modelos matemáticos foi desenvolvida para modelar a condutividade hidráulica não saturada em função da umidade volumétrica ou da sucção do solo. Nesse trabalho são expostos apenas três modelos, a saber:

Brooks & Corey (1964), van Genuchten (1980) e Fredlund *et al.* (1994), modelos estes que acompanham os apresentados para representar a curva característica.

2.2.1.1.

Modelo de Brooks & Corey (1964)

O modelo de Brooks & Corey (1964) propõe uma relação entre condutividade hidráulica e sucção, como mostra a Eq. (2.17):

$$k(\psi) = \begin{cases} k_s & \psi \leq \psi_b \\ k_s \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\eta & \psi > \psi_b \end{cases} \quad (2.17)$$

onde:

k_s : condutividade hidráulica saturada;

ψ_b : pressão de entrada de ar (ver curva característica - Figura 2.9);

η : expoente relacionado ao índice de distribuição granulométrica λ do modelo de curva característica do modelo de Brooks & Corey (1964). É calculado pela Eq. (2.18):

$$\eta = 2 + 3\lambda \quad (2.18)$$

A Figura 2.23 mostra uma curva de condutividade hidráulica em função da sucção do solo para um tipo de areia modelada através do modelo de Brooks & Corey (1964).

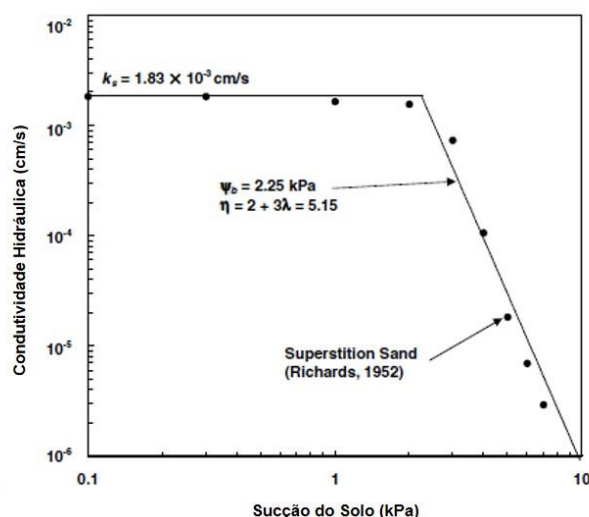


Figura 2.23: Condutividade hidráulica em função da sucção do solo para um tipo de areia usando o modelo de Brooks & Corey (1964) (adaptado de Lu & Likos, 2004).

Lu & Likos (2004) afirmam que o modelo de Brooks & Corey (1964) é limitada a solos de granulometria relativamente grosseira, uma vez que tal modelo foi desenvolvido utilizando valores mínimos de sucção, de aproximadamente 20 kPa.

2.2.1.2.

Modelo de van Genuchten (1980)

O modelo de Van Genuchten (1980) fornece valores de condutividade hidráulica k através da condutividade hidráulica relativa $k_r(\psi)$, conforme mostram a Eq. (2.19) e a Eq. (2.20):

$$k(\psi) = k_s \cdot k_r(\psi) \quad (2.19)$$

e

$$k_r(\psi) = \frac{\left[1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}\right]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}} \quad (2.20)$$

onde:

k_s : condutividade hidráulica saturada;

α : parâmetro relacionado à pressão de entrada de ar. É obtido pela Eq. (2.11);

n : parâmetro relacionado à distribuição dos poros no solo;

m : parâmetro relacionado ao formato da curva característica. É obtido pela Eq. (2.12).

A Figura 2.24 mostra uma curva de condutividade hidráulica relativa em função da sucção mátrica modelada através do modelo de van Genuchten (1980).

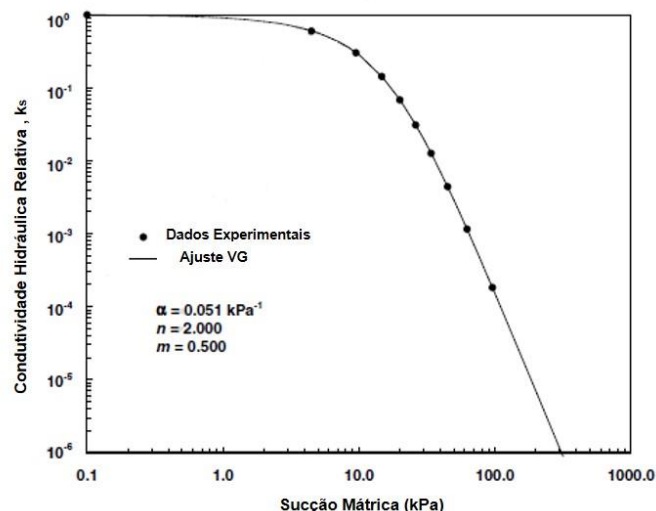


Figura 2.24: Condutividade hidráulica relativa em função da sucção mátrica segundo o modelo de van Genuchten (1980) para parâmetros α , n e m pré-definidos (adaptado de Lu & Likos, 2004).

2.2.1.3. Modelo de Fredlund *et al.* (1994)

O modelo de Fredlund *et al.* (1994) permite calcular a condutividade hidráulica relativa através da Eq. (2.21):

$$k_r(\psi) = \theta^q(\psi) \frac{\int_y^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{aev})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (2.21)$$

onde:

y : variável de integração que representa $\ln(\Psi)$;

$b = \ln(10^6)$ kPa;

ψ_{aev} : pressão de entrada de ar;

θ' : derivada da Eq. (2.13) em relação à Ψ ;

θ^q : fator de correção que considera a tortuosidade dos poros, em que o expoente q é tipicamente igual a 1.

Para o cálculo da condutividade hidráulica k , a Eq. (2.19) deve ser usada.

2.3. Sistemas de alerta de risco

Regiões serranas ou de relevo altamente acidentado possuem muitas áreas de risco de deslizamento, que costumam trazer prejuízos econômicos, além das perdas humanas. Intervenções de engenharia com o intuito de sanar os riscos são comumente inviáveis sob o ponto de vista econômico. Assim, uma forma de prevenir as perdas e de mitigar os riscos é através da implantação de sistemas de alerta.

No Brasil, o sistema mais comum é a medição pluviométrica associada à emissão de alertas por sirenes e via mensagem SMS para os moradores da região de risco, sempre que os valores de chuva ultrapassam determinados limites pré-estabelecidos. Infelizmente, o sistema parece não ser 100% eficiente, já que a população muitas vezes não obedece o soar das sirenes, e as mensagens via SMS, quando emitidas com atraso, incapacitam o preparo da população para as fortes chuvas que se aproximam. A população parece não confiar nas informações transmitidas, ou nos alertas soados, por conta dos vários falsos alarmes já ocorridos ao longo dos anos, consequência de um sistema que precisa ser conservador por lidar com vidas e não com regiões inabitadas ou pouco habitadas.

De fato, a elaboração de um sistema de alerta não é trabalho fácil. Uchimura *et al.* (2015) destacam a necessidade de estabelecer com clareza a região instável para tornar possível a definição do tipo e da localização exata da instrumentação adequada a ser instalada. Intriери *et al.* (2012) reiteram que sistemas de monitoramento envolvem outros aspectos, como a identificação de cenários de risco, a elaboração de planos de emergência, o treinamento adequado da população para entender os alertas emitidos, considerações sociais, e que a falha de qualquer um desses elementos pode inutilizar o sistema. A questão financeira é outro problema, muitas vezes impeditivo, pois monitorar uma região demanda uma série de instrumentos custosos. Não obstante, as perdas causadas por um desastre são infinitamente maiores do que os investimentos em prevenção.

Atualmente, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de criar sistemas de alerta eficientes e economicamente viáveis para os diversos cenários de risco existentes. A Itália se destaca nesse ramo, pois possui regiões montanhosas de alto risco para a população. Brunetti *et al.* (2018) buscaram avaliar a capacidade de diferentes satélites para prever a ocorrência espacial / temporal de deslizamentos provocados por chuva usando limites pluviométricos, e concluíram que, após alguns ajustes, os satélites podem ser uma importante

fonte de dados para o desenvolvimento de sistemas de alerta a nível continental ou global. Melillo *et al.* (2018) desenvolveram uma ferramenta denominada CTRL-T (*Calculation of Thresholds for Rainfall-induced Landslides – Tool*) que calcula automaticamente e com objetividade os limites de chuva capazes de causar rupturas. É importante destacar que a determinação empírica de limites de chuva é uma das ferramentas mais utilizadas para prever rupturas de talude provocadas por chuva. De Luca & Versage (2016) também trabalharam em uma formulação geral empírica para descrever esses limites. Quanto à prevenção de deslizamentos de blocos rochosos, Intrieri *et al.* (2012) desenvolveram e implementaram com sucesso um sistema de alerta munido de extensômetros, pluviômetro, termômetro e monitoramento via RADAR em um talude rochoso. Dunnicliff (1988) define extensômetros como instrumentos que medem a variação da distância (aproximação ou afastamento) entre dois pontos de uma superfície. Usá-los no monitoramento superficial de fraturas rochosas pode ser mais acessível economicamente em relação à outras técnicas de monitoramento subsuperficial.

O continente asiático também sofre com transtornos provocados por deslizamentos e procura soluções através da pesquisa. Uchimura *et al.* (2015) instalaram “*tilt sensors*” – sensores que medem rotação – e sensores de umidade volumétrica em camadas superficiais e profundas de taludes localizados no Japão e na China. Através de monitoramento, foi observado que: no caso de as variações de angulação não cessarem em um determinado período, a ruptura era iminente. Isso permitiu a elaboração de um sistema de monitoramento com limites pré-estabelecidos de variação angular dos sensores. Na Índia, Naidu *et al.* (2018) uniram limites pluviométricos com análises de estabilidade para desenvolver um sistema de alerta de deslizamentos superficiais – as análises de estabilidade serviram para delimitar as regiões que mereciam observação mais cuidadosa. Na Tailândia, Biansoongnern *et al.* (2016) desenvolveram uma haste de aço inoxidável com um sensor que consegue amplificar vibrações (Figura 2.25), e as informações obtidas são enviadas via wi-fi para uma base distante. Nesse sistema, os limites de segurança são modificados constantemente através de comparações entre o que é medido em campo e o que se tem registrado até o momento, desde que se constate que não houve ruptura.

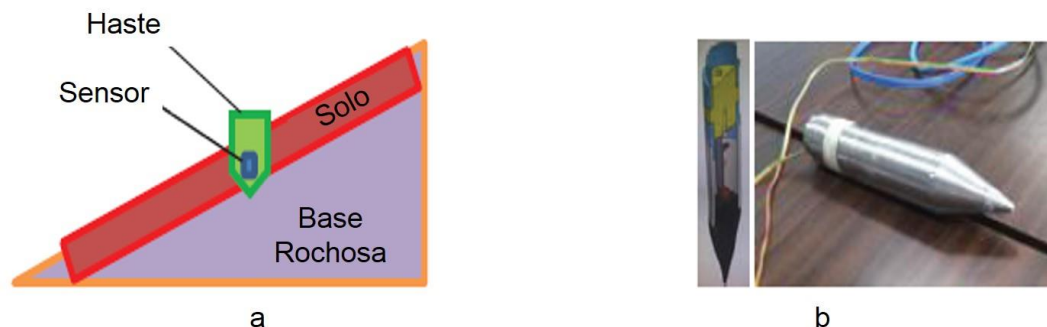


Figura 2.25: Instrumentação usada por Biansoongnern *et al.* (2016): a) Modo de instalação do sensor; b) Haste de aço inoxidável com o sensor que amplifica vibrações (adaptado de Biansoongnern *et al.*, 2016).

No Brasil, muitos trabalhos foram e estão sendo feitos para encontrar curvas que representem o limite pluviométrico de determinada região, fazendo correlações entre as chuvas horárias e as chuvas com certo acumulado e avaliando as ocorrências de deslizamentos. Alguns exemplos podem ser citados: Tatizana *et al.* (1987), que buscaram desenvolver envoltórias de escorregamento para Cubatão/SP; Molina *et al.* (2015), que estudaram essa relação no município de São Bernardo do Campo/SP; e Silva (2014), que focou nas encostas da Rodovia BR-116/RJ (Rio – Teresópolis). Já o CEMADEN (2019) (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), através do projeto Redegeo, iniciou a instalação de PCDs Geotécnicas (Plataformas de Coleta de Dados Geotécnicos) em Pernambuco. As PCDs são compostas por pluviômetros e sensores de umidade do solo (Figura 2.26) e visam monitorar o risco de deslizamentos em encostas urbanas e aprimorar os alertas de risco. Estão previstas novas instalações em outras regiões do país.

É importante, também, destacar o trabalho de alguns órgãos para auxiliar na prevenção de desastres associados a deslizamentos. A Geo-Rio (2019) (Fundação Instituto de Geotecnia), fundada após os eventos chuvosos de 1966, possui o Sistema Alerta Rio, que monitora as chuvas na cidade do Rio de Janeiro através de 33 estações pluviométricas espalhadas pela cidade. Com análises das condições meteorológicas, o sistema divulga alertas para a retirada de famílias das regiões de risco, além de permitir ações preventivas por parte dos órgãos municipais. As informações coletadas pelas estações pluviométricas permitem a atualização constante dos limites de risco estabelecidos. O DRM-RJ (2013) (Departamento de Recursos Minerais) vem realizando, desde 2010, a confecção de mapas de risco iminente dos municípios fluminenses. O IPT (2019) (Instituto

de Pesquisas Tecnológicas) também colabora com a elaboração de cartas geotécnicas de áreas urbanas brasileiras, e entre 2013 e 2015 elaborou cartas de suscetibilidade para 111 municípios dos estados de ES, MG, PR, SC e SP com o auxílio do CPRM (Serviço Geológico do Brasil).



Figura 2.26: PCD usada pelo CEMADEN com pluviômetro e sensores de umidade do solo (CEMADEN, 2019).

Nacinovic (2013), Brandt (2015) e Mahler *et al.* (2018) elaboraram uma rede neural sem peso para prever a umidade futura no solo a partir de dados das sondas TDR e de pluviômetros. O termo “sem peso” indica que os dados obtidos através das sondas TDR – umidade volumétrica e temperatura do solo – e dos pluviômetros não possuíam diferenciações de importância, sendo tratados com o mesmo peso. Foram usados os seguintes atributos: dados de precipitação, temperatura do solo, índice de chuva acumulada em 30 minutos, tempo de seca e horário do dia. A média de acertos de previsão de umidade foi de 96,625%, valor bastante satisfatório que possibilita o uso de redes neurais em sistemas de alerta.

3

Materiais e Métodos

3.1.

Introdução

Este trabalho consiste na obtenção de dados de chuva, umidade e sucção do solo em estudo. Para tal, teve-se disponível uma estação meteorológica, quatro sondas TDR e um tensiômetro. Antes da instalação dessa instrumentação, foram necessárias adaptações, montagem e calibração em laboratório, de modo que todo o equipamento pudesse ser testado e que se pudesse comprovar seu perfeito funcionamento.

Após a instalação em campo, foram necessários alguns ensaios para a obtenção dos dados desejados. Os tensiômetros requerem uma curva característica para relacionar a sucção obtida com a umidade do solo; já as sondas tipo TDR usam tal curva para obter as sucções a partir das umidades volumétricas medidas. Também foi fundamental a realização de ensaios de caracterização do solo, além da obtenção de seu coeficiente de permeabilidade (condutividade hidráulica) na condição saturada.

Tais etapas são descritas em detalhes nos tópicos abaixo.

3.2.

Adaptações, montagem e calibrações pré-instalação em campo

3.2.1.

Datalogger

Nesse trabalho foi utilizada a estação meteorológica da marca Vaisala® modelo MAWS 100, adquirida em 2010. Ela é constituída de um datalogger (Figura 3.1), um pluviômetro, uma placa solar e uma antena para a transmissão de dados via internet.



Figura 3.1: Datalogger Vaisala® modelo MAWS 100.

O datalogger possuía, inicialmente, apenas três saídas para a conexão de tensiômetros. Foi necessária uma adaptação elétrica/eletrônica para possibilitar a conexão de outros instrumentos. Ao final desse processo, o equipamento permitia a leitura de quatro tensiômetros e de quatro sondas tipo TDR. A Figura 3.2 mostra o datalogger já adaptado.



Figura 3.2: Datalogger após as adaptações, contendo quatro saídas para a conexão de tensiômetro e quatro saídas para a conexão de TDRs.

Cada tensiômetro foi conectado a um canal analógico individual. Já as sondas tipo TDR possuíam sinal digital, e todas foram ligadas a um único canal denominado SDI-12. A identificação desse tipo de instrumentação digital é feita

através de um endereçamento individual – TDRs novos possuem endereço “zero” e podem ser nomeados de zero a nove, de A a Z maiúsculo ou minúsculo; já TDRs usados que já tenham sido endereçados previamente não precisam de um novo endereço. As sondas tipo TDR usadas são da marca Campbell® modelo CS650 (Figura 3.3).

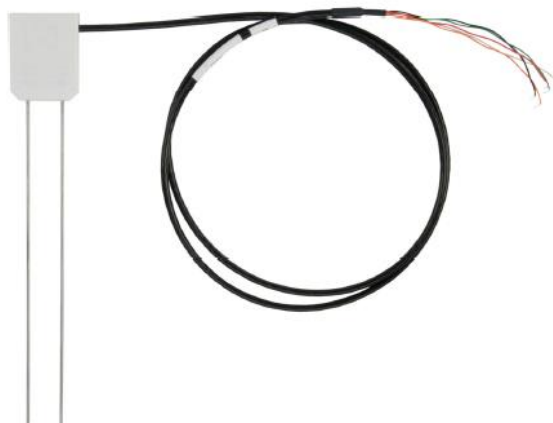


Figura 3.3: TDR Campbell® modelo CS650.

Outra questão importante é a telemetria: o datalogger usado possui um modem GSM e permite a transmissão de dados em tempo real. Para isso, foi necessário adquirir um chip de dados e contratar um plano de internet (nesse trabalho foi contratado um plano de 20 GB da operadora Claro). É fundamental que o sinal da operadora seja de qualidade no local da instalação do datalogger.

Também foi necessário adquirir um domínio na internet para obter um endereço FTP (File Transfer Protocol), que recebe os dados e os armazena para acesso em qualquer local e momento. Nesse trabalho foi contratado um domínio no site “go daddy”, que forneceu o diretório, o servidor FTP, um login e uma senha (criados pela autora). Esses dados foram passados para o programador da Hobeco, representante da Vaisala® no Brasil.

Infelizmente, houve algum problema no modem que impossibilitou a transmissão dos dados via internet. Possivelmente a tecnologia de 2010 era muito diferente da atual e incompatibilidades entre o modem e o chip fizeram com que o modem não permanecesse ligado para as transmissões.

Qualquer informação nova (como os dados acima ou dados obtidos por calibração) deveria ser repassada para o programador da Hobeco, que gerava um novo programa para o datalogger. Esse programa era instalado no datalogger através de um computador com o software “AWS Client”, fornecido pela Vaisala®.

3.2.2. Tensiômetro

O tensiômetro utilizado nesse trabalho foi confeccionado por Mahler *et al.* (2004). Ele é composto por um corpo acrílico, uma pedra porosa e um transdutor de pressão. Para conseguir alcançar valores de sucção acima dos 100 kPa, ele possui algumas singularidades de projeto, desenvolvidas por Diene (2004), Diene & Mahler (2007) e Mahler & Souza (2004), que serão resumidas a seguir:

- A pedra porosa, de material cerâmico, possui alta pressão de entrada de ar (15 bar ou 1500 kPa). Ela é confeccionada de modo que seus poros sejam interconectados, permitindo o fluxo contínuo de água;
- O corpo acrílico possui um pequeno recipiente de água destilada e deaerada entre a pedra porosa e o transdutor de pressão. O tamanho pequeno ajuda a evitar a ocorrência de cavitação. Além disso, foi escolhido o material acrílico por ser mais liso, o que evita a concentração de pequenas bolhas de ar em sua superfície;
- O transdutor, da marca Ashcroft® modelo K1 (Figura 3.4), inicialmente alcançava baixos valores de sucção (próximo a 50 kPa), conforme mostrado por Nacinovic (2009). Para ser utilizado nesse projeto, o transdutor teve uma trava eletrônica retirada. Dessa forma, ele consegue fazer leituras de pressões positivas e negativas (conforme mostra a calibração, apresentada nos itens 3.2.2.1 e 4.6.1).



Figura 3.4: Transdutor de pressão Ashcroft® modelo K1.

3.2.2.1. Calibração do transdutor de pressão

A calibração do transdutor de pressão é uma importante etapa através da qual as pressões aplicadas em laboratório são correlacionadas com as leituras efetuadas pelo transdutor de pressão, em mV.

Inicialmente foi realizada a calibração de pressões positivas no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ pelo Eng.º Sérgio Iorio. O transdutor foi saturado e conectado a um autocompensador de coluna de mercúrio. (Figura 3.5).



Figura 3.5: Calibração do transdutor de pressão do tensiômetro para pressões positivas.

A saturação do transdutor com água destilada e deaerada foi feita através de um pisete (Figura 3.6). Cuidados foram tomados para que o pisete não encostasse na membrana do transdutor, pois esta é muito sensível e pode ser perfurada ou danificada. Além disso, a água deve ser introduzida de dentro para fora, buscando retirar possíveis bolhas.

Para realizar as leituras, o transdutor foi conectado ao datalogger, e este foi conectado a um computador com o software “AWS Client”.

Foram realizados dois ciclos de pressões positivas variando de 0 a 552 kPa. Segue abaixo um gráfico (Figura 3.7) com o resultado da calibração.



Figura 3.6: Saturação do transdutor de pressão do tensiômetro com o auxílio de um pissete.

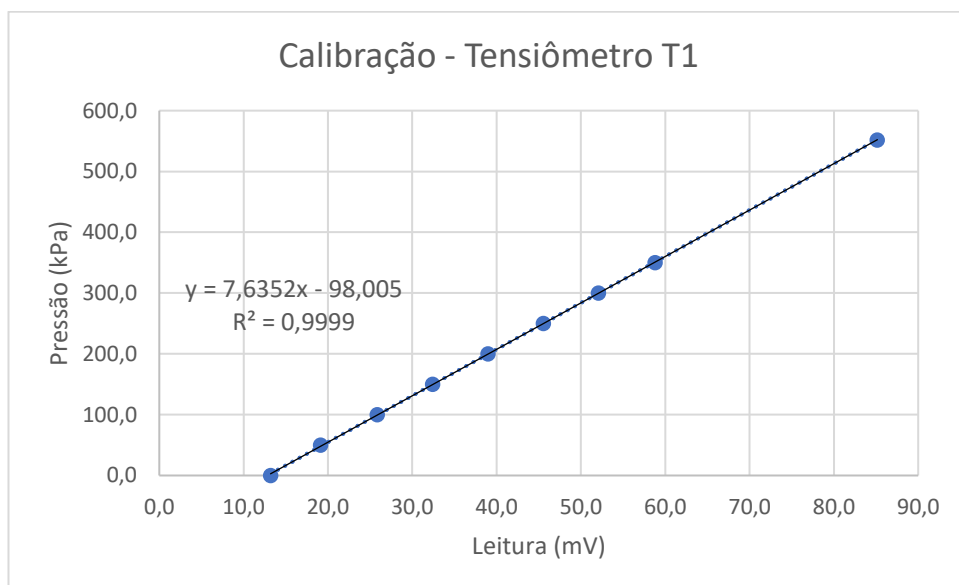


Figura 3.7: Gráfico do resultado da calibração com colunas de mercúrio.

Para a calibração de pressões negativas, foi utilizada seringa com um sistema de rosca capaz de transmitir ao transdutor pressões positivas e negativas manualmente (Figura 3.8), de autoria do Eng.º Ricardo Gil, da COPPE/UFRJ.



Figura 3.8: Seringa para calibração manual.

Os mesmos cuidados já citados anteriormente com a saturação do transdutor foram tomados. Através de mangueiras transparentes, o transdutor foi conectado à seringa e a um manômetro digital, para que as pressões transmitidas pela seringa pudessem ser medidas (Figura 3.9). O transdutor foi conectado ao datalogger, e este foi conectado a um computador, esquema igual ao realizado para a calibração de pressões positivas.

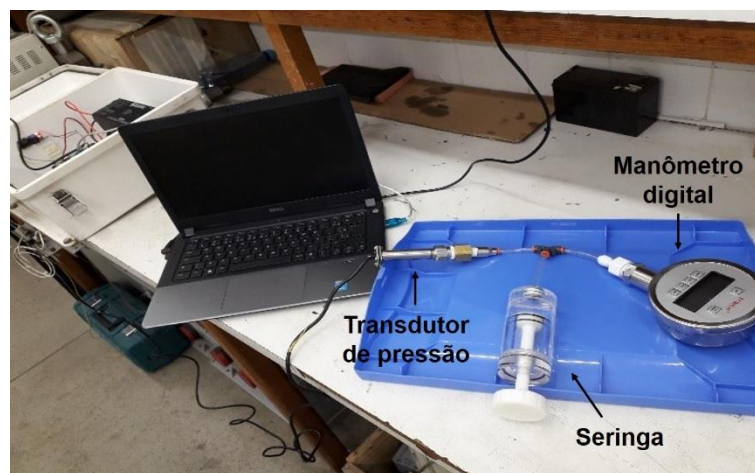


Figura 3.9: Sistema de aplicação de pressões positivas e negativas através da seringa ao transdutor de pressão do tensiômetro.

Foram realizados dois ciclos de pressões variando de 0 a 200 kPa e de 0 a - 60 kPa. Segue um gráfico (Figura 3.10) com o resultado da calibração.

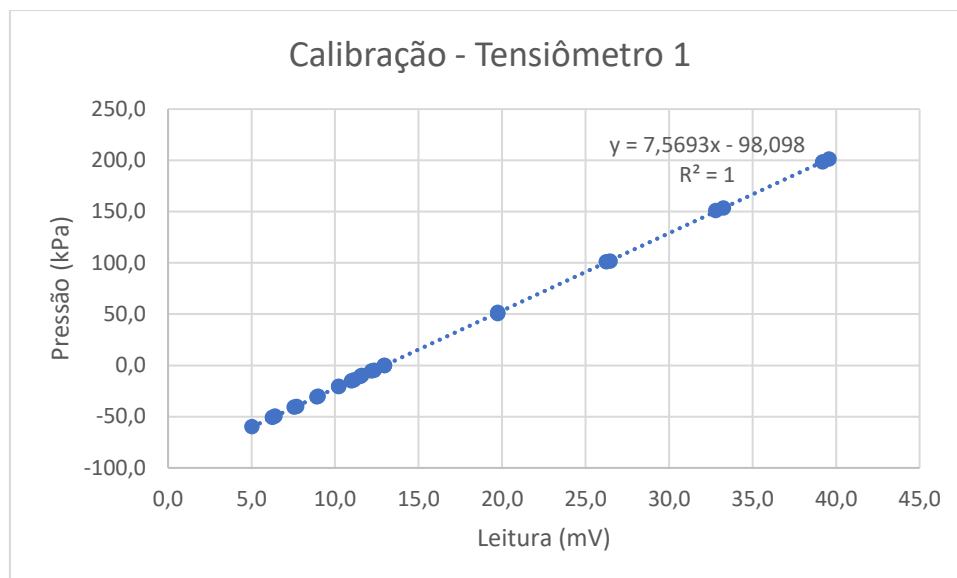


Figura 3.10: Gráfico do resultado da calibração do transdutor de pressão do tensiômetro realizada com a seringa.

3.2.2.2. Saturação da pedra porosa

A pedra porosa do tensiômetro foi colada no corpo acrílico com cola Araldite®. Possíveis impurezas nela contidas foram retiradas através de um aparelho de ultrassom.

Para o correto funcionamento do tensiômetro, é necessário garantir a total saturação da pedra porosa. Para tal, o corpo acrílico com a pedra já colada foi colocado em uma câmara de calibração totalmente vedada, e nela foi aplicado vácuo por um período de um dia. Após esse período, foi permitida a entrada de água destilada e deaerada na câmara até que a água atingisse uma determinada altura incapaz de saturar a pedra porosa por fluxo descendente. O objetivo seria forçar o fluxo ascendente, através da pedra. Assim que a água alcançasse uma altura por dentro do corpo acrílico, considerou-se que a pedra estava saturada. Tal procedimento durou aproximadamente um dia. A Figura 3.11 mostra a saturação da pedra porosa dentro da câmara de calibração e a Figura 3.12 mostra uma ilustração que esquematiza o procedimento.



Figura 3.11: Saturação da pedra porosa do tensiômetro.

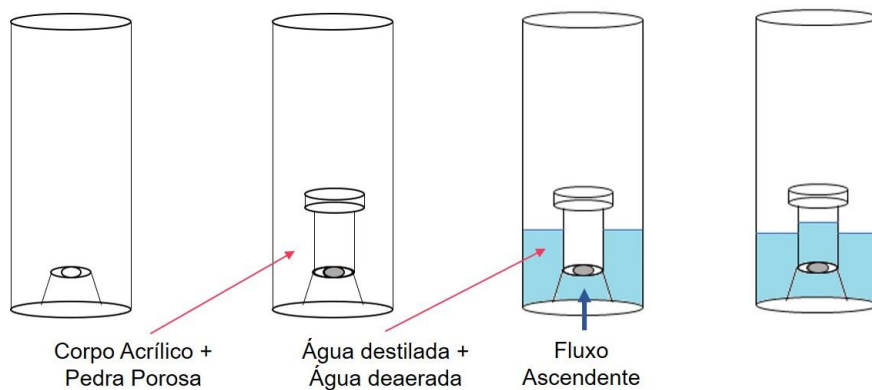


Figura 3.12: Esquema ilustrativo da saturação da pedra porosa do tensiômetro.

Para verificar se a pedra porosa estava devidamente saturada, o tensiômetro foi mergulhado em água após a sua montagem e uma leitura foi realizada. A pressão atingiu “zero” em pouquíssimo tempo, e o rápido tempo de resposta indicou uma boa saturação (Vilar, 2018).

3.2.2.3. Montagem do tensiômetro

A conexão entre o corpo acrílico e o transdutor de pressão é um procedimento repleto de cuidados, que são descritos a seguir:

- O transdutor de pressão possui um pequeno tubo para a passagem de ar (as pressões medidas são relativas). Esse tubo foi coberto com fita isolante para que o transdutor não fosse danificado;
- O transdutor de pressão foi, então, saturado com água destilada e deaerada com o auxílio de um pisquete. Como já descrito no item 3.2.2.1, o pisquete não pode encostar na membrana do transdutor para que ela não seja danificada. O objetivo é permitir a continuidade entre a água do transdutor e a água contida no recipiente do corpo acrílico;
- Um o-ring foi colocado abaixo da rosca do transdutor no corpo acrílico para que não ocorresse perda de pressão. Além disso, a rosca do transdutor foi envolta por fita veda rosca (teflon), para o mesmo propósito. O transdutor deve ser rosqueado no corpo acrílico dentro de uma bacia com água destilada e deaerada, para que não ocorra dessaturação da pedra porosa (Figura 3.13). Uma das particularidades desse corpo acrílico é a presença de um canal cônico com rosca até a metade – ela deve ser mantida aberta durante essa etapa para que o rosqueamento do transdutor não gere sobrepressão, pois isso poderia danificar a membrana do transdutor;



Figura 3.13: Rosqueamento do transdutor de pressão no corpo acrílico.

- Finalmente, um pequeno parafuso foi lentamente aparafusado no canal cônico. As pressões geradas nesse processo devem ser monitoradas para evitar qualquer dano na membrana do transdutor de pressão. Ao longo desse processo, a tensão elétrica (mV) foi medida através de um multímetro – e pela curva de calibração previamente feita foram observadas pressões próximas a 150 kPa. O rosqueamento foi feito lentamente de modo a permitir a dissipação das pressões geradas. No final, foi alcançada a pressão zero.

A Figura 3.14 mostra o processo. Apesar de a imagem mostrar o parafuso envolto em fita veda rosca, foi observado que isso não era necessário, pois a vedação do parafuso já era suficiente e a vedação extra dificultava a dissipação das pressões geradas.

O tensiômetro foi preparado em laboratório para ser transportado para a instalação em campo. Para mantê-lo sempre submerso em água deaerada, ele foi transportado dentro de uma garrafa PET cortada, com água. Para evitar o vazamento da água, a garrafa PET foi amarrada com braçadeiras de plástico, embalada com luva de silicone e ensacada, conforme mostra a Figura 3.15.



Figura 3.14: Colocação do parafuso no canal cônico.



Figura 3.15: Preparo do tensiômetro para o transporte para campo.

3.3. Instalação da instrumentação em campo

Após todo o trabalho de preparação em laboratório, a estação meteorológica, o tensiômetro e as sondas tipo TDR foram instalados na FASE/FMP, situada na Av. Barão do Rio Branco nº 1003, no centro da cidade de Petrópolis, no dia 5 de dezembro de 2018. O pluviômetro sofreu um atraso de uma semana para o preparo de sua base.

Um tubo de ferro foi chumbado no segundo patamar da encosta para ficar a prumo e suportar o datalogger, a antena e a placa solar (Figura 3.16).



Figura 3.16: Poste já instalado com o datalogger, a antena e a placa solar.

Os quatro TDRs foram dispostos de acordo com a Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Disposição dos TDRs em campo.

Nº TDR	Localização em campo
TDR 1	20 cm de profundidade no segundo patamar
TDR 2	20 cm de profundidade no quarto patamar
TDR 3	20 cm de profundidade no terceiro patamar
TDR 4	90 cm de profundidade no quarto patamar

O tensiômetro foi instalado no terceiro patamar da encosta. Para a sua instalação, foi feito um furo com trado boca de lobo de 20 cm de profundidade. Antes de colocá-lo no furo, um tubo de PVC de comprimento igual a 50 cm foi rosqueado em sua extremidade superior para proteger o transdutor e permitir seu contato com a atmosfera. Depois, ele foi colocado no furo e o espaço anelar entre o tubo de PVC e a parede do furo foi preenchido com o solo local. A Figura 3.17 mostra a instalação do tensiômetro em campo.

O pluviômetro foi instalado no terceiro patamar, o mais distante de possíveis interferências. Para a sua instalação, foi necessário fazer uma pequena base de concreto nivelada e chumbar o suporte do pluviômetro nessa base.



Figura 3.17: Instalação do tensiômetro em campo.

A Figura 3.18 mostra como ficou o local após a instalação da instrumentação. Já a Figura 3.19 representa um modelo esquemático de todos os equipamentos instalados em campo, localizando-os por patamar.

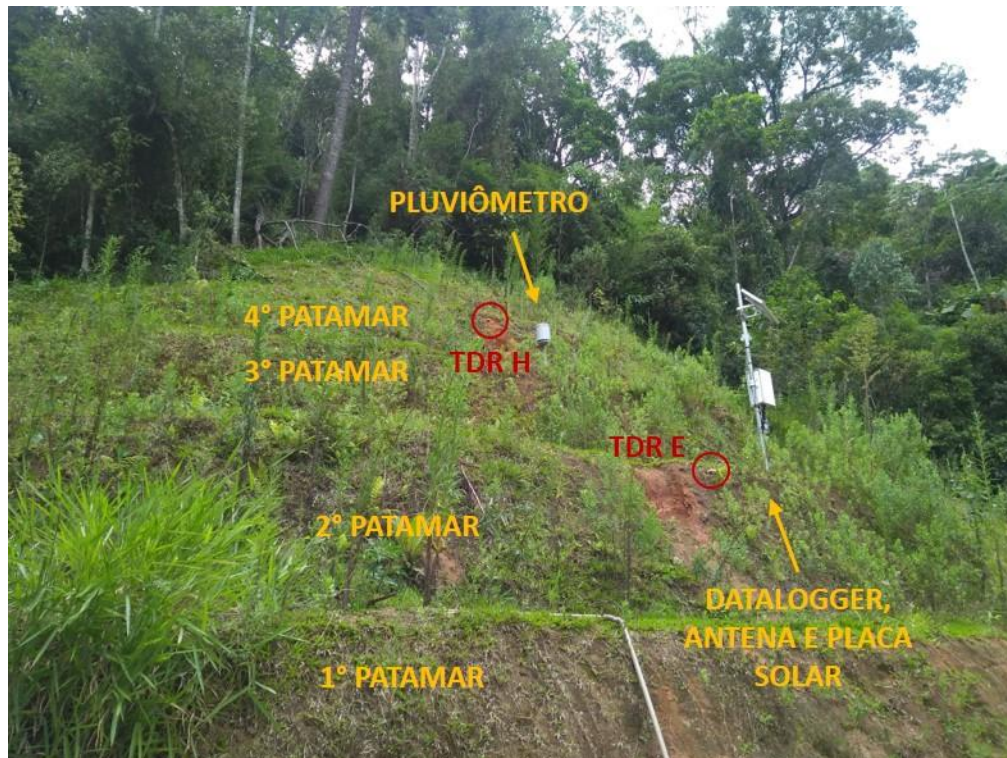


Figura 3.18: Localização dos instrumentos em campo.

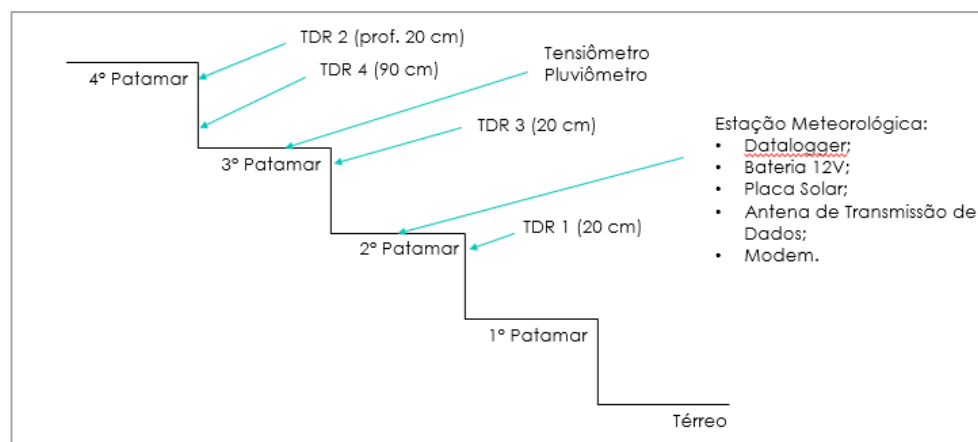


Figura 3.19: Modelo esquemático dos equipamentos instalados em campo.

O intuito de instalar essa instrumentação em campo é elaborar, futuramente, um sistema de alerta de deslizamentos. Os dados gerados pelos sensores são coletados e armazenados no datalogger; este possui um modem, que possibilita a transmissão desses dados via internet para uma futura estação centralizadora, responsável por receber e analisar tais dados de quantos locais for desejado. Havendo valores discrepantes da normalidade, essa estação tem a possibilidade

de acionar sirenes localizadas nas áreas de risco em tempo suficiente para que a população possa evacuar com segurança. A Figura 3.20 ilustra o esquema idealizado.

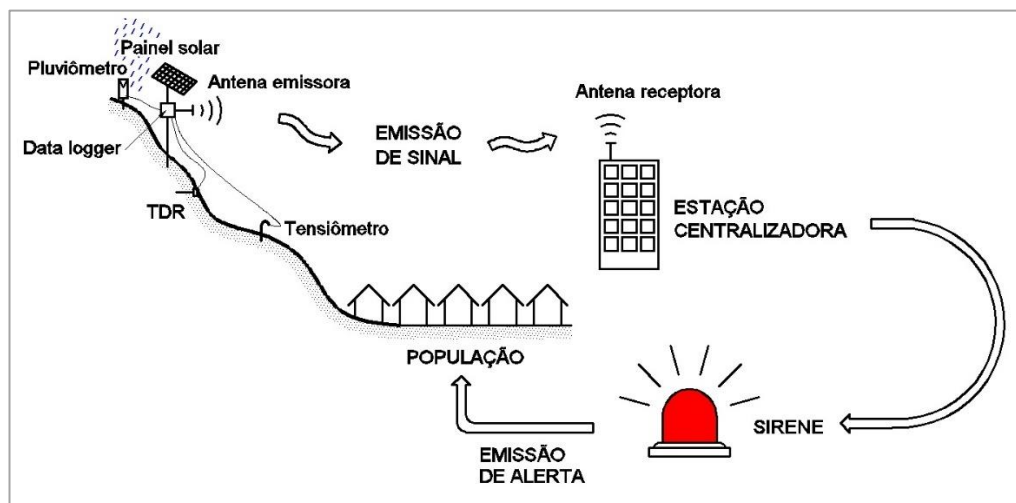


Figura 3.20: Modelo esquemático do sistema de alerta idealizado.

3.4. Coleta de amostras de solo em campo

Vinte anéis metálicos de aproximadamente 20 cm³ de volume foram utilizados para a coleta de amostras indeformadas para a execução de ensaios de papel filtro no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, visando a obtenção das curvas características de cada solo.

As amostras foram coletadas no segundo e no quarto patamares, sendo dez amostras em cada patamar (Figura 3.21). Foi tomada a decisão de coletar amostras separadas para cada patamar pela visível diferença dos tipos de solos. Para a coleta, foi feita uma escavação do talude nos patamares em estudo para retirar a vegetação superficial e possibilitar o contato direto com o solo.

Na falta de um amostrador adequado para o tamanho dos anéis, foi improvisado um tubo PVC que permitia a cravação sem comprometer a superfície das amostras. Após a cravação dos anéis, as amostras foram retiradas cuidadosamente com uma pá de pedreiro (Figura 3.22).

Todo o cuidado foi tomado para manter a integridade e o volume das amostras. Após o preparo, cada amostra indeformada foi envolvida em papel filme e em papel alumínio, visando manter sua integridade e sua umidade. Todas as amostras foram identificadas e colocadas cuidadosamente em uma caixa de

isopor com serragem para o transporte até o laboratório. Também foram retiradas amostras deformadas nos mesmos locais para ensaios de caracterização do solo. As amostras de solo coletadas nesse dia foram levadas para a câmara úmida do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC/Rio.



Figura 3.21: Locais de coleta das amostras de solo.



Figura 3.22: Retirada dos anéis do solo.

Uma nova coleta de onze amostras indeformadas retiradas do quarto patamar foi realizada com a participação do Eng.º Agrônomo e Pedólogo Dr. Maurício Rizzato Coelho, da EMBRAPA Solos. Os onze anéis metálicos possuem

aproximadamente 100 cm³ de volume. Essas amostras foram utilizadas para a execução de um novo ensaio de papel filtro no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Nessa segunda campanha, todas as amostras foram coletadas apenas no quarto patamar, pelo fato desse patamar estar menos alterado pela ação antrópica e porque os resultados gerados pelo primeiro ensaio geraram dúvidas, havendo a necessidade de uma nova bateria de ensaios para esclarecimentos. Elas foram retiradas a 20 cm de profundidade.

Um amostrador adequado foi usado para a cravação dos onze anéis no solo (Figura 3.23 e Figura 3.24). Após a cravação, cada anel foi retirado e os excessos de solo foram removidos (Figura 3.25). Após o preparo, suas extremidades foram vedadas com tampas de plástico (Figura 3.26). Todas as amostras foram cuidadosamente armazenadas em uma maleta acolchoada e apropriada e levadas para a COPPE/UFRJ, onde suas tampas foram retiradas e as amostras foram envolvidas com papel filme e papel alumínio para o seu armazenamento na câmara úmida.



Figura 3.23: Cravação do anel metálico no solo com um amostrador adequado.



Figura 3.24: Momento após a cravação dos onze anéis metálicos.



Figura 3.25: Retirada dos excessos de solo da amostra indeformada.



Figura 3.26: Amostra vedada com as tampas de plástico.

3.5.

Ensaio de caracterização

Foram realizados ensaios de caracterização dos solos localizados no segundo e no quarto patamares da região de estudo. A primeira bateria de ensaios ocorreu no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio e consistiu na caracterização dos dois patamares; a segunda bateria de ensaios ocorreu no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ e consistiu na caracterização de cinco horizontes localizados apenas no quarto patamar. Esses horizontes foram identificados pelo Eng.º Agrônomo e Pedólogo Dr. Maurício Rizzato Coelho, da EMBRAPA Solos.

A preparação das amostras deformadas para os ensaios de caracterização seguiu a norma ABNT NBR 6457 (2016). A análise granulométrica seguiu as recomendações da norma ABNT NBR 7181 (2016). A densidade dos grãos foi determinada pela norma DNER-ME 93-94 (1994). Os limites de plasticidade foram obtidos de acordo com a norma ABNT NBR 7180 (2016), e os limites de liquidez segundo a norma ABNT NBR 6459 (2016).

3.6.

Ensaio de papel filtro: obtenção das curvas características

Foram realizados três ensaios de papel filtro com as amostras indeformadas coletadas nos anéis metálicos com volume de 20 cm³ e de 100 cm³ para a obtenção das respectivas curvas características.

3.6.1.

Ensaio de papel filtro nas amostras coletadas de 20 cm³ de volume

Foram realizados dois ensaios de papel filtro com as vinte amostras indeformadas coletadas com os anéis metálicos de 20 cm³ de volume para a obtenção das curvas características dos solos do segundo e do quarto patamares do local de instalação da estação meteorológica – sendo utilizadas dez amostras indeformadas para cada curva. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio de acordo com o procedimento descrito em Villar (2002), sob supervisão do Eng.º Edson Silva e com o auxílio do técnico Amaury Cardoso Fraga. Ao longo do ensaio, uma amostra de cada curva foi descartada por perda excessiva de material.

A primeira etapa foi a determinação da umidade máxima e da umidade mínima do solo de cada curva. O procedimento adotado é descrito abaixo:

- Para a determinação da umidade mínima, uma das dez amostras foi deixada secando ao ar por 3 dias (Figura 3.27). A amostra foi pesada no segundo e no terceiro dia, e foi verificado que não havia mais variação de sua massa, o que atestava a sua umidade mínima (umidade higroscópica);



Figura 3.27: Amostras secando ao ar para a determinação da umidade mínima.

- Para a determinação da umidade máxima, foi preparado um recipiente com água, uma pedra porosa e um papel filtro. Uma das nove amostras restantes foi colocada em cima do papel filtro para que pudesse ser umedecida por fluxo ascendente. Para acelerar o processo, foram pingadas algumas gotas de água em cima da amostra com um conta gotas. Esse procedimento foi repetido algumas vezes ao longo dos 3 dias. O recipiente foi embrulhado com papel filme para evitar perda de umidade (Figura 3.28).



Figura 3.28: Amostras colocadas dentro do recipiente preparado para determinação da umidade máxima.

Todas as amostras foram pesadas antes do início dos procedimentos descritos acima. Em seguida, as amostras foram novamente pesadas, e foram calculadas a porcentagem de perda de massa da amostra com umidade mínima e a porcentagem de ganho de massa da amostra com umidade máxima. Uma terceira amostra de cada patamar foi escolhida para representar a umidade natural de campo. Após as pesagens, as amostras foram preparadas para o ensaio, o que consistiu na colocação do papel filtro na amostra (Figura 3.29). Foi utilizado papel filtro Whatman #42. As amostras úmidas receberam dois papéis filtro, enquanto as amostras secas receberam apenas um. Após a colocação de papel filtro em ambas as extremidades da amostra, sem contato direto das mãos, a amostra foi embrulhada com papel filme, papel alumínio e papel filme novamente. Feito isso, cada amostra foi identificada (Figura 3.30) e colocada dentro de um isopor.



Figura 3.29: Amostra com o papel filtro posicionado em suas extremidades.



Figura 3.30: Amostra pronta para o ensaio.

- Diante das porcentagens, foram calculadas as massas desejadas das sete amostras restantes. As amostras selecionadas para o ramo seco da curva foram deixadas secando ao ar, enquanto as amostras selecionadas para o ramo úmido foram cuidadosamente umedecidas com um conta gotas. Ao longo do tempo, as amostras eram pesadas e suas massas eram comparadas com as desejadas. Ao atingir o valor desejado, as amostras eram preparadas para o ensaio, seguindo o procedimento já descrito. Por fim, o isopor com as amostras foi colocado na câmara úmida por 21 dias para uma adequada equalização das umidades da amostra e do papel filtro.

Após 21 dias de equalização, as amostras foram retiradas da câmara úmida para a finalização do ensaio. O procedimento seguiu as seguintes etapas:

- Cada amostra foi aberta para a rápida pesagem do papel filtro. O primeiro papel retirado foi arbitrariamente escolhido como sendo “topo”, e o segundo, da outra extremidade, como sendo “base”. Foram anotadas suas massas correspondentes aos tempos de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 segundos. Observou-se pequena perda de umidade, devidamente registrada. A amostra também foi pesada. Feito isso, amostras de solo e papéis filtro do topo e da base da amostra foram colocados em uma estufa a 110°C.
OBS: Como as amostras úmidas possuíam dois papéis filtro tanto no topo quanto na base, apenas o papel externo foi pesado – o papel em contato direto com o solo possuía muitas partículas de solo, o que poderia interferir no resultado;
- Passadas 3 horas, o procedimento para pesagem dos papéis filtro foi repetido. Dessa vez, observou-se pequeno ganho de umidade dos papéis filtro no decorrer dos segundos, com as massas também sendo anotadas nos mesmos períodos de tempo;
- Passadas 24 horas do final da primeira etapa, as amostras foram novamente pesadas.

Com todos os dados anotados, foi utilizada uma planilha no software Excel para a obtenção dos pontos sucção – umidade volumétrica do solo do segundo e do quarto patamares. Esses pontos foram inseridos no site SWRC Fit (Seki, 2007), que gerou as curvas características dos modelos selecionados: Brooks & Corey (1964), van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994).

3.6.2.

Ensaio de papel filtro nas amostras coletadas de 100 cm³ de volume

As onze amostras indeformadas coletadas em anéis metálicos de 100 cm³ de volume foram usadas para a realização de um novo ensaio do papel filtro referente ao quarto patamar, realizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

No preparo do ensaio, o objetivo foi fazer com que as amostras atingissem diferentes umidades volumétricas para que se obtivessem diferentes sucções em pontos não muito próximos da curva. Uma amostra foi escolhida para representar a umidade volumétrica mínima. Ela foi deixada alguns dias na estufa a 105 °C, pesada 30 minutos após a sua retirada e preparada para o ensaio. As amostras que representavam as maiores umidades volumétricas tiveram água adicionada com uma pipeta eletrônica (Figura 3.31), e as outras amostras foram deixadas secando ao ar até que se atingisse a umidade volumétrica necessária (Figura 3.32). Como as amostras foram coletadas após um período chuvoso, elas apresentavam grande saturação – isso fez com que uma parte das amostras (as que representariam as menores umidades volumétricas) tivesse a necessidade de secar ao ar por mais tempo.



Figura 3.31: Umedecimento das amostras que representavam as maiores umidades volumétricas com uma pipeta eletrônica.



Figura 3.32: As amostras que precisavam perder umidade foram deixadas secando ao ar.

Assim que as amostras atingiram as umidades volumétricas desejadas, foram colocados três papéis filtro do tipo Whatman #42 em suas extremidades (Figura 3.33). Em seguida, cada amostra foi embrulhada em papel filme (Figura 3.34), papel alumínio (Figura 3.35) e fita crepe (Figura 3.36), sem contato direto das mãos. Feito isso, elas foram identificadas e colocadas dentro de uma bandeja, que foi levada para a câmara úmida.



Figura 3.33: Colocação dos três papéis filtros nas extremidades da amostra.



Figura 3.34: Amostra envolvida com papel filme.



Figura 3.35: Amostra envolvida com papel alumínio, após a colocação do papel filme.



Figura 3.36: Amostra pronta para o ensaio.

Após um mês de equalização, as amostras foram retiradas da câmara úmida para a finalização do ensaio. Os papéis filtro diretamente em contato com a amostra e os papéis filtro das extremidades externas foram descartados; aqueles localizados entre os dois descartados foram colocados dentro de um dessecador para o transporte até a balança (Figura 3.37). Individualmente, os papéis filtro foram embalados em um plástico ziplock para evitar perda de umidade e pesados em uma balança com cúpula (Figura 3.38). Após as pesagens, os papéis filtro foram organizados e identificados em uma travessa de vidro para a secagem em uma estufa a 105°C por 24 horas (Figura 3.39). Passadas as 24 horas, os papéis filtro foram novamente pesados. Já as amostras foram secas em estufa a 105°C para a obtenção da umidade.



Figura 3.37: Colocação dos papéis filtro no dessecador para evitar perda de umidade.

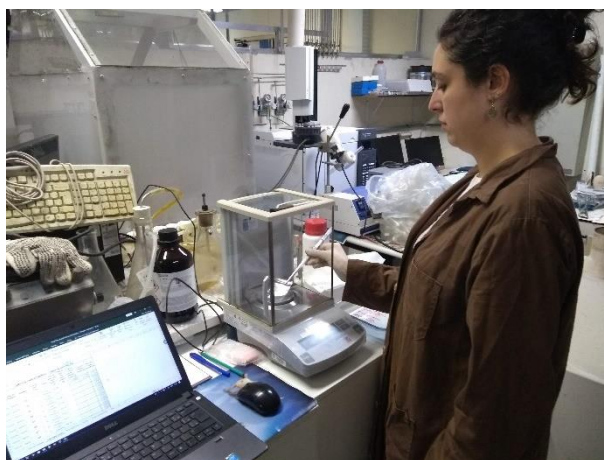


Figura 3.38: Pesagem do papel filtro envolto em plástico ziplock em uma balança com cúpula.

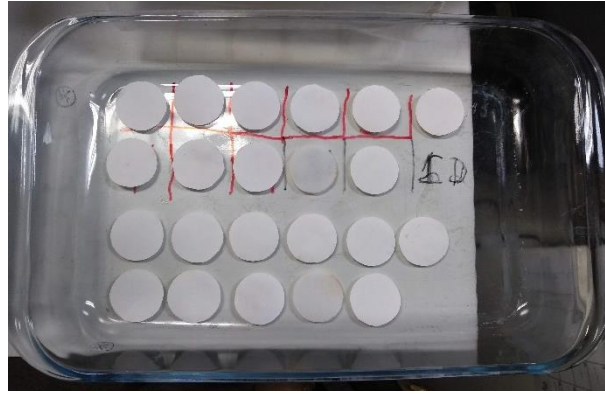


Figura 3.39: Papéis filtro organizados em uma travessa de vidro para secagem em estufa a 105°C.

Com todos os dados anotados, foi utilizada uma planilha no software Excel para a obtenção dos pontos sucção – umidade volumétrica do solo do quarto patamar. Novamente, os pontos foram inseridos no site SWRC Fit (Seki, 2007), que gerou as curvas características dos modelos selecionados.

3.7. Ensaio de Permeabilidade

Foram realizados ensaios de permeabilidade de carga constante usando permeâmetros de parede rígida com amostras de solo do segundo e do quarto patamares. Os ensaios seguiram as recomendações da norma ABNT NBR 13292 (1995). A Figura 3.40 mostra o equipamento utilizado.



Figura 3.40: Equipamento utilizado para a realização do ensaio de permeabilidade de carga constante.

Cada patamar foi representado por três amostras indeformadas contidas em anéis metálicos de aproximadamente 100 cm^3 de volume. Esses anéis foram colocados em permeômetros de parede rígida (Figura 3.41) e submersos em um recipiente com água destilada por 48 horas para sua completa saturação (Figura 3.42).



Figura 3.41: Permeômetro de parede rígida com uma amostra de solo indeformada.



Figura 3.42: Permeômetros imersos em água para a saturação das amostras de solo.

A permeabilidade é obtida através da Eq. (3.1). A coluna d'água (carga hidráulica “h”), que controla a vazão, é mantida constante. O fator de correção R_t é a relação entre a viscosidade da água na temperatura do ensaio e a viscosidade da água na temperatura de 20°C e serve para calcular o coeficiente de

permeabilidade “k” na temperatura de 20°, utilizada com temperatura de referência. Foram realizadas seis medidas de vazão (variação do volume “ ΔV ” em um intervalo de tempo “ Δt ”) em cada solo para se obter seu coeficiente de permeabilidade “k” (Figura 3.43). Na Eq. (3.1), tem-se ainda que A é a área transversal ao fluxo do corpo de prova e que Δh é a perda de carga hidráulica entre o topo e a base do corpo de prova.

$$k = \frac{\Delta V \times L \times R_t}{A \times \Delta h \times \Delta t} \quad (3.1)$$

onde:

L: altura do corpo de prova cilíndrico;

A: área do corpo de prova cilíndrico.



Figura 3.43: Medição da vazão para a obtenção da permeabilidade.

4

Resultados e discussões

Nesse capítulo são descritos os resultados obtidos nos ensaios de laboratório e nos procedimentos realizados em campo.

Primeiramente, é feita uma descrição detalhada do perfil localizado no quarto patamar. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos pelos ensaios de caracterização realizados em laboratório. Esses resultados complementam aqueles obtidos na descrição do perfil em campo, além de fornecerem informações importantes para o entendimento de determinados comportamentos.

Os resultados dos ensaios de papel filtro geraram as curvas características de cada patamar estudado, a partir dos quais são obtidos os valores de sucção do solo em relação à sua umidade. Isso permite comparar o comportamento das sondas TDR e do tensiômetro e entender se ambos geraram resultados semelhantes no monitoramento da umidade e da sucção no solo.

Por fim, são discutidas as medições obtidas pelo tensiômetro e pelas sondas tipo TDR ao longo dos meses de medição.

4.1.

Descrição do perfil

O Eng.º Agrônomo e Pedólogo Dr. Maurício Rizzato Coelho, da EMBRAPA Solos, realizou uma descrição geral do local de estudo e do perfil localizado no quarto patamar da área de estudo, como mostra a Figura 4.1. Para a análise detalhada do perfil, uma trincheira de aproximadamente 90° de inclinação foi escavada para permitir a identificação dos diferentes horizontes de solo locais.

Baseado em EMBRAPA (2006), o perfil do solo localizado no quarto patamar é classificado como um Cambissolo Háplico Tb distrófico típico, o que significa um solo com argila de atividade baixa e baixa saturação por base na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA). Trata-se do terço inferior de uma vertente em região montanhosa, com aproximadamente 50% de declividade e vegetação predominante composta de gramíneas batatais. O local já sofreu retaludamento, o que alterou significativamente seu relevo original e algumas

características do solo. Não foram observados sinais de erosão nem de movimentação de massa. Também se constatou pouca atividade biológica.



Figura 4.1: Descrição do perfil do solo em campo.

A Figura 4.2 mostra um desenho esquemático dos horizontes encontrados no quarto patamar. O horizonte BC apresenta algumas distinções – por isso, ele foi dividido em horizonte BC 1 e horizonte BC 2. A Figura 4.3 mostra as diferenças estruturais de cada horizonte.

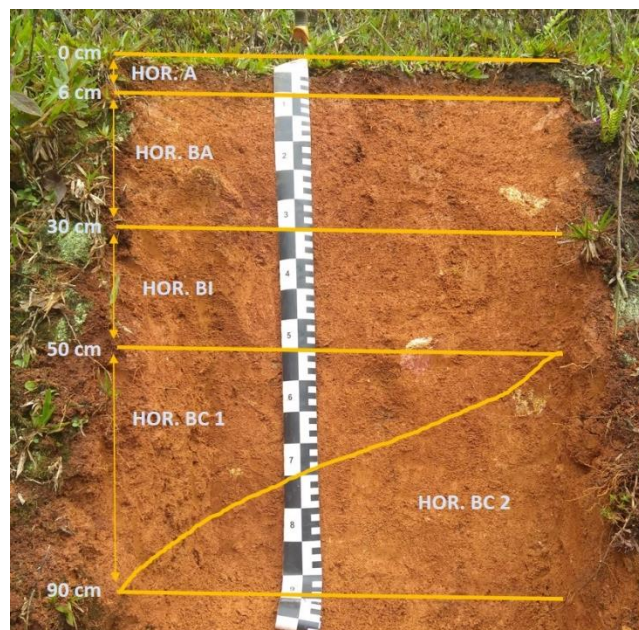


Figura 4.2: Horizontes identificados no perfil de solo do quarto patamar.



Figura 4.3: Solos referentes a cada horizonte.

A Tabela 4.1 apresenta a descrição detalhada dos cinco horizontes presentes no quarto patamar.

Classificar detalhadamente um solo com o auxílio de um pedólogo ou de um geólogo de engenharia experiente é importante para caracterizar o solo em campo, uma vez que permite uma escolha mais adequada das profundidades de instalação da instrumentação.

Tabela 4.1: Descrição morfológica do perfil.

HORIZONTE / PROFUNDIDADE	COR	TEXTURA	ESTRUTURA	CONSISTÊNCIA		TRANSIÇÃO
				Úmido	Molhado	
A 0-6 cm	5YR 4/3 (bruno- avermelhado)	muito argilosa com cascalho	forte, pequena e média, granular	friável	plástico e pegajoso	plana e clara
BA 6-30 cm	2,5YR 5/6 (vermelho)	muito argilosa com cascalho	moderada, pequena e média, blocos subangulares	firme	plástico e pegajoso	plana e gradual
BI 30-50 cm	2,5YR 5/8 (vermelho)	muito argilosa com cascalho	moderada, grande e média, blocos subangulares	firme a friável	plástico e pegajoso	plana e gradual
BC1 50-90 cm	2,5YR 5/6 (vermelho) Mosqueado pouco médio e pequeno 7,5 YR 6/6 (amarelo- avermelhado)	argilosa com cascalho	fraca, pequeno e média, blocos subangulares	firme	plástico e pegajoso	quebrada e clara
BC2 50-90+ cm	7,5 YR 6/8 (amarelo- avermelhado) Mosqueado abundante pequeno 10YR 7/6 (amarelo)	argilosa com cascalho	fraca, média e pequena, maciça	firme	plástico e pegajoso	

Observações:

1. Horizonte A - Presença comum de raízes muito finas e abundante de poros de tamanho muito pequeno e pequeno;
2. Horizonte BA – Presença comum de raízes muito finas (Figura 4.4) e comum de poros de tamanho muito pequeno e pequeno (Figura 4.5);
3. Horizonte BI – Presença rara de raízes muito finas, comum de poros muito pequenos e pouca de poros pequenos e médios;
4. Horizonte BC1 – Presença rara de raízes muito finas, comum de poros muito pequenos e pouca de poros pequenos e médios;
5. Horizonte BC2 – Ausência de raízes e pouca presença de poros muito pequenos e pequenos.



Figura 4.4: Presença de raízes muito finas no horizonte BA.



Figura 4.5: Presença de poros muito pequenos e pequenos no horizonte BA.

4.2.

Análise físico-química dos horizontes do quarto patamar

Os resultados da análise físico-química dos horizontes do solo do quarto patamar estão apresentados na Tabela 4.2. Detalhes dos procedimentos para obtenção dos valores da análise físico-química mostrados na Tabela 4.2 podem ser consultados no Anexo 1.

Tabela 4.2: Análise físico-química dos horizontes do solo do quarto patamar.

HORIZONTE	pH		PCZ	M.O. (g/kg)	ATAQUE SULFÚRICO						
	H ₂ O	CaCl ₂ 0,01M			ΔP (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ki	Kr	Res. (%)
A	5,79	5,25	6,07	51,38	13,10	8,92	25,06	6,66	0,60	0,52	44,00
AB	5,28	4,93	6,38	50,42	12,26	7,05	24,62	6,94	0,49	0,41	46,08
B1	5,00	5,58	6,54	48,38	12,22	7,60	24,28	7,42	0,53	0,44	43,39
BC1	4,85	4,37	5,89	50,66	11,96	9,18	24,04	5,55	0,65	0,57	45,18
BC2	4,83	4,33	5,71	50,11	10,99	10,79	23,93	4,40	0,76	0,69	48,21

Nota: PCZ (Ponto de carga zero) = 2 x pH (CaCl₂) – pH (H₂O);

M.O.: Matéria orgânica;

ΔP: Perda ao fogo;

Res.: Resíduo.

$$K_t = \frac{(\%SiO_2 \times 1.70)}{\%Al_2O_3}$$

$$K_r = \frac{(\%SiO_2 / 0.60)}{(\%Al_2O_3 / 1.02) + (\%Fe_2O_3 / 1.60)}$$

A matéria orgânica de um solo é constituída por resíduos vegetais e animais em diferentes estágios de decomposição, fragmentos de carvão finamente divididos, substâncias húmicas, entre outros compostos orgânicos naturalmente presentes no solo. De acordo com EMBRAPA (2006), o solo é considerado orgânico quando o teor de carbono for igual ou maior que 80 g/kg. A Tabela 4.2 mostra que em nenhum horizonte a quantidade de matéria orgânica é tão alta a ponto de classificar o solo como orgânico, e que, dentre os valores apresentados, o solo do horizonte A é o que contém o maior teor de matéria orgânica – algo coerente, já que tal horizonte possui maior quantidade de restos de raízes.

De acordo com Kehrigh (1949), o índice Ki, originalmente proposto por Harrassovitz, indica a relação molar SiO₂/Al₂O₃ da fração argila do solo. Devido ao fato de o índice Ki da caulinita corresponder a 2,0, esse valor foi estabelecido como limite entre solos muito intemperizados (Ki < 2,0) e pouco intemperizados (Ki > 2,0). Os índices Ki e Kr revelam o grau de intemperismo de um solo. Argilas são compostas, basicamente, por dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃). Maiores concentrações de SiO₂ em um solo implicam em menor grau de intemperismo, enquanto maiores concentrações de Al₂O₃ e de Fe₂O₃ implicam em maior grau de intemperismo. Desse modo, os índices Ki e Kr resumem essa questão: altos valores de Ki e Kr significam solos pouco intemperizados, e baixos valores de Ki e Kr significam solos bastante

intemperizados. Notam-se valores baixos de K_i e K_r nas análises químicas apresentadas na Tabela 4.2, o que revela que os horizontes de solo do quarto patamar encontram-se bastante intemperizados. Ainda é possível distinguir solos com base nos valores de K_i e K_r . Resende *et al.* (1988) sugerem o seguinte critério:

- Solos cauliníticos: K_i e $K_r > 0,75$;
- Solos cauliníticos-oxídicos: $K_i > 0,75$ e $K_r < 0,75$;
- Solos Oxídicos: $K_r < 0,75$;
- Solos Gibbsíticos: $K_i < 0,75$ e $K_r < 0,75$.

Com base nesse critério, o horizonte BC2 seria composto por solo caulinítico-oxídico e os demais horizontes seriam compostos por solo gibbsíticos.

De acordo com van Raij (1973), o Ponto de Carga Zero (PCZ) pode ser definido como o pH da solução em equilíbrio com o solo no qual a carga elétrica do solo é nula, ou seja, não é positiva nem negativa. Quando o $pH_{(H_2O)}$ de um solo for muito diferente em relação ao valor de PCZ, maior será a repulsão entre as partículas de argila, e mais dispersa será a estrutura do solo. Por outro lado, quando o $pH_{(H_2O)}$ de um solo for próximo do valor do PCZ, haverá um equilíbrio eletrostático que torna o solo mais bem estruturado, por conta de uma maior aglutinação entre os grãos de argila (Casanova, 2019). Nota-se que o horizonte mais bem estruturado é o horizonte A, que possui a menor diferença entre os valores de $pH_{(H_2O)}$ e de PCZ.

4.3. Caracterização do solo

Foram feitas três baterias de ensaios de caracterização. A primeira e a segunda foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio com amostras deformadas que foram coletadas do segundo e do quarto patamares, sem levar em conta possíveis diferenças de horizonte no solo. A terceira foi realizada no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ com cinco amostras deformadas coletadas apenas do quarto patamar, e que levaram em consideração as diferenças entre horizontes.

4.3.1. Segundo patamar

4.3.1.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica é mostrada na Tabela 4.3 e a curva granulométrica gerada é apresentada na Figura 4.6.

Tabela 4.3: Granulometria do segundo patamar.

Pedregulho			Areia			Silte	Argila
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina		
0,0%	0,2%	9,3%	1,3%	23,6%	22,4%	33,3%	9,9%
9,5%			47,3%			33,3%	9,9%

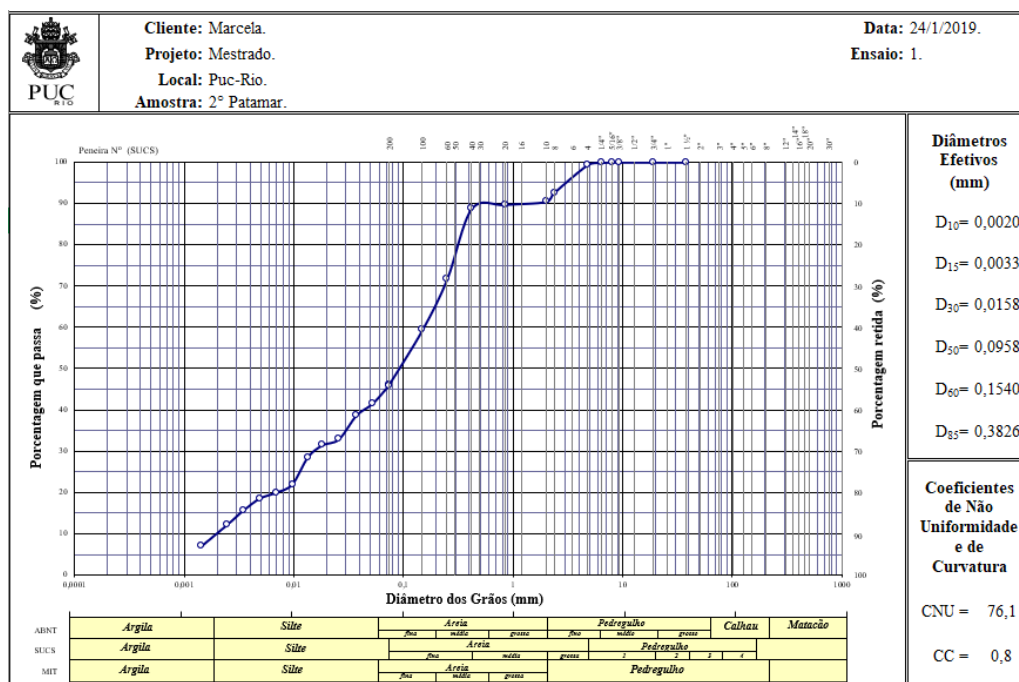


Figura 4.6: Curva granulométrica do segundo patamar.

4.3.1.2. Limites de Atterberg

Não foram determinados os limites de Atterberg para o solo do segundo patamar, pois não se obteve quantidade de argila suficiente para tal.

4.3.1.3. Índices físicos

Na Tabela 4.4 são apresentados os índices físicos do solo do segundo patamar. A massa específica dos grãos (ρ_s) foi obtida através do ensaio de picnômetro, enquanto que a massa específica total (ρ_t) foi obtida a partir das amostras indeformadas submetidas aos ensaios de papel filtro, sendo o valor apresentado na tabela o valor médio de nove amostras. A umidade natural (ω) foi obtida a partir de uma única amostra indeformada, pesada antes e após sua secagem. A massa específica seca (ρ_d), o índice de vazios (e) e a porosidade (n) foram calculados a partir dos valores de umidade (ω), de massa específica dos grãos (ρ_s) e de massa específica total (ρ_t) apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Índices físicos do segundo patamar.

ρ_s	Massa específica dos grãos	2,642	g/cm ³
ρ_t	Massa específica total média	1,29	g/cm ³
ω	Umidade natural	28,7	%
ρ_d	Massa específica seca	1,00	g/cm ³
e	Índice de vazios	1,63	
n	Porosidade	0,62	

A Tabela 4.4 fornece um valor baixo de massa específica total média, em comparação com o valor de 1,47 g/cm³ determinado para o quarto patamar e mostrado na Tabela 4.7. A autora dessa dissertação, ao analisar tais dados, achou a discrepância entre os valores inconsistente. Entretanto, o baixo valor de massa específica total média é corroborado pela análise tátil visual, realizada no momento da coleta das amostras indeformadas: o solo encontrado no segundo patamar possuía aparência grosseira, com a presença de grandes poros entre os pedregulhos, o que aumenta significativamente seu índice de vazios e sua porosidade, consequentemente reduzindo sua massa específica total média e sua massa específica seca. Embora a autora ache pouco provável erro na determinação desse valor, essa possibilidade não pode ser eliminada.

4.3.1.4. Classificação do solo

A classificação do solo é baseada no Sistema Unificado de Classificação do Solo – SUCS (ASTM D2487-17), que utiliza as porcentagens obtidas na análise

granulométrica e os valores dos limites de Atterberg. Como os valores de limites de Atterberg não foram determinados, o solo é classificado como SM (areia siltosa) ou como SC (areia argilosa), sendo mais provável que seja SM (areia siltosa).

4.3.2.

Quarto patamar – panorama geral

4.3.2.1.

Análise granulométrica

A análise granulométrica é mostrada na Tabela 4.5 e a curva granulométrica gerada é apresentada na Figura 4.7.

Tabela 4.5: Granulometria do quarto patamar.

Pedregulho			Areia			Silte	Argila
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina		
0,0%	0,5%	4,0%	1,3%	13,5%	9,9%	33,1%	37,7%
4,5%			24,7%			33,1%	37,7%

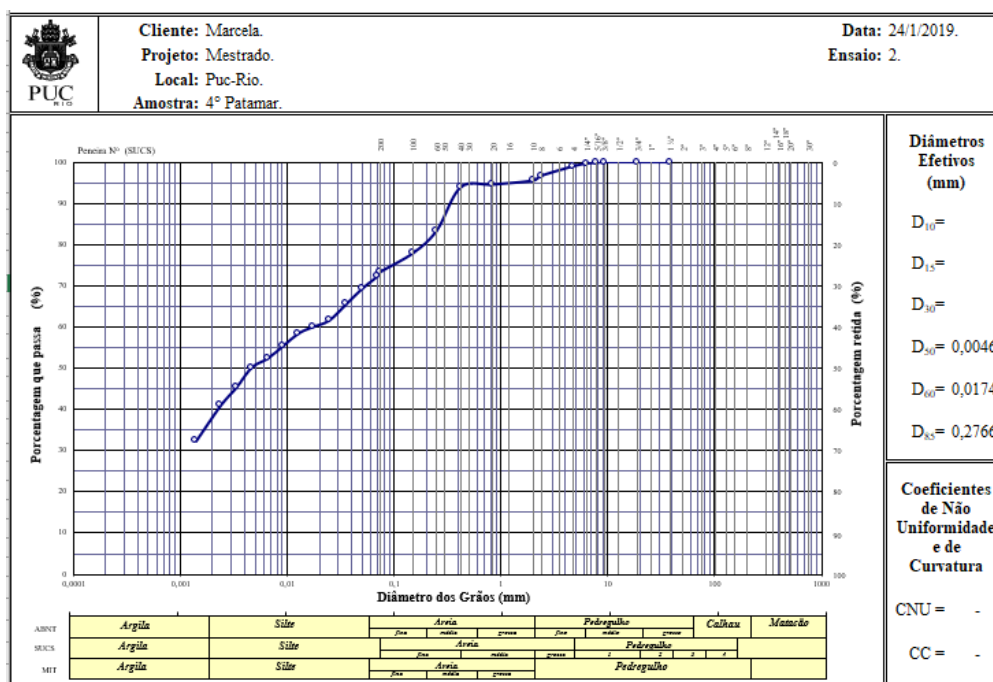


Figura 4.7: Curva granulométrica do quarto patamar.

4.3.2.2. Limites de Atterberg

A Tabela 4.6 mostra os valores obtidos do limite de liquidez (LL) e do limite de plasticidade (LP) para o solo do quarto patamar.

Tabela 4.6: Limites de Atterberg do solo do quarto patamar.

LL (%)	55,8
LP (%)	32,6
IP (%)	23,2

4.3.2.3. Índices físicos

Na Tabela 4.7 são apresentados os índices físicos do solo do quarto patamar. A massa específica dos grãos (ρ_s) foi obtida através do ensaio de picnômetro, enquanto que a massa específica total (ρ_t) foi obtida a partir das amostras indeformadas submetidas aos ensaios de papel filtro, sendo o valor apresentado na tabela o valor médio de nove amostras. A umidade natural (ω) foi obtida a partir de uma única amostra indeformada, pesada antes e após sua secagem. A massa específica seca (ρ_d), o índice de vazios (e) e a porosidade (n) foram calculados a partir dos valores de umidade (ω), de massa específica dos grãos (ρ_s) e de massa específica total (ρ_t) apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Índices físicos do quarto patamar.

ρ_s	Massa específica dos grãos	2,581	g/cm ³
ρ_t	Massa específica total média	1,74	g/cm ³
ω	Umidade natural	18,8	%
ρ_d	Massa específica seca	1,47	g/cm ³
e	Índice de vazios	0,76	
n	Porosidade	0,43	

4.3.2.4. Classificação do solo

Pelo Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), o solo é classificado como MH (silte de alta plasticidade).

4.3.3.

Quarto patamar – detalhamento por horizonte

As caracterizações de cada horizonte do quarto patamar são apresentadas entre a Tabela 4.8 e a Tabela 4.12. As curvas granulométricas de tais horizontes são mostradas entre a Figura 4.8 e a Figura 4.12.

Tabela 4.8: Caracterização do horizonte A.

HORIZONTE A								
Análise Granulométrica (%)						Índices Físicos		
Argila	Silte	Areia			Pedregulho	ps	Massa específica dos grãos	2,614 g/cm³
		Fina	Média	Grossa				
42	17	4	15	19	3			
Limites de Atterberg						Classificação do Solo		
LL (%)				47		SUCS	CL (Argila de baixa compressibilidade)	
LP (%)				19				
IP (%)				28				

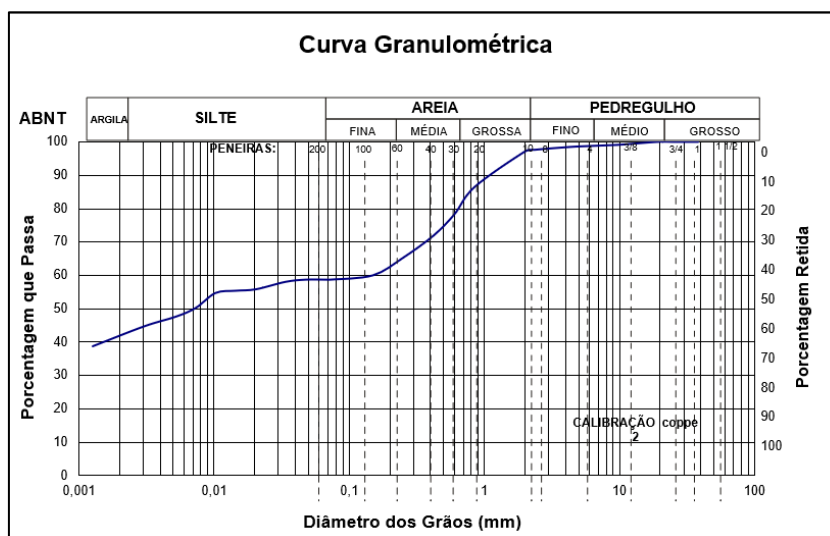


Figura 4.8: Curva granulométrica do horizonte A.

Tabela 4.9: Caracterização do horizonte BA.

HORIZONTE BA								
Análise Granulométrica (%)						Índices Físicos		
Argila	Silte	Areia			Pedregulho	ps	Massa específica dos grãos	2,645 g/cm³
		Fina	Média	Grossa				
32	21	6	17	20	4			
Limites de Atterberg						Classificação do Solo		
LL (%)				53		SUCS	CH ("Fat clay")	
LP (%)				20				
IP (%)				33				

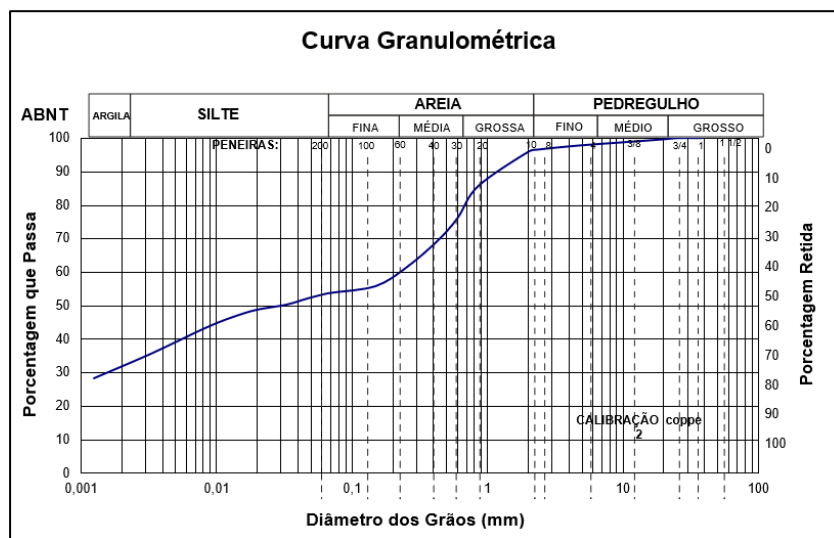


Figura 4.9: Curva granulométrica do horizonte BA.

Tabela 4.10: Caracterização do horizonte BI.

HORIZONTE BI								
Análise Granulométrica (%)						Índices Físicos		
Argila	Silte	Areia			Pedregulho	ps	Massa específica dos grãos	2,643 g/cm³
		Fina	Média	Grossa				
32	18	5	16	24	5			
Limites de Atterberg						Classificação do Solo		
LL (%)				54		SUCS	CH ("Fat clay")	
LP (%)				22				
IP (%)				32				

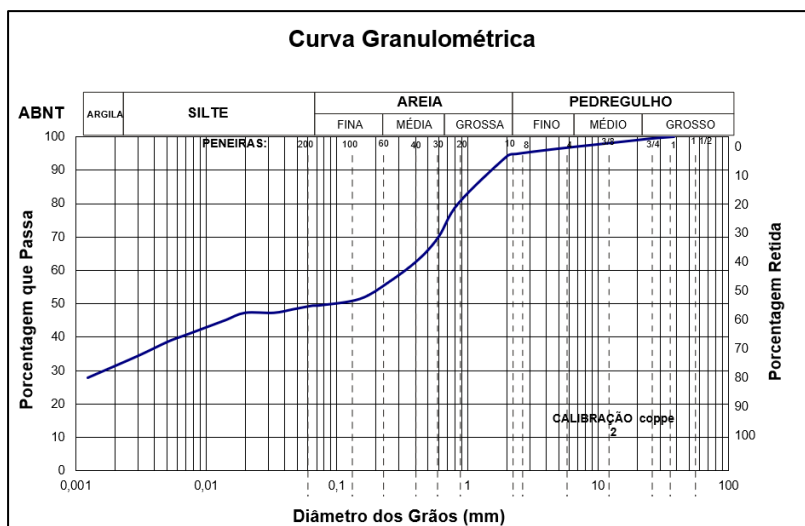


Figura 4.10: Curva granulométrica do horizonte BL.

Tabela 4.11: Caracterização do horizonte BC1.

HORIZONTE BC1								
Análise Granulométrica (%)						Índices Físicos		
Argila	Silte	Areia			Pedregulho	ps	Massa específica dos grãos	2,646 g/cm³
		Fina	Média	Grossa				
35	15	5	15	25	5			
Limites de Atterberg						Classificação do Solo		
LL (%)				60		SUCS	CH ("Fat clay")	
LP (%)				22				
IP (%)				38				

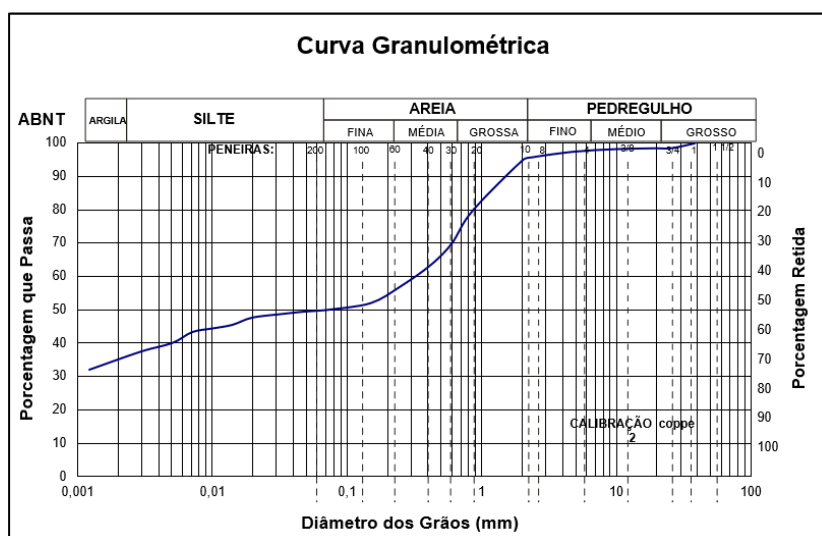
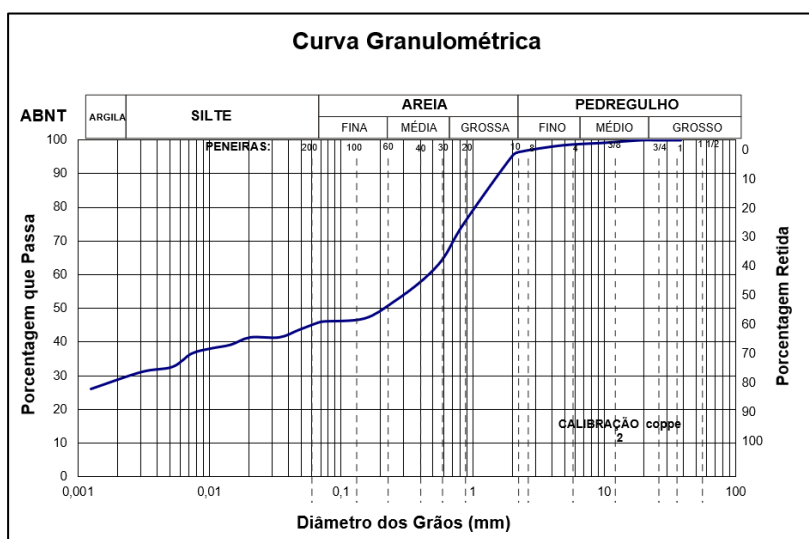


Figura 4.11: Curva granulométrica do horizonte BC1.

Tabela 4.12: Caracterização do horizonte BC2.

HORIZONTE BC2								
Análise Granulométrica (%)						Índices Físicos		
Argila	Silte	Areia			Pedregulho	ps	Massa específica dos grãos	2,626 g/cm³
		Fina	Média	Grossa				
29	16	5	15	30	5			
Limites de Atterberg						Classificação do Solo		
LL (%)				66		SUCS	SC (Areia argilosa)	
LP (%)				23				
IP (%)				43				

**Figura 4.12: Curva granulométrica do horizonte BC2.**

É necessário que se faça uma comparação. Na Engenharia Geotécnica, classificar um solo é incluí-lo em um determinado grupo composto por solos de características e propriedades geotécnicas similares. A classificação do solo baseada no Sistema Unificado de Classificação do Solo – SUCS – consiste basicamente em granulometria e limites de consistência (plasticidade). Já a Engenharia Agrônômica interpreta o solo como a base de sustentabilidade das plantas e como sendo parte integral do ecossistema. Neste caso, a classificação do solo é baseada nos atributos morfológicos dos horizontes do perfil do solo: cor, textura, estrutura, consistência úmida e seca, transição entre os horizontes, porosidade, presença de raízes – características essas importantes para definir de que modo ocorre o fluxo de água subterrânea e, conseqüentemente, para escolher as profundidades de instalação da instrumentação de um sistema de alerta de deslizamentos.

4.4.

Ensaio de permeabilidade

A Tabela 4.13 apresenta os resultados dos ensaios de permeabilidade de carga constante com permeâmetros de parede rígida de amostras indeformadas coletadas em anéis metálicos de 100 cm³ de volume, com solo na condição saturada. Tais ensaios foram realizados apenas sob o ponto de vista de caracterização, não sendo utilizado para nenhum tipo de modelagem nessa dissertação.

Tabela 4.13: Coeficientes de permeabilidade referentes a cada patamar.

	2° Patamar	4° Patamar
Permeabilidade (cm/s)	$1,6 \times 10^{-3}$	$2,7 \times 10^{-3}$

Tais resultados mostram que ambos os solos possuem coeficientes de permeabilidade muito semelhantes. Portanto, pode-se entender que, mesmo tendo sido mais alterado pelo retaludamento, o coeficiente de permeabilidade superficial do solo do segundo patamar não foi muito alterado.

4.5.

Ensaio de papel filtro

Foram realizados três ensaios de papel filtro. Os dois primeiros referem-se aos dois patamares em estudo, e foram feitos em conjunto usando amostras indeformadas com volume aproximado de 20 cm³. Já o terceiro ensaio refere-se apenas ao quarto patamar e foi realizado usando amostras indeformadas com volume aproximado de 100 cm³. Foram usadas amostras com volumes diferentes objetivando verificar possíveis diferenças quanto à representatividade da amostra do solo. Alguns detalhes referentes à execução do ensaio também foram observados. Além disso, a terceira coleta foi feita rigorosamente a 20 cm de profundidade, enquanto que as duas primeiras ainda não seguiram tal rigor por não se ter, até o momento da coleta, definição da profundidade de instalação dos instrumentos.

As curvas características foram geradas pelo site SWRC Fit. Esse site fornece as curvas características baseadas em diversos modelos. Para essa dissertação foram escolhidos os modelos de Brooks & Corey (1964), van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994).

4.5.1. Segundo patamar

Para o segundo patamar foi feito apenas um ensaio. Portanto, aqui não terá comparação quanto à diferença de tamanho de anéis nem de procedimentos laboratoriais.

Os valores de sucção e de umidade volumétrica encontrados no ensaio do papel filtro e usados para se obter a curva característica são mostrados na Tabela 4.14. A curva gerada pelo ensaio é mostrada na Figura 4.13 e as consequentes equações e parâmetros obtidas para os três modelos analisados são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.14: Valores de sucção e de umidade volumétrica encontrados no ensaio de papel filtro referente ao segundo patamar.

Anel	2	6	M16	13	M12	4	9	23	M29
Sucção (kPa)	4,5	5,4	6,4	20,8	72,2	243,1	675,3	1090,1	25017,8
Umidade Volumétrica	0,477	0,437	0,338	0,312	0,263	0,157	0,165	0,111	0,025

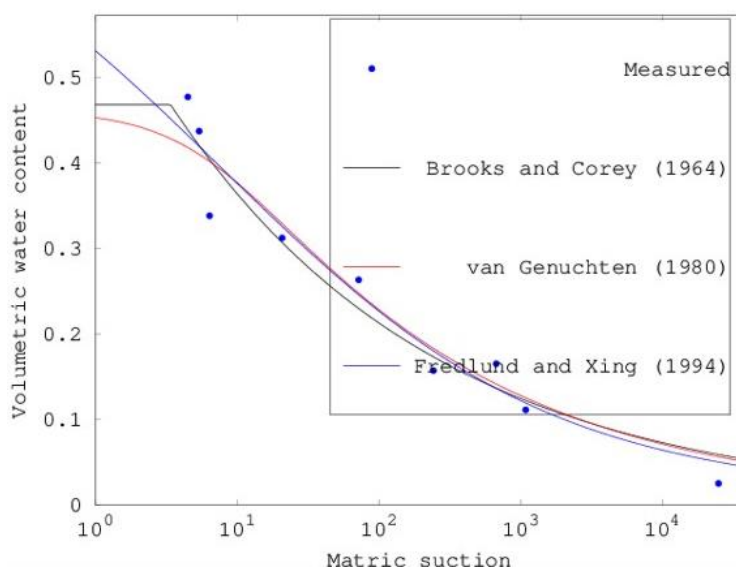


Figura 4.13: Curva característica do segundo patamar.

Tabela 4.15: Segundo patamar: equações geradas para cada modelo.

Modelo	Equação	Parâmetros	R ²
Brooks & Corey (1964)	$\theta = S_e = \begin{cases} 1 & \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda & \psi \geq \psi_b \end{cases}$	$\theta_s = 0,46780$ $\theta_r = 4,0013\text{e-}08$ $\Psi_b = 3,4035$ $\lambda = 0,23301$	0,948
Van Genuchten (1980)	$\theta = S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m$ $\left(m = 1 - \frac{1}{n} \right)$	$\theta_s = 0,46116$ $\theta_r = 4,3331\text{e-}06$ $\alpha = 0,15313$ $n = 1,2550$	0,939
Fredlund & Xing (1994)	$\theta = \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m$	$\theta_s = 0,79726$ $\theta_r = 5,1817\text{e-}07$ $a = 8,7690$ $m = 2,6677$ $n = 0,33254$	0,947

Diante da proximidade dos valores de R² obtidos pelos três modelos, o modelo de Fredlund & Xing (1994) é o escolhido para ser utilizado nesse estudo pelo fato deste modelo caracterizar melhor as menores sucções (e, conseqüentemente, as maiores umidades volumétricas).

Os parâmetros a , n e m , em especial, trazem informações importantes a respeito do formato da curva e, conseqüentemente, do tipo de solo em estudo. O parâmetro a , de acordo com a seção 2.1.3.4.3, tem relação com a pressão de entrada de ar. O valor apresentado nessa curva (8,7690), em comparação com a Figura 2.14, não se mostra tão alto ou tão baixo. O parâmetro n tem valor baixo (0,33254), o que indica um solo com distribuição granulométrica não uniforme. A granulometria encontrada nos ensaios de caracterização e apresentada na Tabela 4.3 confirma essa informação. Já o parâmetro m tem valor alto (2,6677), o que indica que esse solo possui grau de saturação residual próximo a zero. Como o gráfico apresentado nesse trabalho relaciona sucção com umidade volumétrica, pode-se afirmar que valores de m altos significam umidade volumétrica residual próxima a zero.

4.5.2. Quarto patamar

4.5.2.1. Primeiro ensaio (anel com volume de 20 cm³)

Primeiramente cabe aqui uma observação: foi feita uma comparação entre os valores de umidade volumétrica obtidos em ambas as extremidades do anel e verificou-se que o anel N2 apresentou uma diferença considerável. Por questão de bom senso, tal ponto foi excluído. Os valores de sucção e de umidade volumétrica encontrados no ensaio de papel filtro e usados para se obter a curva característica são mostrados na Tabela 4.16. A curva gerada pelo ensaio é mostrada na Figura 4.14 e as consequentes equações e parâmetros obtidas para os três modelos analisados são apresentadas na Tabela 4.17.

Tabela 4.16: Valores de sucção e de umidade volumétrica encontrados no ensaio de papel filtro referente ao quarto patamar para as amostras de 20 cm³.

Anel	M11	200	15	M8	10	M26	P12	M20
Sucção (kPa)	6,4	75,0	104,4	2090,5	4100,6	6321,4	6882,4	32272,6
Umidade Volumétrica	0,357	0,290	0,289	0,283	0,198	0,142	0,168	0,017

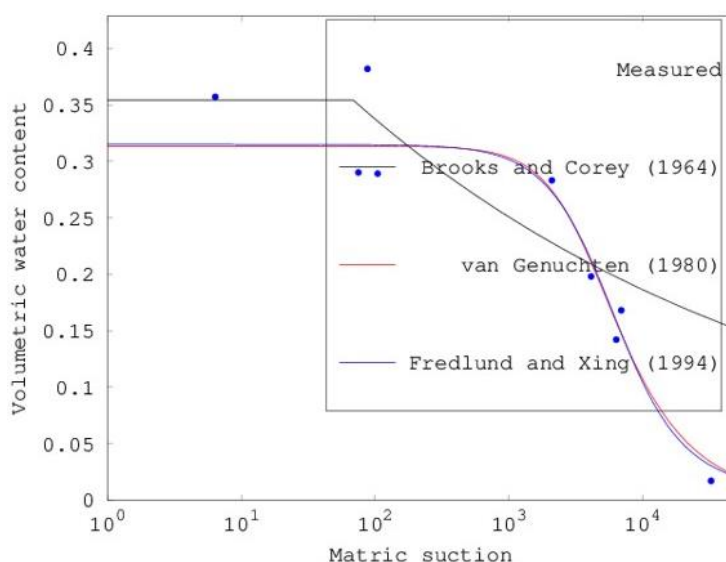


Figura 4.14: Curva característica do quarto patamar sem considerar o ponto N2 para as amostras de 20 cm³.

Tabela 4.17: Quarto patamar: equações geradas para cada modelo sem considerar o ponto N2 para as amostras de 20 cm³.

Modelo	Equação	Parâmetros	R²
Brooks & Corey (1964)	$\theta = S_e = \begin{cases} 1 & \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda & \psi \geq \psi_b \end{cases}$	$\theta_s = 0,35418$ $\theta_r = 3,8789\text{e-}05$ $\Psi_b = 68,472$ $\lambda = 0,12905$	0,599
Van Genuchten (1980)	$\theta = S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m$ $\left(m = 1 - \frac{1}{n} \right)$	$\theta_s = 0,31331$ $\theta_r = 3,2842\text{e-}07$ $\alpha = 2,6519\text{e-}04$ $n = 2,0384$	0,949
Fredlund & Xing (1994)	$\theta = \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m$	$\theta_s = 0,31474$ $\theta_r = 2,2758\text{e-}07$ $a = 5295,9$ $m = 2,0244$ $n = 1,6896$	0,949

Observando-se as três curvas separadamente, constata-se que a curva gerada pelo modelo de Brooks & Corey (1964) considera melhor as menores sucções / maiores umidades volumétricas, mas não consegue ajustar-se bem aos demais pontos, o que é refletido em seu baixo valor de R². Já as curvas geradas pelos modelos van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994) são semelhantes e ajustam-se melhor aos pontos como um todo, o que é refletido em seus altos valores de R². Para que se possa fazer um comparativo entre o segundo e o quarto patamares, será escolhido o modelo Fredlund & Xing (1994).

Quanto aos parâmetros: o parâmetro a é bastante alto (5295,9), o que significa alta pressão de entrada de ar. Isso se justifica pela menor porosidade do solo, o que torna difícil o fluxo nos seus poros (vale lembrar o modelo dos tubos capilares, explicado no item 2.1.3.1). O parâmetro n tem valor mediano (1,6896) se comparado aos mostrados na Figura 2.15 e isso indica um solo com distribuição granulométrica um pouco mais uniforme em relação ao encontrado no segundo patamar. A granulometria encontrada nos ensaios de caracterização no quarto patamar, apresentada pela Tabela 4.5, mostra que a fração fina sofreu um significativo aumento percentual em relação ao segundo patamar. Já o parâmetro m tem valor um pouco menor se comparado ao do segundo patamar, mas ainda alto (2,0244), o que indica que esse solo possui saturação residual próxima a zero.

Mais uma vez, como o gráfico apresentado nesse trabalho relaciona sucção com umidade volumétrica, pode-se afirmar que valores de m altos significam umidade volumétrica residual próxima a zero.

4.5.2.2.

Segundo ensaio (anel com volume de 100 cm³)

Os valores de sucção e de umidade volumétrica encontrados no ensaio de papel filtro e usados para se obter a curva característica são mostrados na Tabela 4.18. A curva gerada pelo ensaio é mostrada na Figura 4.15 e os consequentes parâmetros e equações obtidos para os três modelos analisados são apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.18: Valores de sucção e de umidade volumétrica encontrados no ensaio de papel filtro referente ao quarto patamar para as amostras de 100 cm³.

Anel	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Sucção (kPa)	14750,0	11628,0	7783,0	4174,0	3753,0	2353,0
Umidade Volumétrica	0,0762	0,0581	0,0931	0,1477	0,1755	0,2124
Anel	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Sucção (kPa)	2353,0	608,0	78,4	11,4	5,5	1,5
Umidade Volumétrica	0,2124	0,2838	0,3366	0,3135	0,3740	0,4000

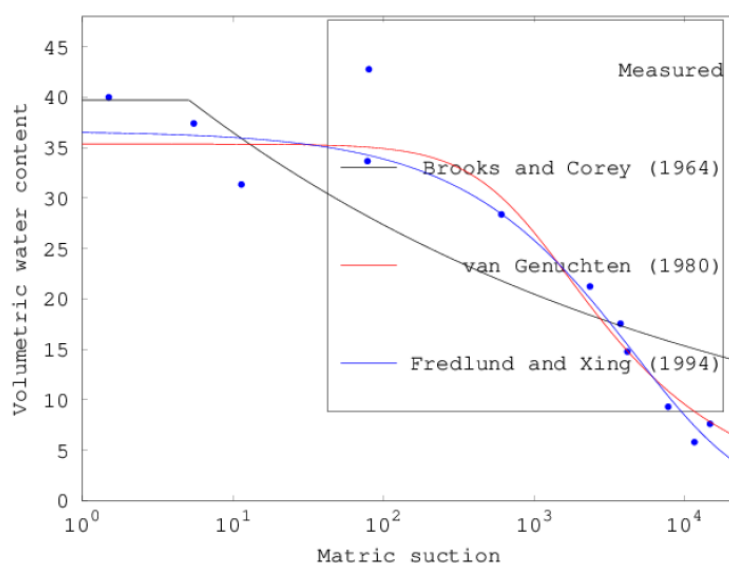


Figura 4.15: Curva característica do quarto patamar para as amostras de 100 cm³.

Tabela 4.19: Quarto patamar: equações geradas para cada modelo para as amostras de 100 cm³.

Modelo	Equação	Parâmetros	R ²
Brooks & Corey (1964)	$\Theta = S_e$ $= \begin{cases} 1 & \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda & \psi \geq \psi_b \end{cases}$	$\theta_s = 0,39720$ $\theta_r = 3,5426e-05$ $\Psi_b = 5,1185$ $\lambda = 0,12555$	0,811
Van Genuchten (1980)	$\Theta = S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m$ $\left(m = 1 - \frac{1}{n} \right)$	$\theta_s = 0,35364$ $\theta_r = 5,9774e-06$ $\alpha = 0,0011762$ $n = 1,5275$	0,957
Fredlund & Xing (1994)	$\Theta = \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m$	$\theta_s = 0,36644$ $\theta_r = 0,0049263$ $a = 8,6719e+04$ $m = 18,452$ $n = 0,65653$	0,971

Nesse ensaio, os três modelos forneceram melhor ajuste em relação ao realizado com as amostras de 20 cm³. Dentre os modelos escolhidos, Fredlund & Xing (1994) alcançou o maior fator R² (0,97007), como mostra a Tabela 4.19. Como o objetivo é comparar as curvas obtidas no quarto patamar com amostras de volumes diferentes, segue-se utilizando o modelo Fredlund & Xing (1994).

A Figura 4.16 mostra um comparativo entre as curvas geradas pelos ensaios que usaram amostras indeformadas de 20 cm³ e de 100 cm³. Enquanto a curva gerada pelas amostras menores possui formato de “S” invertido, a curva com amostras maiores aparenta formato semelhante a uma meia parábola. A curva com amostras maiores apresenta menores sucções qualquer que seja a umidade volumétrica e, conforme as umidades volumétricas aumentam, esses valores se distanciam mais. As amostras maiores também conseguem quantificar menores valores de sucção (chegando na ordem de 1 kPa para umidades volumétricas acima dos 30%), enquanto as amostras menores não foram capazes de mostrar sucções menores do que 100 kPa para umidades volumétricas semelhantes. Pela melhor representação das menores sucções, a curva gerada pelas maiores amostras será usada nas análises realizadas nesse trabalho.

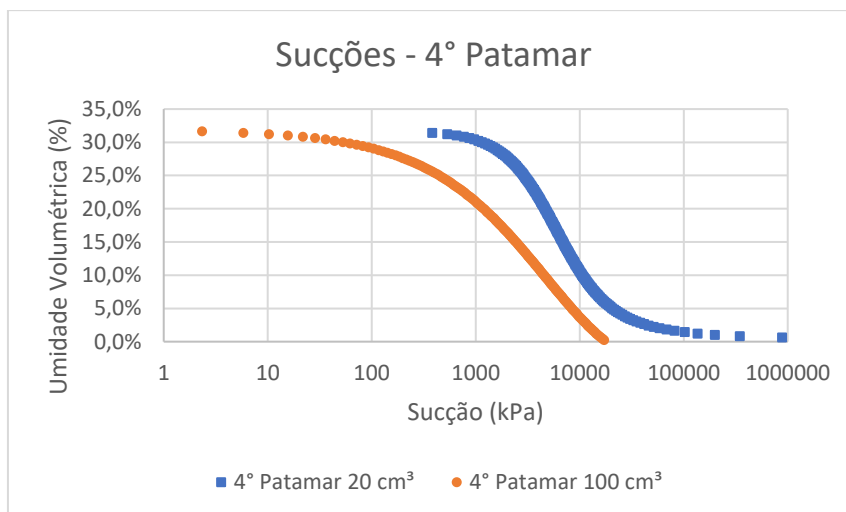


Figura 4.16: Curvas geradas para o quarto patamar com o modelo Fredlund & Xing (1994) – Comparativo entre as amostras de 20 cm³ e de 100 cm³.

As diferenças gráficas podem ser melhor entendidas ao se analisar os parâmetros gerados por ambas as curvas. A Tabela 4.20 mostra um comparativo dos valores obtidos. Percebe-se que ambas apresentam elevado parâmetro a , com a curva formada pelas maiores amostras gerando um valor bastante superior (86.719,0). O parâmetro n do ensaio com maiores amostras é, ao contrário, bastante inferior (0,65653) em relação ao das menores amostras (1,6896), e o parâmetro m (18,452) já é bastante superior (2,0244).

Tabela 4.20: Comparativo entre os parâmetros gerados pelos ensaios com amostras de 20 cm³ e de 100 cm³.

Parâmetros	a	n	m
20 cm³	5295,9	1,6896	2,0244
100 cm³	86719,0	0,65653	18,452

Uma justificativa para desigualdades tão altas é a discrepância de profundidade de coleta de amostras. O quarto patamar possui cinco perfis diferentes em apenas 90 cm, e qualquer diferença na profundidade de coleta corresponde à obtenção de amostras em diferentes perfis. Portanto, trata-se de amostras com materiais diferentes. Isso mostra a importância da pedologia e, no geral, da multidisciplinaridade em trabalhos de engenharia, além de enfatizar a importância do planejamento e da correta escolha da profundidade na coleta das

amostras indeformadas. Outra questão é o tamanho das amostras ensaiadas: amostras maiores podem ter dificuldades de equalização, e é possível que o papel filtro não tenha incorporado adequadamente as informações de sucção do solo

A Figura 4.17 apresenta as curvas características obtidas pelos três ensaios, todas geradas com base no modelo Fredlund & Xing (1994). É interessante compará-las com as apresentadas na Figura 2.6: a curva característica referente ao segundo patamar assemelha-se à curva 5 (argila siltosa derivada de “loess”), com formato côncavo, enquanto a curva característica referente ao quarto patamar assemelha-se à curva 6 (solo de turfa oligotrófico jovem), com formato mais convexo. Percebe-se que o solo do quarto patamar tem maior capacidade de retenção em relação ao do segundo patamar. Uma forma de compreender isso é comparar as umidades volumétricas em uma determinada sucção – para 1000 kPa de sucção, por exemplo, as umidades volumétricas de ambas as curvas do quarto patamar são maiores do que a do segundo patamar. Solos mais bem estruturados têm melhores condições de reter água, o que é bastante plausível, já que o segundo patamar sofreu mais alterações com as escavações realizadas para o processo de retaludamento. No entanto, o intervalo de sucção que abrange o quarto patamar é muito superior ao do segundo patamar, o que faz com que a sua variação em números seja maior. O formato mais verticalizado das curvas do quarto patamar revela uma drenagem mais rápida. A maior porcentagem de argila do solo do quarto patamar, apresentada no item 4.3, é comprovada pelos valores de pressão de entrada de ar, que são bem superiores nas duas curvas que o representam.

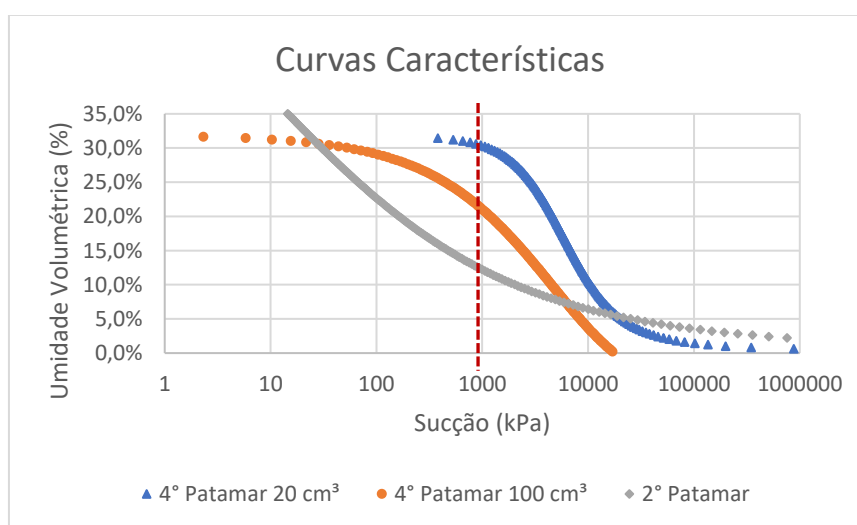


Figura 4.17: Curvas características obtidas pelos três ensaios, geradas a partir do modelo Fredlund & Xing (1994).

4.6.

Tensiômetro

Um tensiômetro foi confeccionado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ e instalado no dia 05 de dezembro de 2018. Seu funcionamento foi registrado até o dia 18 de dezembro de 2018, quando ocorreu uma pane na estação meteorológica que impossibilitou o registro das medidas de sucção obtidas pelo tensiômetro e dos valores de voltagem da bateria que alimentava a estação. Como a data era próxima ao recesso do fim de ano e as medidas de umidade volumétrica estavam sendo registradas com coerência pelas sondas tipo TDR, foi decidido manter a estação meteorológica e os instrumentos em funcionamento no campo até meados de março de 2019. O equipamento foi para manutenção na Hobeco no dia 13 de março de 2019.

Como o pluviômetro só foi instalado no dia 12 de dezembro de 2018, a primeira semana dos registros se passou sem a medição de chuva. Curiosamente, não ocorreram chuvas do dia 12 ao dia 18 de dezembro de 2019, não permitindo uma correlação direta entre as medidas de sucção e as de chuva. Portanto, o que foi feito é uma relação entre os valores de sucção registrados pelo tensiômetro e os obtidos através de correlações pelas sondas tipo TDR. O objetivo é comparar seus valores e observar singularidades entre os instrumentos.

4.6.1.

Calibração

A título de comparação, o gráfico mostrado na Figura 4.18 traz as duas curvas de calibração do transdutor de pressão do tensiômetro, apresentadas na Figura 3.7 e na Figura 3.10. Percebe-se a semelhança entre ambas, o que confirma a possibilidade de calibrar o transdutor para pressões positivas e extrapolar os valores para pressões negativas, caso não seja possível executar a calibração na faixa de pressões negativas. Além disso, esse gráfico também confirma a retirada da trava eletrônica e prova que o transdutor de pressão do tensiômetro é capaz de fazer leituras de pressões, tanto positivas quanto negativas.

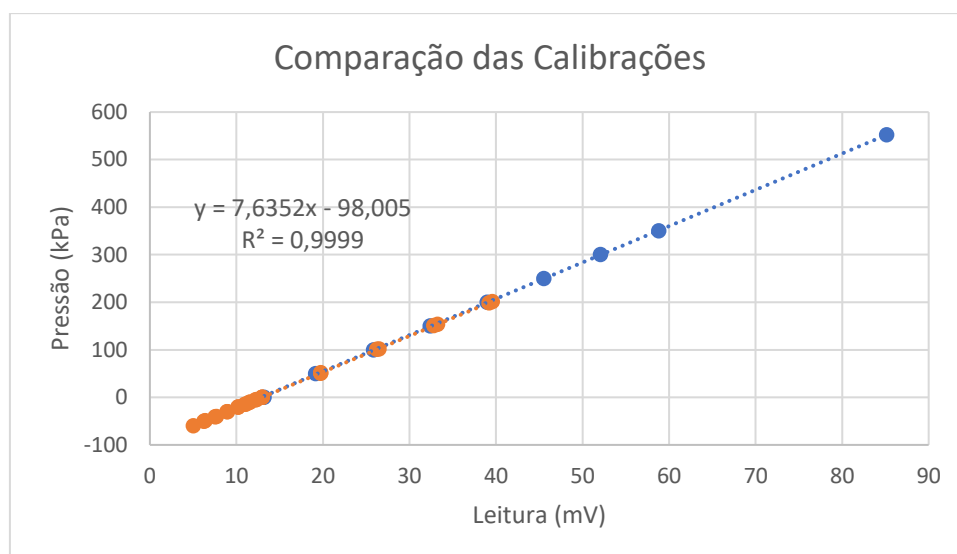


Figura 4.18: Gráfico comparativo entre as duas calibrações realizadas no transdutor de pressão do tensiômetro.

4.6.2.

Dados da tensiometria

A Figura 4.19 mostra as variações de sucção obtidas pela sonda tipo TDR instalada no segundo patamar (sucções obtidas da correlação sucção x umidade volumétrica, gerada pela curva característica) e aquelas medidas diretamente do tensiômetro, instalado no terceiro patamar. Tais dados referem-se apenas ao período de funcionamento do tensiômetro. Percebem-se tendências de curva e valores de sucção semelhantes, variando entre 3 e 35 kPa, antes da ocorrência da pane. Esse tipo de comparação mostra que, possivelmente, os resultados obtidos pelo tensiômetro são coerentes. Além disso, pode-se entender que é possível obter parâmetros de sucção através do uso de sondas tipo TDR e das correlações geradas pelas curvas características com confiabilidade (Gregório, 2019).

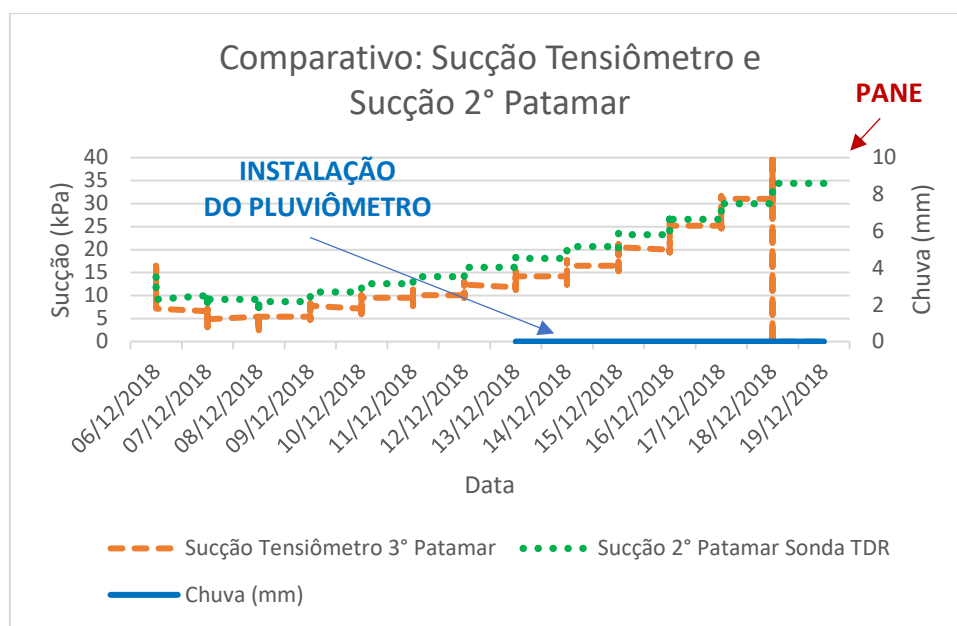


Figura 4.19: Comparativo entre as sucções medidas pela sonda tipo TDR instalada no segundo patamar e as medidas pelo tensiômetro.

A Figura 4.20 mostra as variações de sucção baseadas nas duas curvas características realizadas para o quarto patamar. Observa-se que o quarto patamar mostrou sucções muito superiores em relação ao segundo patamar. Primeiramente, tamanha diferença entre as sucções medidas no segundo e no quarto patamares pode ser atribuída às diferentes porcentagens de argila: o quarto patamar possui 37,7% de argila, enquanto o segundo patamar possui apenas 9,9%. Sabe-se que maiores concentrações de argila em um solo promove maiores valores de sucção, que podem chegar a números extremamente elevados. Outra questão que pode interferir nessa desigualdade observada seja a diferença estrutural entre os dois perfis em estudo.

As diferenças registradas por ambas as curvas características referentes ao quarto patamar já eram esperadas, pois as amostras usadas são de solos de profundidades diferentes, e, conseqüentemente, representam materiais distintos. No entanto, para que esse trabalho não gere informações confusas, é necessário que se escolha apenas uma curva característica que seja capaz de representar o solo do quarto patamar. A curva gerada por amostras de 20 cm³ mostra valores de sucção bastante superiores àquela gerada por amostras de 100 cm³. O segundo ensaio (100 cm³) foi realizado justamente devido às amplas diferenças entre as sucções obtidas no segundo e no quarto patamares. Vale, porém, destacar que a utilização de amostras maiores pode gerar dificuldades de

equalização de sucção entre a amostra e o papel filtro, demandando maior tempo de equalização na câmara úmida. A curva gerada pelas amostras maiores parece ser mais apropriada, pois os patamares, apesar de se mostrarem diferentes quanto à caracterização de seus solos, encontram-se bastante próximos. Além disso, o tensiômetro, instalado no terceiro patamar, não registrou valores de sucção tão superiores aos obtidos no segundo patamar. Percebe-se, inclusive, que a curva obtida com amostras menores não conseguiu representar adequadamente momentos em que a sucção era baixa, apresentando quedas repentinas e sucções zeradas; já a curva obtida com amostras maiores teve menos variação e conseguiu apresentar valores de sucção mais baixos, não zerando em momento algum. Pode-se dizer que as amostras maiores conseguiram uma melhor representação espacial do solo, e que seus resultados exprimiram melhor as situações em que as sucções variaram entre valores menores.

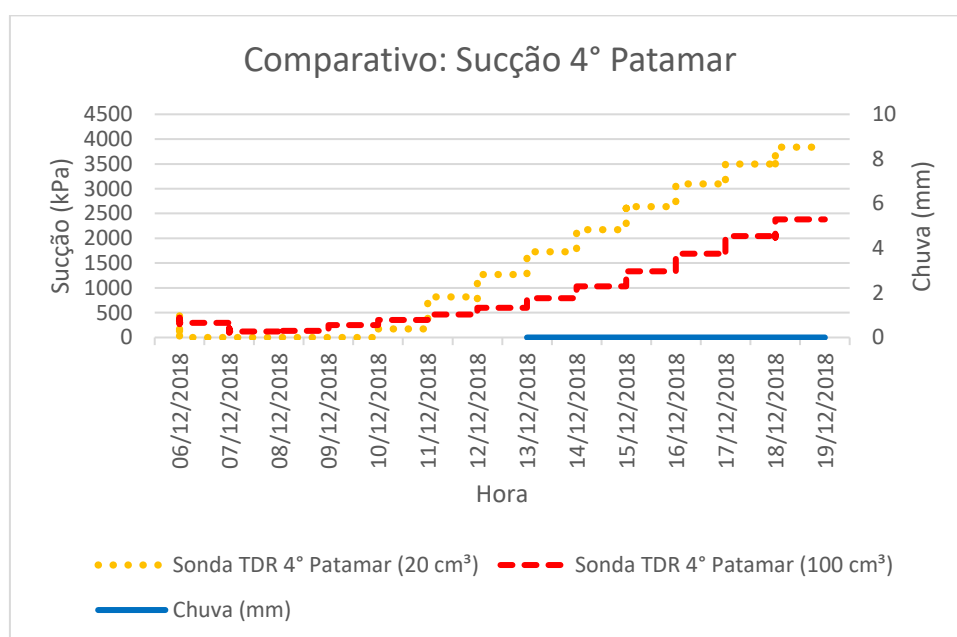


Figura 4.20: Comparativo entre as sucções obtidas pelas diferentes curvas características realizadas no quarto patamar.

As medidas feitas pelo tensiômetro, mostradas na Figura 4.21, mostram uma grande oscilação no dia 18 de dezembro de 2018. As medições mostravam sucção de aproximadamente 39 kPa, até que, às 20:45h, foi mostrada uma pressão positiva de cerca de 50 kPa. De acordo com a Tabela 4.21, as pressões oscilaram entre valores positivos e negativos até que elas pararam de ser registradas às

22:15h. Desde então, os valores medidos pelo tensiômetro não foram mais registrados pelo datalogger.

Tabela 4.21: Variação da pressão registrada pelo tensiômetro no momento da pane.

Hora (h)	20:15	20:30	20:45	21:00	21:15	21:30	21:45	22:00	22:15
Pressão (kPa)	-39,2	-39,2	49,9	18,5	-2,5	-6,0	-15,9	-179,5	Sem valor

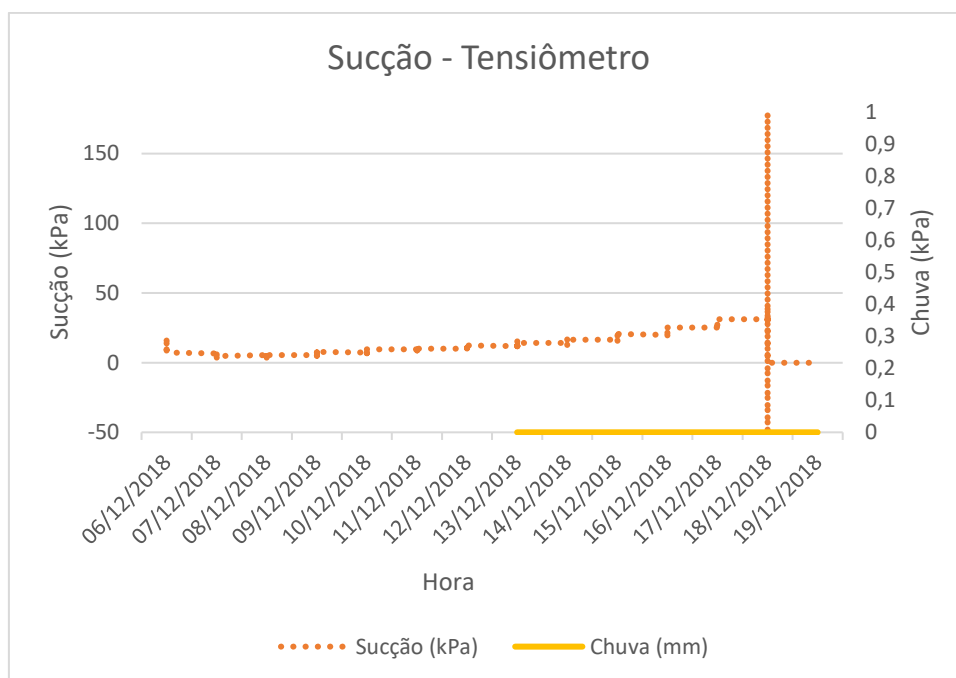


Figura 4.21: Variação de sucção medida pelo tensiômetro no momento da pane.

4.7. Resultados obtidos pelas sondas tipo TDR

Dentre as quatro sondas tipo TDR instaladas, apenas três apresentaram leituras ao longo do período de medição. O TDR 4, instalado a 90 cm de profundidade no quarto patamar, não apresentou leituras em nenhum momento. Portanto, os resultados apresentados representam a análise das leituras realizadas pelas três demais sondas.

Para melhor interpretação dos dados, foram separados alguns tópicos de maior interesse na pesquisa. São eles:

- Comportamento geral;
- Comportamento padrão de um dia sem chuva;

- Umidades máximas e mínimas alcançadas;
- Chuvas que mobilizam a Defesa Civil de Petrópolis;
- Problemas encontrados.

As sondas tipo TDR fornecem os valores da umidade volumétrica do solo (θ). Através de correlações foi possível obter os valores de umidade gravimétrica (ω) (4.1) e de grau de saturação (S) (4.2), e com as curvas características foram obtidas as sucções. A análise feita no item 4.5 mostrou que o modelo escolhido para obter os valores de sucção foi o modelo de Fredlund & Xing (1994). Como não foram feitos ensaios de caracterização nem de papel filtro no terceiro patamar, para ele será mostrada apenas a variação da umidade volumétrica gerada pela chuva.

$$\omega = \theta \cdot \frac{\rho_w}{\rho_d} \quad (4.1)$$

$$S = \frac{\omega \cdot G_s}{e} \quad (4.2)$$

onde:

ρ_w : massa específica da água;

ρ_d : massa específica seca do solo;

G_s : densidade relativa dos grãos do solo;

e : índice de vazios do solo.

4.7.1. Comportamento geral

A Figura 4.22 mostra uma visão geral das umidades volumétricas e das chuvas ocorridas ao longo do período de medição. Para facilitar a análise dos dados, o dia de instalação do pluviômetro (12 de dezembro de 2018) e o dia da retirada do equipamento para manutenção (13 de março de 2019) não foram contabilizados.

Para que a sonda tipo TDR possa, futuramente, ser um instrumento útil em um sistema de alerta, é fundamental que ela tenha um tempo de resposta curto, e o gráfico da Figura 4.22 indica boas respostas dos instrumentos. Observa-se que a ocorrência de chuva provoca a elevação das umidades volumétricas, e sua ausência provoca a sua redução gradativa. O gráfico também fornece os períodos

de maior incidência de chuvas e os períodos de seca, o que auxilia na escolha dos intervalos a serem aqui analisados.

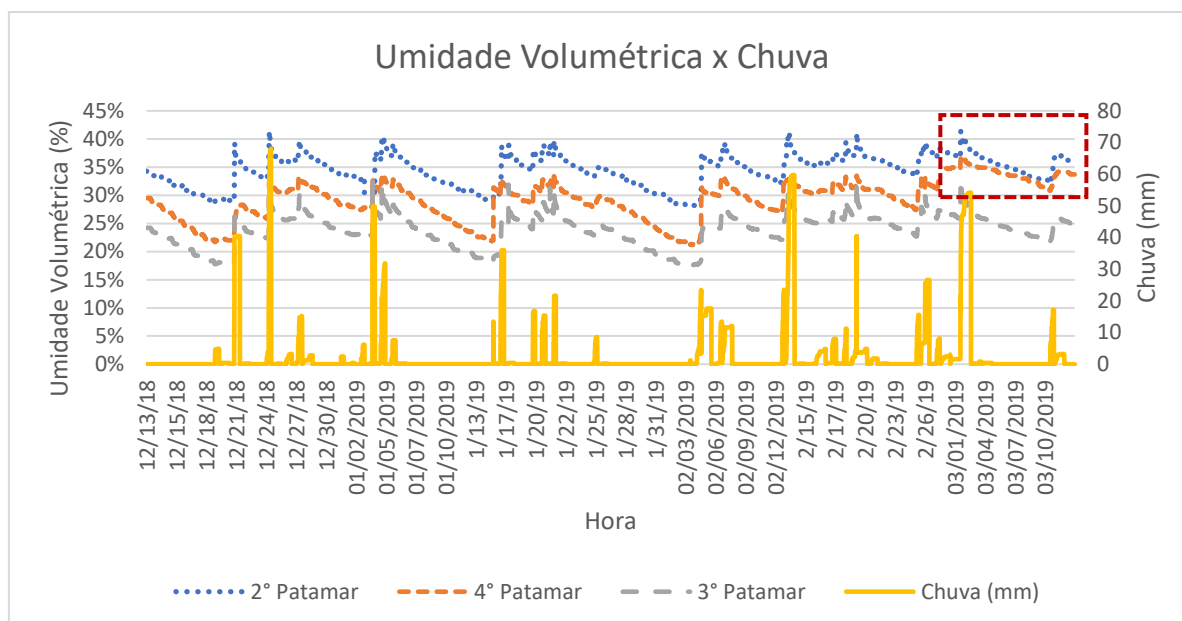


Figura 4.22: Gráfico umidade volumétrica x chuva referente a todo o período de medição das sondas tipo TDR, entre 12 de dezembro de 2018 e 13 de março de 2019.

Para complementar essas informações, a Tabela 4.22 traz um panorama dos dias de chuva e da sua intensidade ao longo do dia. Essa é mais uma ferramenta para facilitar na seleção dos períodos de maior importância nesse estudo.

Observa-se uma diferença padronizada entre as umidades volumétricas medidas pelos TDRs. De acordo com o gráfico da Figura 4.22, as medições mostraram umidades volumétricas maiores no segundo patamar, intermediárias no quarto patamar e inferiores no terceiro patamar. Essa foi uma tendência observada em todo o período de medição.

Outra questão observada refere-se ao mês de março: as medições, destacadas pelo quadrado tracejado vermelho, indicaram um crescimento da umidade volumétrica registrada no quarto patamar. Uma hipótese para explicar essa atitude surge ao observar o comportamento das chuvas no período anterior: ocorreu um período de chuva prolongado, que pode ter provocado a retenção da água no solo mais argiloso do quarto patamar. Isso pode ser um motivo que explique o aumento da umidade volumétrica nesse momento.

Tabela 4.22: Panorama geral das chuvas ocorridas ao longo do período de medição.

DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SAB
				13/dez	14/dez	15/dez
16/dez	17/dez	18/dez	19/dez	20/dez	21/dez	22/dez
23/dez	24/dez	25/dez	26/dez	27/dez	28/dez	29/dez
30/dez	31/dez	01/jan	02/jan	03/jan	04/jan	05/jan
06/jan	07/jan	08/jan	09/jan	10/jan	11/jan	12/jan
13/jan	14/jan	15/jan	16/jan	17/jan	18/jan	19/jan
20/jan	21/jan	22/jan	23/jan	24/jan	25/jan	26/jan
27/jan	28/jan	29/jan	30/jan	31/jan	01/fev	02/fev
03/fev	04/fev	05/fev	06/fev	07/fev	08/fev	09/fev
10/fev	11/fev	12/fev	13/fev	14/fev	15/fev	16/fev
17/fev	18/fev	19/fev	20/fev	21/fev	22/fev	23/fev
24/fev	25/fev	26/fev	27/fev	28/fev	01/mar	02/mar
03/mar	04/mar	05/mar	06/mar	07/mar	08/mar	09/mar
10/mar	11/mar	12/mar				

LEGENDA	
Chuva acima de 20 mm	
Chuva entre 5 mm e 20 mm	
Chuva abaixo de 5 mm	
Sem chuva	
Problemas	

A Figura 4.23 e a Figura 4.24 mostram a variação das sucções provocada pela chuva ao longo do período de medição no segundo e no quarto patamares, respectivamente. Essas sucções foram obtidas pelas curvas características de cada patamar ajustadas pelo modelo de Fredlund & Xing (1994) – o segundo patamar com as amostras de 20 cm³ e o quarto patamar com as amostras de 100 cm³.

Apesar de ambos variarem em faixas de sucção bastante diferentes, com intervalos de sucção muito superiores no quarto patamar em relação ao segundo, eles apresentam curvas de variação muito semelhantes. É nítida a queda de sucção quando se inicia um período chuvoso; assim que tal período cessa, a sucção retoma seu crescimento imediatamente. Pode-se fazer um paralelo entre as oscilações de sucção com a permeabilidade dos solos: as quedas e retomadas são acentuadas porque os valores de permeabilidade característicos de ambos os solos são altos.

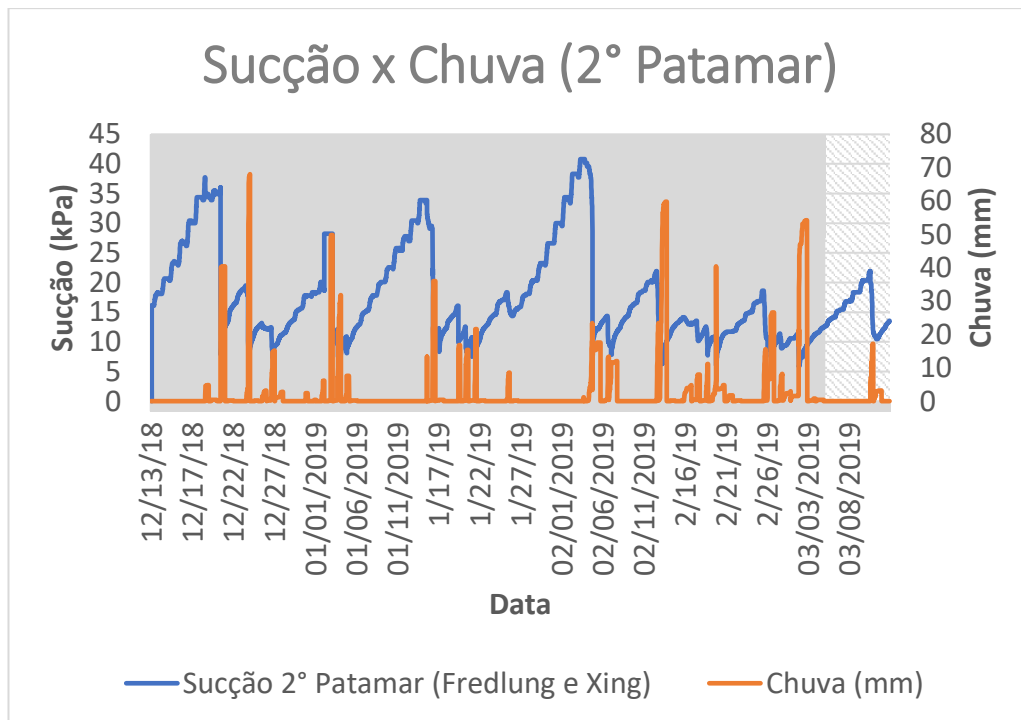


Figura 4.23: Gráfico sucção x chuva para o segundo patamar, referente a todo o período de medição (13 de dezembro de 2018 a 12 de março de 2019).

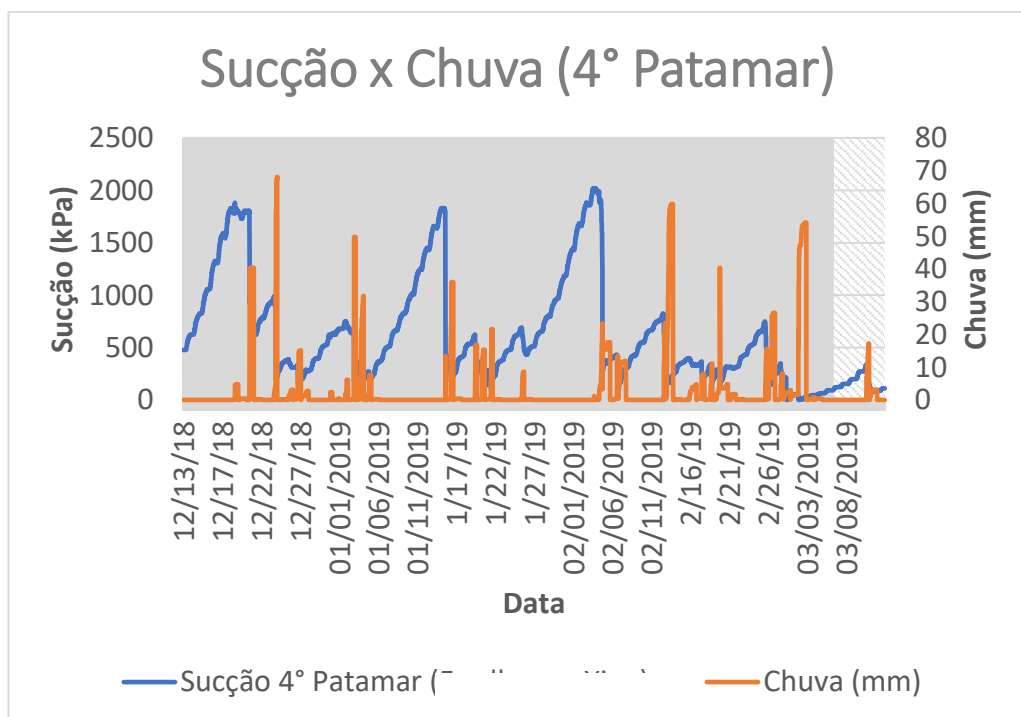


Figura 4.24: Gráfico sucção x chuva para o quarto patamar, referente a todo o período de medição (13 de dezembro de 2018 a 12 de março de 2019).

4.7.2. Comportamento padrão de um dia sem chuva

Para que se entenda o funcionamento do instrumento, é fundamental que se perceba o padrão apresentado em um dia sem chuva. Esse padrão é ilustrado na Figura 4.25, que compreende um gráfico umidade volumétrica x chuva referente ao dia 14 de dezembro de 2018.

A análise do gráfico mostra uma tendência de redução da umidade volumétrica ao longo do dia. Essa redução é intensificada no período de maior incidência solar do dia, delimitado pelas linhas tracejadas de cor vermelha. Essa redução é esperada, já que a incidência solar permite uma maior evapotranspiração.

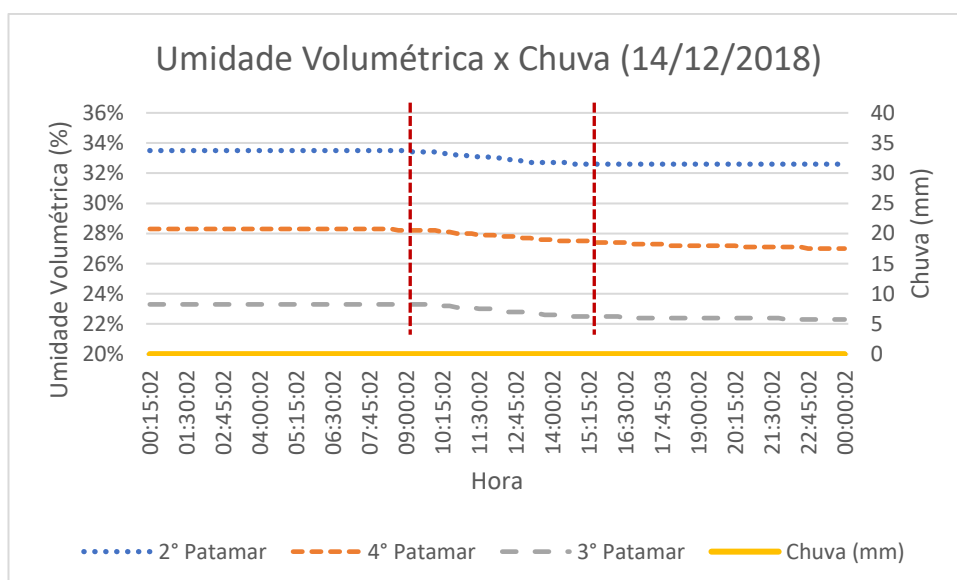


Figura 4.25: Gráfico umidade volumétrica x chuva referente ao dia 14 de dezembro de 2018.

4.7.3. Umidades máximas e mínimas alcançadas

É necessário conhecer os valores extremos medidos pelas sondas tipo TDR a fim de se obter um panorama geral do que ocorreu ao longo do período de medição. A Figura 4.26 mostra as datas em que as umidades volumétricas atingiram seus valores extremos.

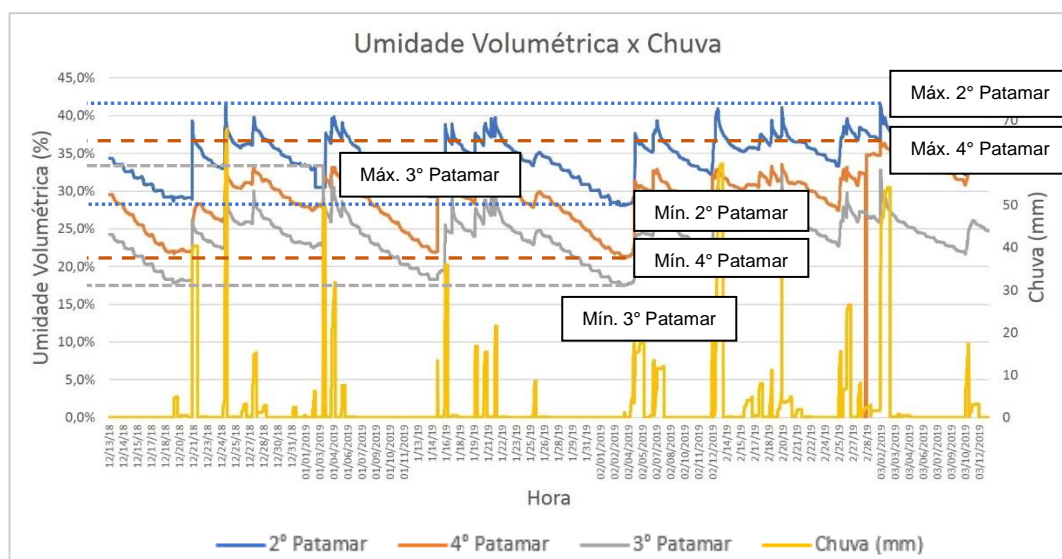


Figura 4.26: Umidades máximas e mínimas obtidas nos três patamares ao longo do período de medição.

A Tabela 4.23 mostra as umidades volumétricas máximas alcançadas ao longo do período de medição. Nela também são mostrados os valores de sucção, de umidade gravimétrica e de grau de saturação respectivos.

Tabela 4.23: Umidades volumétricas máximas alcançadas pelos TDRs e os respectivos valores de sucção, umidade gravimétrica e grau de saturação.

Localização TDR	θ máx.	ψ mín.	w máx.	S máx.	Data
2º Patamar	41,4%	5,82 kPa	41,3%	66,7%	24/12/2018 02/03/2019
4º Patamar	36,6%	0,2 kPa	25,0%	84,7%	02/03/2019
3º Patamar	33,2%	-	-	-	03/01/2019

O segundo patamar mediu a maior umidade volumétrica ($\theta_{\text{máx}} = 41,4\%$) nos dias 24 de dezembro de 2018 e 02 de março de 2019.

O dia 24 de dezembro de 2018 teve um total de 68 mm de chuva, intensificada entre às 18:45h e 19:00h, momento em que choveu 11,4 mm; a Tabela 4.22 mostra que esse dia foi antecedido por um dia sem chuva; já a análise das suas leituras indicadas na Figura 4.27 mostra que nesse dia a umidade volumétrica variou aproximadamente 8 pontos percentuais em 2 horas e 15 minutos, intervalo que contabilizou o início da chuva mais intensa até o momento

do seu pico. Percebe-se que esse pico de umidade volumétrica foi provocado por uma chuva que se intensificou rapidamente. No momento em que esse pico foi alcançado (às 21:00h) a chuva já não era tão intensa: apenas 3,4 mm de chuva em 15 minutos, que diminuíram com o passar do tempo.

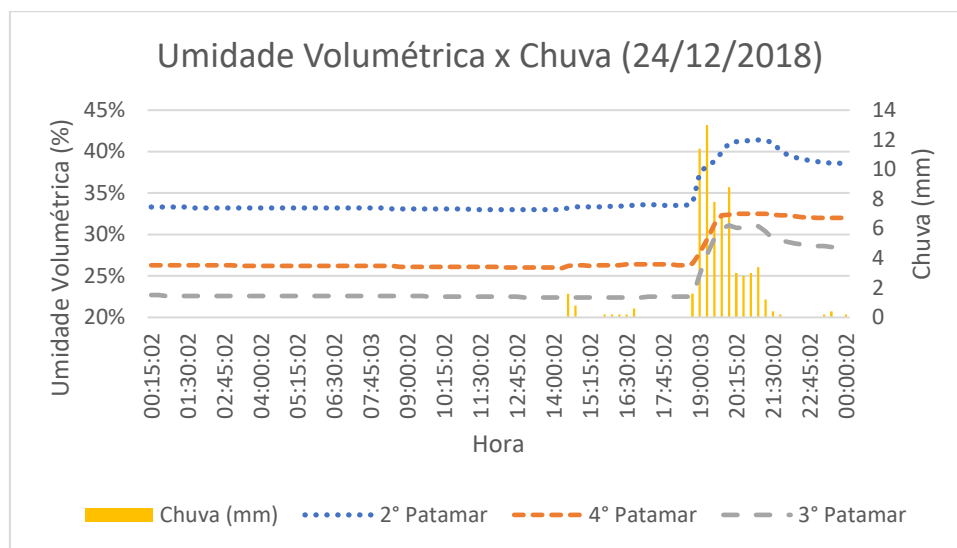


Figura 4.27: Leituras dos TDRs no dia 24 de dezembro de 2018.

Quanto ao dia 02 de março de 2019, a chuva totalizou 54,2 mm e se intensificou entre às 00:00h e 00:30h, momento em que choveu 28,2 mm. A Tabela 4.22 mostra que esse dia foi antecedido por um dia com chuva superior a 20 mm; já a análise das leituras indicadas na Figura 4.28 mostra que a chuva já havia iniciado na noite anterior, aproximadamente às 23:30h, e que choveu 19,2 mm entre às 23:30h e 00:00h do dia 01 – isso, somado aos 28,2 mm de chuva ocorridas no próprio dia 02, gerou uma variação na umidade volumétrica de 4,7 pontos percentuais em apenas 1 hora (das 23:30h às 00:30h). Nesse caso, o pico de umidade volumétrica, ocorrido às 00:30h, também foi provocado por uma chuva intensa. Porém, o solo já estava bastante úmido, pois já havia chovido no dia anterior (e a pequena variação de umidade volumétrica comprova isso). Após atingir o pico, a chuva parece não ter tido intensidade forte o suficiente para aumentar esse valor, pois choveu 5,8 mm nos 15 minutos posteriores, que diminuíram gradativamente com o passar do tempo.

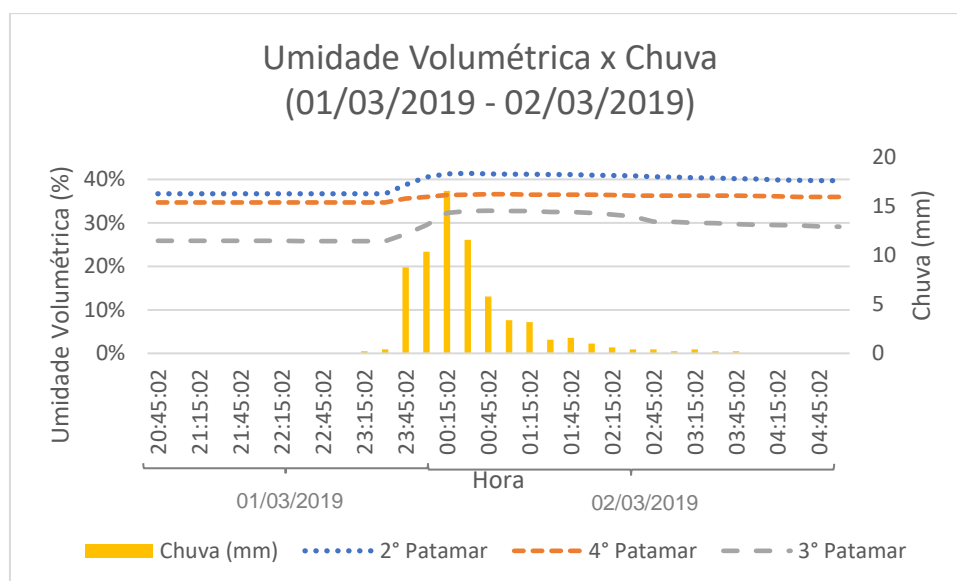


Figura 4.28: Leituras dos TDRs entre os dias 01 de março de 2019 e 02 de março de 2019.

A partir do valor de umidade volumétrica máxima ($\theta_{\text{máx}} = 41,4\%$), a sucção mínima de 5,82 kPa foi obtida pelo modelo de Fredlund & Xing (1994). Se usarmos como referência o ensaio de papel filtro, o valor de sucção obtido é coerente, já que um dos pontos desse ensaio indicou uma sucção de 5,4 kPa para uma umidade volumétrica de 43,7%.

A umidade gravimétrica obtida pela Eq. (4.1) foi de 41,3% e o grau de saturação obtido pela Eq. (4.2) foi de 66,7%. As diferenças entre esses dados e os encontrados no ensaio de papel filtro estão dentro dos valores estimados pelas amostras indeformadas.

O quarto patamar também mediu a maior umidade volumétrica ($\theta_{\text{máx}} = 36,6\%$) no dia 02 de março de 2019. Os dados de chuva já foram explicados anteriormente, e as leituras podem ser vistas novamente na Figura 4.28. O momento em que o pico foi atingido difere: ocorreu às 00:45h. A variação de umidade volumétrica foi de 1,9 pontos percentuais em 1 hora e 15 minutos.

A sucção mínima, alcançada pela curva característica com as amostras de 100 cm³, foi 0,2 kPa. Portanto, apesar de alcançar sucções bastante superiores em relação ao segundo patamar, o modelo mostra que tem sensibilidade para representar sucções próximas a zero. O grau de saturação máximo foi de 84,7%; já a umidade gravimétrica foi de 25,0%.

Por fim, o terceiro patamar mediu a maior umidade volumétrica ($\theta_{\text{máx}} = 33,2\%$) no dia 03 de janeiro de 2019.

O dia 03 de janeiro de 2019 teve um total de 49,8 mm de chuva em aproximadamente 1 hora, com maior intensidade nos primeiros 30 minutos (39,6 mm); a Tabela 4.22 mostra que os dias anteriores apresentaram chuvas pouco intensas; a análise das leituras indicadas na Figura 4.29 mostra que nesse dia a umidade volumétrica no terceiro patamar variou 10,4 pontos percentuais em 30 minutos até atingir o valor de pico. Infelizmente os valores de sucção, umidade gravimétrica e grau de saturação não foram obtidos por falta de ensaios de laboratório.

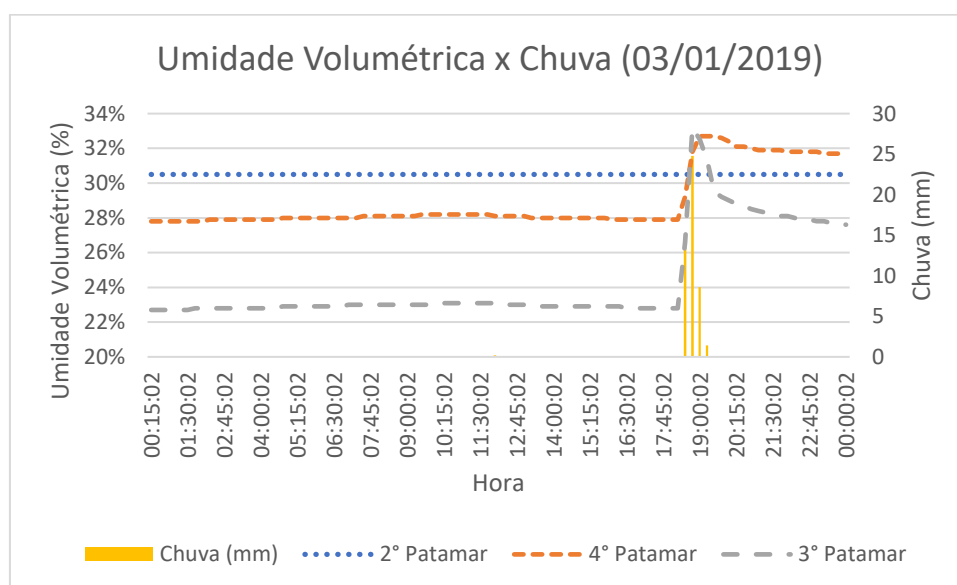


Figura 4.29: Leituras dos TDRs no dia 03 de janeiro de 2019.

Quanto às umidades volumétricas mínimas, estas são indicadas na Tabela 4.24, que também mostra os respectivos valores de sucção, umidade gravimétrica e grau de saturação.

Tabela 4.24: Umidades volumétricas mínimas alcançadas pelos TDRs e os respectivos valores de sucção, umidade gravimétrica e grau de saturação.

Localização TDR	θ mín.	ψ máx.	w mín.	S mín.	Data
2° Patamar	28,1%	40,8 kPa	28,0%	45,3%	03/02/2019
					04/02/2019
4° Patamar	21,2%	2016,4 kPa	14,4%	49,1%	03/02/2019
					04/02/2019
3° Patamar	17,5%	-	-	-	03/02/2019

Os três patamares tiveram seus valores mínimos registrados no mesmo período, entre os dias 03 e 04 de fevereiro de 2019, apresentado na Figura 4.30.

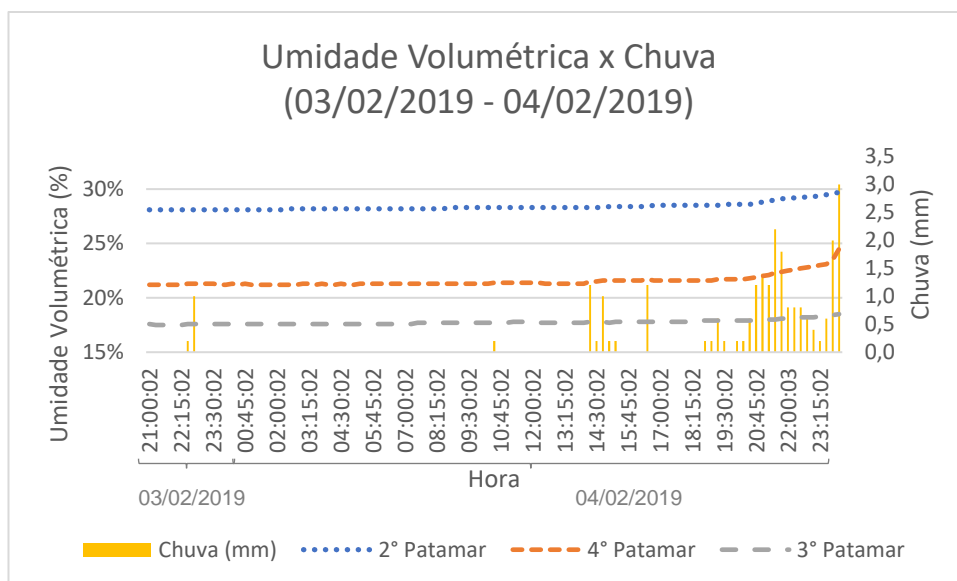


Figura 4.30: Leituras dos TDRs entre os dias 03 de fevereiro de 2019 e 04 de fevereiro de 2019.

Conforme mostra a Tabela 4.22, o período que antecede essa data totalizou sete dias sem chuvas (27 de janeiro de 2019 a 02 de fevereiro de 2019), e um dia com um total de chuva inferior a 5 mm (dia 26 de janeiro de 2019). O período sem chuva só não foi maior do que o ocorrido entre os dias 07 de janeiro de 2019 e 14 de janeiro de 2019.

No final do dia 03 de fevereiro de 2019 uma chuva de 1,2 mm ocorrida em um intervalo de 30 minutos foi insuficiente para aumentar a umidade volumétrica no segundo patamar, mas fez com que houvesse pequena oscilação no quarto patamar e leve aumento de umidade no terceiro patamar. Isso fez com que o dia 04 de fevereiro de 2019 também apresentasse valores mínimos no terceiro e quarto patamares. Ao longo desse dia as umidades seguiram crescendo lentamente, até que começasse a chover ao fim do dia. A chuva começou muito suave, ainda insuficiente para elevar significativamente as umidades. O panorama só começou a mudar por volta das 20:45h, quando a chuva ganhou um pouco mais de intensidade.

A sucção máxima avaliada no segundo patamar foi de 40,8 kPa, enquanto a alcançada no quarto patamar foi de 2016,4 kPa. O quarto patamar apresentou maiores oscilações de sucção, pois a Tabela 4.23 mostra que a sucção mínima

medida por ele foi próxima a zero. Algo que ajuda a entender esse comportamento são os valores de umidade gravimétrica mínimos: no segundo patamar o valor foi de 28,0%, enquanto no quarto patamar o valor foi de 14,5%. A umidade medida no quarto patamar é bastante inferior, e sabe-se que conforme as umidades vão diminuindo as sucções crescem consideravelmente. Quanto ao grau de saturação, os valores foram semelhantes: no segundo patamar foi registrado 45,3% e no quarto patamar 49,1%.

4.7.4.

Chuvas que mobilizam a Defesa Civil de Petrópolis

A Defesa Civil de Petrópolis (2013-2014) explica, em seu plano de contingência, as situações em que ocorre a sua mobilização. São elas:

- Para chuvas isoladas sem a ocorrência de acumulados: 50 mm em 1 hora;
- Para chuvas com acumulado em 48 horas de 55 mm: 40 mm em 1 hora;
- Com intervalo de chuvas menor que 24 horas: volume de 10 mm em 15 minutos; 15 mm em 30 minutos;
- Previsão confirmada de 30 mm em conjunto com um dos seguintes parâmetros acumulados: acumulado de 70 mm em 24 horas; acumulado de 110 mm em 96 horas; acumulado de 270 mm em um mês.

Para melhor análise dos dados, cada tópico (exceto o último, que se trata de uma previsão) será trabalhado separadamente.

4.7.4.1.

Chuvas isoladas sem acumulados: 50 mm em 1 hora

Não foram registrados casos com essas características ao longo do período de medição.

4.7.4.2.

Chuvas com acumulado de 55 mm em 48 horas: 40 mm em 1 hora

Não foram registrados casos com essas características ao longo do período de medição.

4.7.4.3.

Intervalo entre chuvas menor do que 24 horas: 10 mm em 15 minutos e 15 mm em 30 minutos

O primeiro caso a ser analisado ocorreu entre os dias 02 e 04 de janeiro de 2019. No dia 02 de janeiro ocorreu uma pequena chuva de 6,2 mm, e o intervalo entre essa chuva e a ocorrida no dia 03 foi inferior a 24 horas. O gráfico da Figura 4.31 mostra que o intervalo entre a chuva do dia 03 e a do dia 04 de janeiro também foi inferior a 24 horas. O destaque será dado aos dias 03 e 04 de janeiro, pois eles apresentaram chuvas de maior volume.

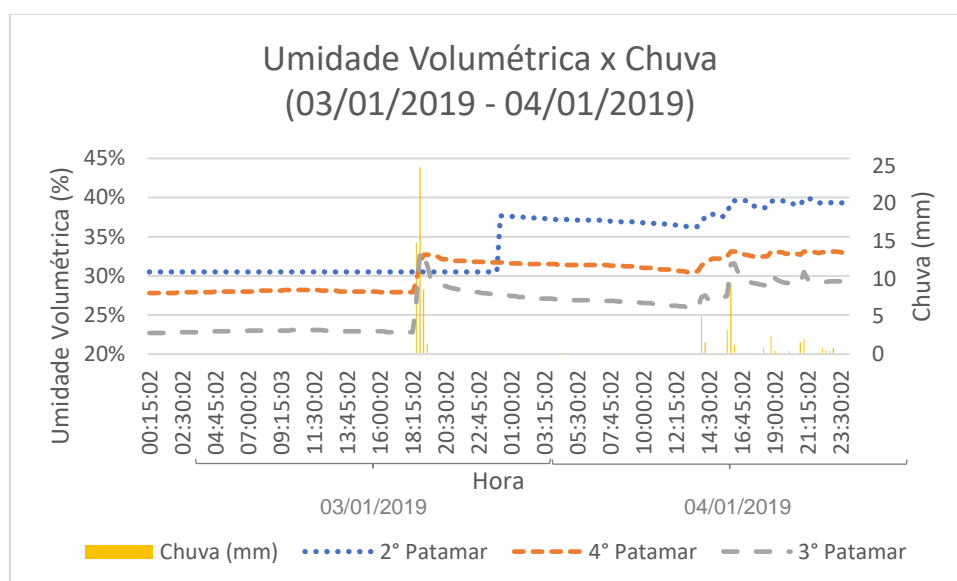


Figura 4.31: Leituras das sondas TDR entre os dias 03 e 04 de janeiro de 2019.

O momento mais crítico durou 30 minutos e ocorreu entre às 18:15h e 18:45h do dia 03 de janeiro de 2019. O primeiro intervalo de 15 minutos registrou 14,8 mm e o segundo intervalo de 15 minutos registrou 24,8 mm, o que gerou um acumulado de 39,6 mm em apenas 30 minutos.

É necessário enfatizar que ocorreu algum problema na sonda TDR localizada no segundo patamar, que apresentou a mesma umidade volumétrica (30,5%) ao longo de todo o dia 03 de janeiro de 2019 e não mostrou alterações com a chuva. Esse problema será enfatizado no item 4.7.5. Diante disso, apenas os dados referentes ao quarto patamar são analisados.

A Figura 4.32 mostra a variação da sucção ao longo dos dois dias. Nota-se que seus valores variam próximo a 700 kPa em clima seco ou com um pequeno

volume de chuva. Quando a chuva se intensifica, a umidade volumétrica aumenta com rapidez e, conseqüentemente, a sucção despenca vertiginosamente, chegando a menos de 200 kPa. O cessar da chuva permite um aumento da sucção, que ultrapassa os 350 kPa até que um novo período de chuva reduz novamente a sucção a valores próximos a 150 kPa. Nota-se que, apesar da pequena variação de umidade volumétrica, as mudanças de sucção ocorrem em significativas proporções. Isso se deve ao formato da curva característica referente ao quarto patamar.

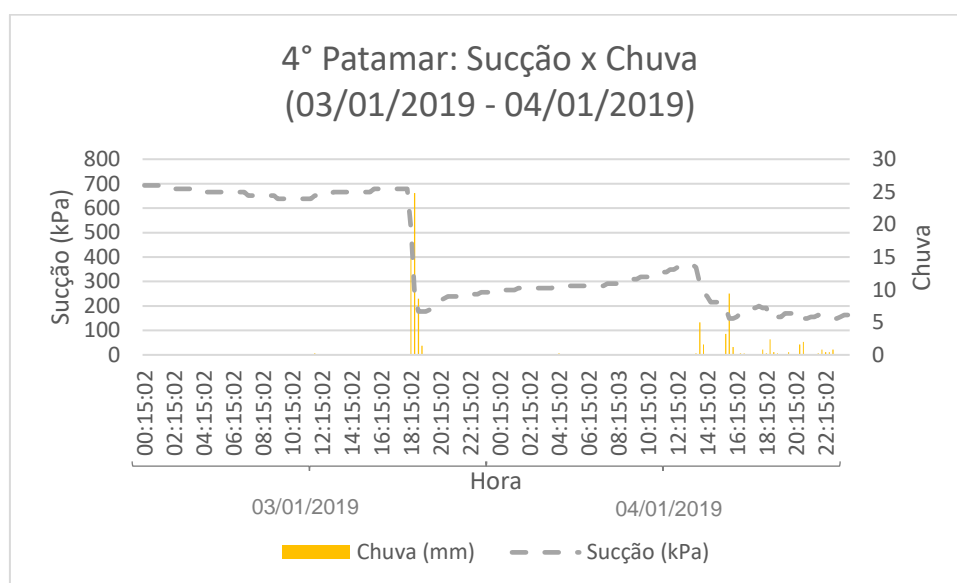


Figura 4.32: Valores de sucção entre os dias 03 e 04 de janeiro de 2019.

Já a Figura 4.33 mostra a variação dos valores medidos de umidade volumétrica (θ), e dos valores calculados de umidade gravimétrica (ω) e grau de saturação (S), ao longo dos dois dias. Observa-se que a chuva ocorrida no dia 03 de janeiro de 2019 provocou um pico de umidade volumétrica de 32,7%. Conseqüentemente a maior umidade gravimétrica nesse período foi 22,3% e o maior grau de saturação foi 75,7%. Com o cessar da chuva a umidade volumétrica foi caindo, até o retorno da chuva no dia 04 de janeiro de 2019. Apesar de ela ter apresentado menores volumes horários, sua duração foi mais prolongada e isso fez com que as umidades volumétricas voltassem a subir, alcançando novo pico de 33,1%. Conseqüentemente a umidade gravimétrica alcançou 22,6% e o grau de saturação 76,6%.

As variações entre os valores mínimos e máximos não foram tão abruptas. Entre esses dias a umidade volumétrica teve um valor mínimo de 27,8% e um

máximo de 33,1%; consequentemente, a umidade gravimétrica variou entre 19,0% e 22,6% e o grau de saturação oscilou entre 64,4% e 76,6%. Os gráficos mostrados na Figura 4.33 mostram que as variações são, de fato, suaves.

A Defesa Civil de Petrópolis (2019) divulgou um boletim referente ao dia 03 de janeiro de 2019 informando que foram registradas sete ocorrências em diferentes bairros, sem vítimas fatais. Apesar da intensidade da chuva, nenhuma das 20 sirenes instaladas em zonas de risco foi acionada.

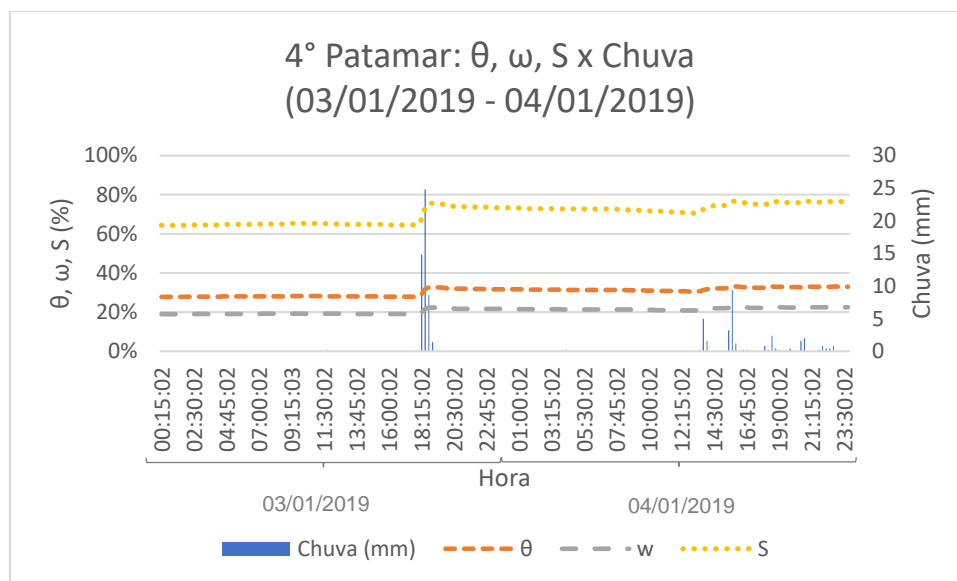


Figura 4.33: Valores de θ , ω e S entre os dias 03 e 04 de janeiro de 2019.

O próximo caso a ser analisado ocorreu entre os dias 15 e 16 de janeiro de 2019. No dia 15 de janeiro ocorreu uma chuva de 13,4 mm e, novamente, o intervalo entre as chuvas foi menor do que 24 horas. O destaque será dado ao dia 16 de janeiro, pois é nele que ocorre um maior volume de chuva.

É possível ver no gráfico da Figura 4.34 que entre às 16:15h e 16:30h foram registrados 14 mm de chuva – valor superior aos 10 mm estimados pela Defesa Civil de Petrópolis (2013-2014) para um intervalo de 15 minutos.

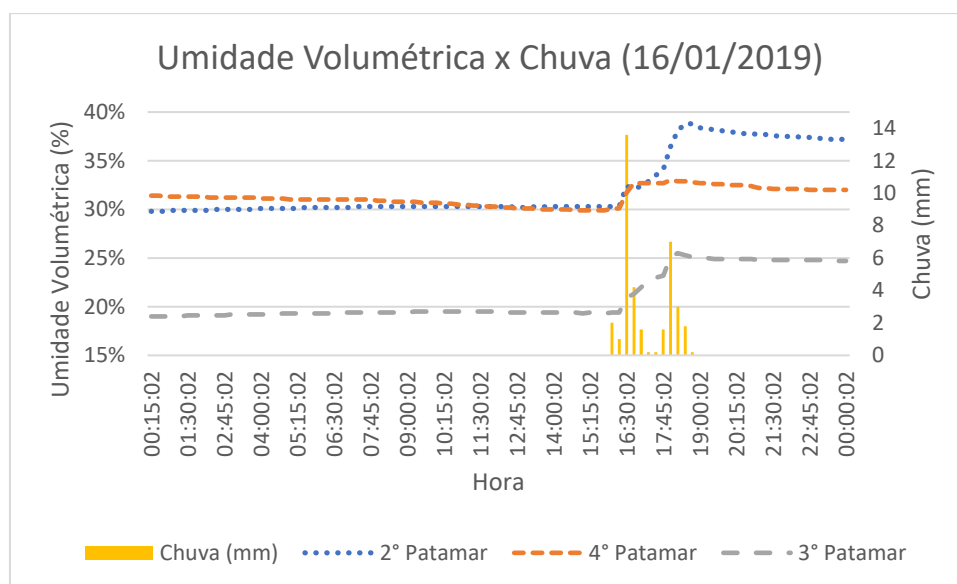


Figura 4.34: Leituras das sondas TDR no dia 16 de janeiro de 2019.

A Figura 4.35 mostra a variação da sucção no segundo patamar ao longo do dia. Os valores variaram próximo aos 30 kPa até o início da chuva, quando a sucção cai significativamente até atingir um valor mínimo de 8,5 kPa. Assim que a chuva termina a sucção volta a aumentar, o que significa uma pequena redução de umidade no solo – a água não ficou retida.

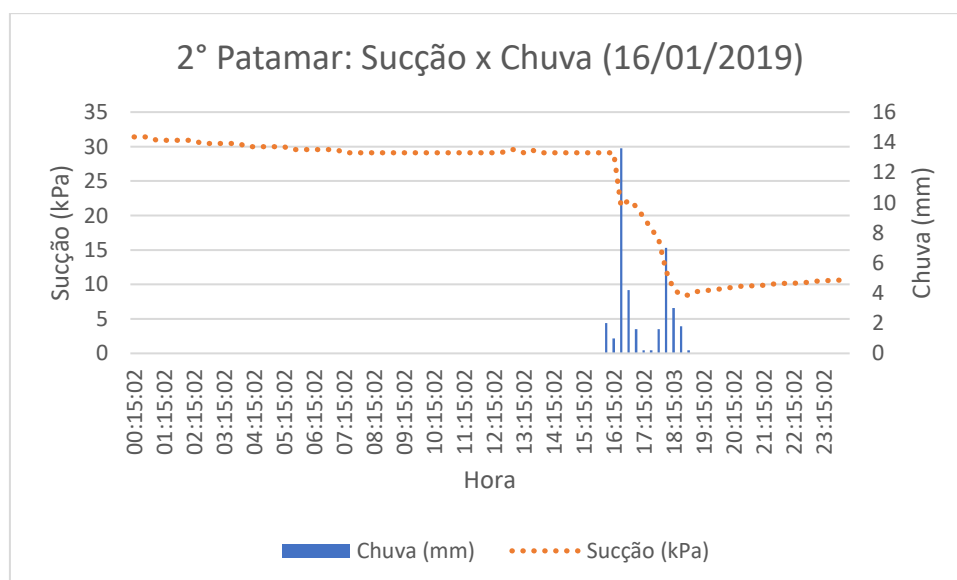


Figura 4.35: Valores de sucção referentes ao segundo patamar no dia 16 de janeiro de 2019.

A Figura 4.36, por sua vez, mostra a variação dos valores de θ , ω e S no segundo patamar ao longo do dia. Nesse patamar é possível observar valores praticamente iguais das umidades volumétrica e gravimétrica. Como observado na Eq. (4.1), isso é justificado pela massa específica seca (ρ_d) desse solo, cujo valor ($1,003 \text{ g/cm}^3$) é praticamente igual à massa específica da água. A chuva provocou um pico de umidade volumétrica de 38,8%. Consequentemente, a maior umidade gravimétrica teve valor semelhante, 38,7%. Já o maior grau de saturação foi de 62,5%. Após a chuva, as umidades gravimétrica e volumétrica ficaram próximas a 40% e a saturação próxima a 60%.

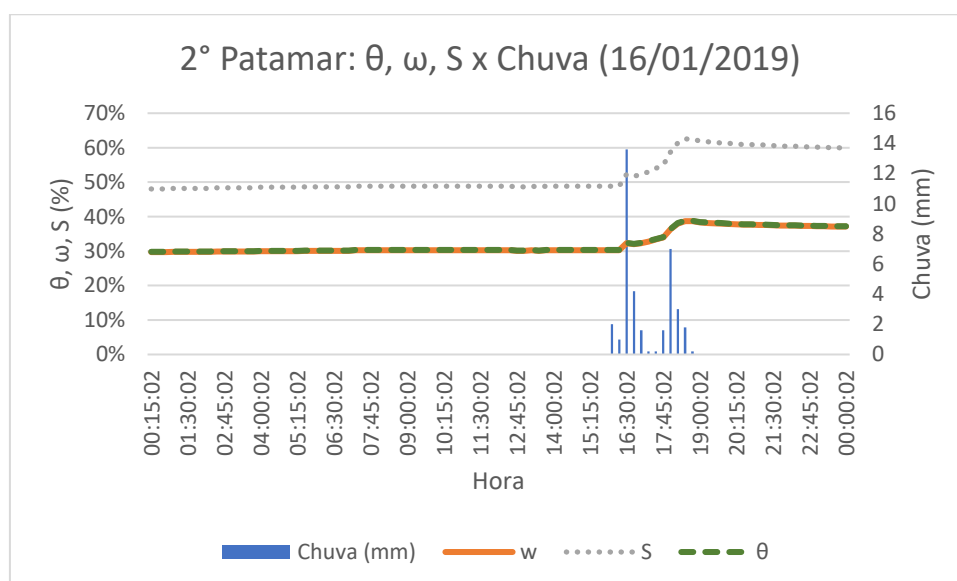


Figura 4.36: Valores de θ , ω e S referentes ao segundo patamar no dia 16 de janeiro de 2019.

Apesar dessa chuva ter tido menor intensidade em relação ao caso dos dias 02 a 04 de janeiro de 2019, as variações entre os valores máximo e mínimo foram maiores no segundo patamar. Nesse dia a umidade volumétrica variou entre 29,8% e 38,8%; consequentemente, a umidade gravimétrica oscilou entre 29,7% e 38,7% e o grau de saturação teve um mínimo de 48,0% e um máximo de 62,5%.

Quanto ao quarto patamar, a Figura 4.37 mostra a variação dos valores de sucção, que vai apresentando crescimento ao longo do dia: na madrugada apresenta valor próximo de 300 kPa e antes da chuva já mostra um valor acima de 400 kPa. Os primeiros 30 minutos de chuva reduzem pouco a sucção, mas os 14 mm de chuva ocorridos das 16:15h até às 16:30h provocam maior queda de

sucção, que passa a ser menor do que 200 kPa. Com o fim da chuva, ela volta a crescer, porém em ritmo lento, ficando um pouco acima dos 200 kPa.

Já a Figura 4.38 mostra a variação dos valores de θ , ω e S no quarto patamar ao longo do dia. O comportamento é semelhante ao apresentado no caso dos dias 02 a 04 de janeiro de 2019, como mostrado na Figura 4.33.

A chuva fez com que a umidade volumétrica alcançasse 33,0%. Consequentemente, a maior umidade gravimétrica foi de 22,5% e o maior grau de saturação foi de 76,4%. Após o pico provocado pela chuva, os três valores voltaram a patamares próximos aos de antes da chuva.

Por fim, as oscilações entre os valores máximos e mínimos mostrados no quarto patamar são pequenas, semelhante ao ocorrido no caso dos dias 02 a 04 de janeiro de 2019. Nesse dia, a umidade volumétrica variou entre 29,9% e 33,0%; consequentemente, a umidade gravimétrica oscilou entre 20,4% e 22,5% e o grau de saturação teve um mínimo de 69,2% e um máximo de 76,4%. Comparando-se os gráficos mostrados nas Figura 4.36 e Figura 4.38 é fácil perceber que o segundo tem menores oscilações.

A Defesa Civil de Petrópolis (2019) não divulgou nenhum boletim referente à chuva ocorrida no dia 16 de janeiro de 2019.

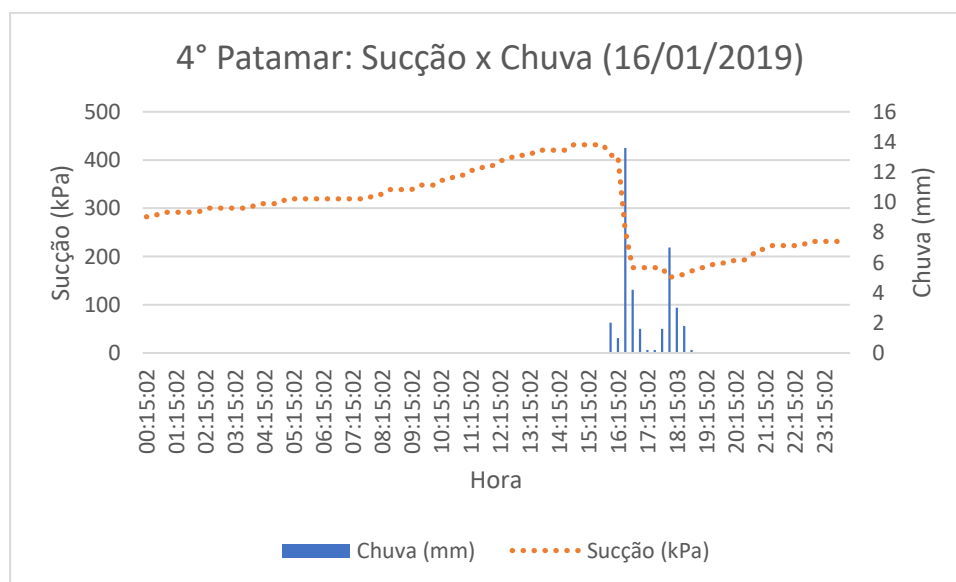


Figura 4.37: Valores de sucção referentes ao quarto patamar no dia 16 de janeiro de 2019.

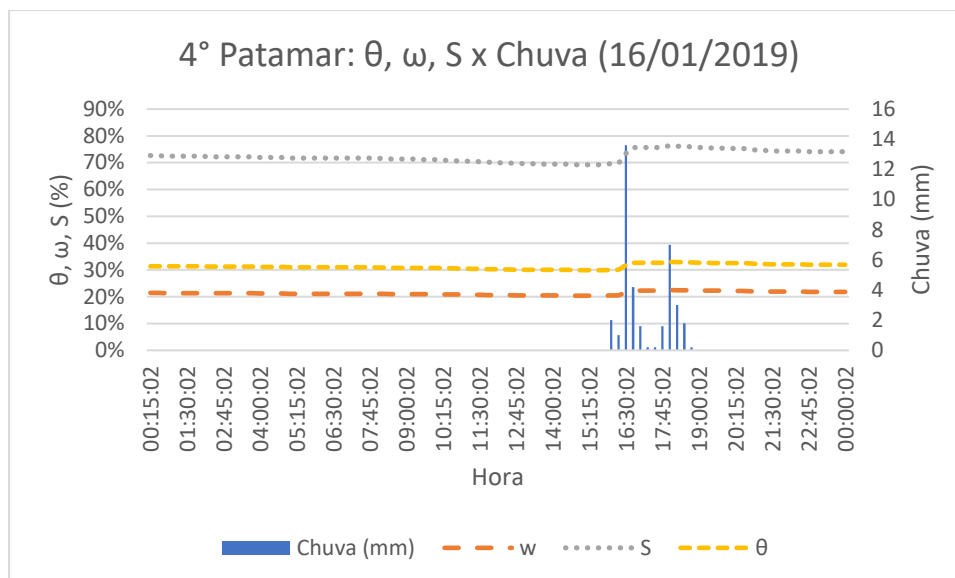


Figura 4.38: Valores de θ , ω e S referentes ao quarto patamar no dia 16 de janeiro de 2019.

Um novo caso ocorreu entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2019. No dia 18 houve uma chuva de 11,2 mm e, mais uma vez, o intervalo entre as chuvas foi inferior a 24 horas. O destaque será dado ao dia 19 de fevereiro, dia em que ocorreu um maior volume de chuva.

O gráfico da Figura 4.39 mostra que entre às 23:30h e 23:45h foram registrados 14,2 mm de chuva, que entre às 23:45h e 00:00h foram registrados 11,2 mm de chuva, e que isso gerou um acumulado de 25,4 mm. Todos esses valores ultrapassam os limites determinados pela Defesa Civil de Petrópolis (2013-2014).

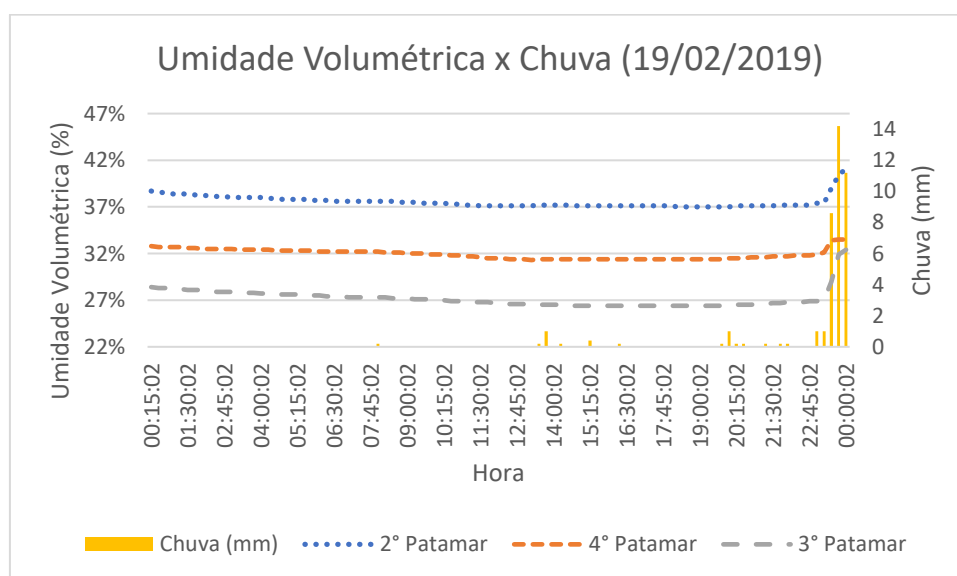


Figura 4.39: Leituras das sondas TDR no dia 19 de fevereiro de 2019.

A Figura 4.40 mostra a variação da sucção no segundo patamar ao longo do dia. Mesmo com a pequena chuva ocorrida em determinados momentos, a sucção crescia até atingir valores próximos a 15 kPa. A intensificação da chuva próximo às 23:00h fez com que essa sucção caísse, chegando ao valor de 6,1 kPa.

Já a Figura 4.41 mostra a variação dos valores de θ , ω e S no segundo patamar ao longo do dia. Já se pode afirmar um padrão, pelo observado nos dois casos em que se teve medidas para o segundo patamar: valores praticamente iguais de umidade volumétrica e umidade gravimétrica, por motivo já explicado.

Antes da intensificação das chuvas, a umidade volumétrica vinha caindo até atingir um valor mínimo de 37,0%. Conforme a chuva aumentou, a umidade volumétrica atingiu um pico de 41,1%. A umidade gravimétrica oscilou entre 36,9% e 41,0%, e o grau de saturação variou entre 59,6% e 66,2%.

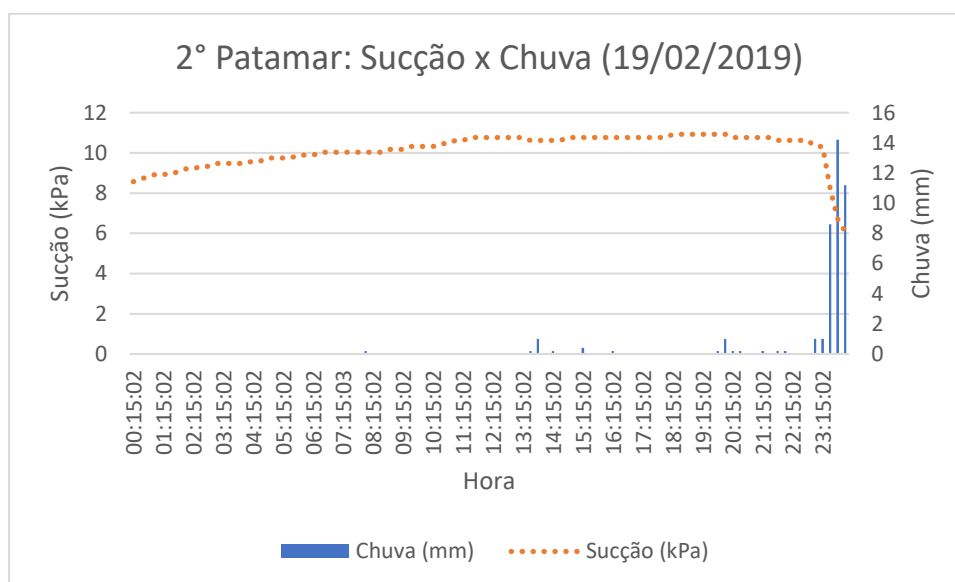


Figura 4.40: Valores de sucção referentes ao segundo patamar no dia 19 de fevereiro de 2019.

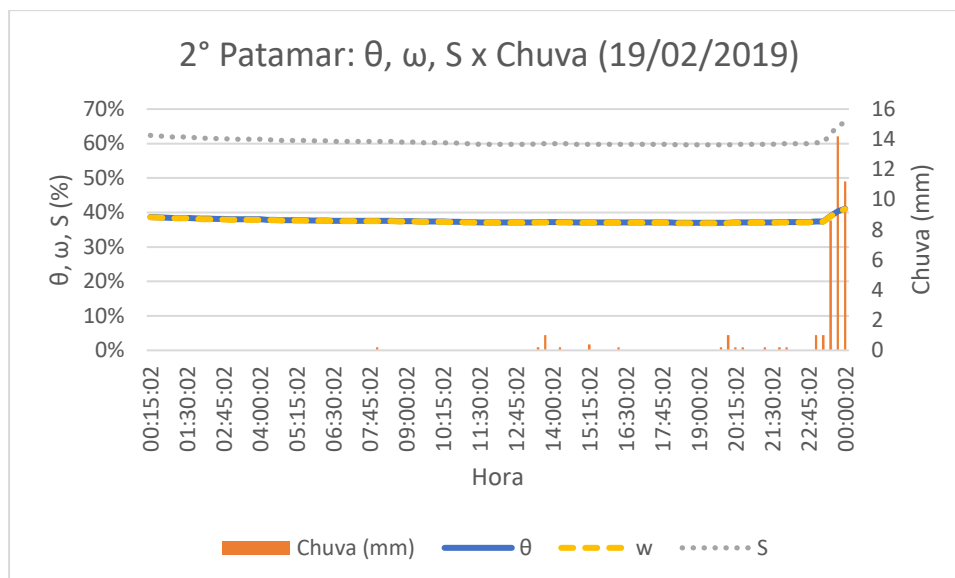


Figura 4.41: Valores de θ , ω e S referentes ao segundo patamar no dia 19 de fevereiro de 2019.

Em relação ao quarto patamar, a Figura 4.42 mostra a variação da sucção ao longo do dia. A sucção vinha crescendo, chegando a um pico de 291,5 kPa. A leve chuva ocorrida entre às 13:30h e às 13:45h estabilizou um valor um pouco inferior, e apenas à noite a sucção caiu levemente com mais uma ocorrência de chuva fraca. A intensificação dela reduziu a sucção a 122,7 kPa.

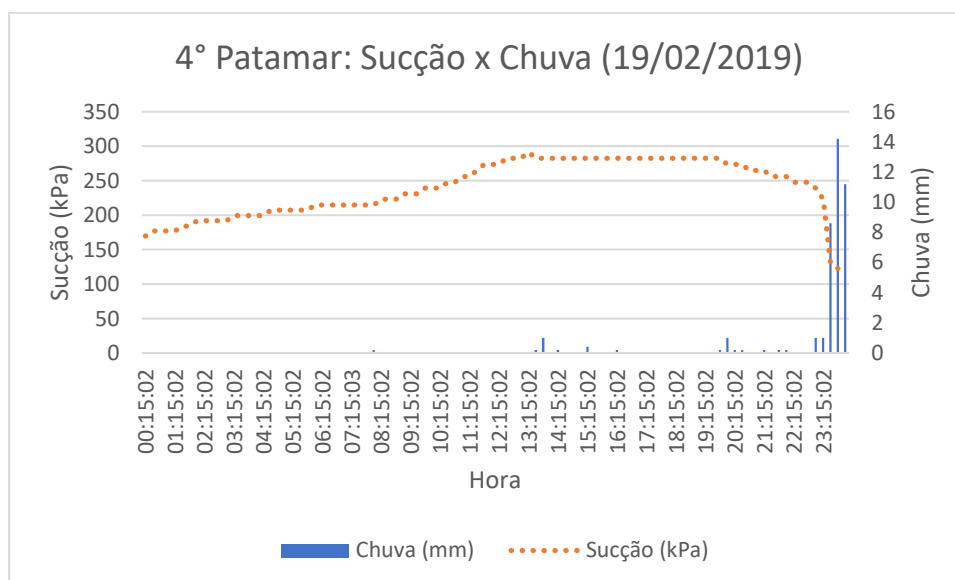


Figura 4.42: Valores de sucção referentes ao quarto patamar no dia 19 de fevereiro de 2019.

A Figura 4.43, por sua vez, mostra a variação dos valores de θ , ω e S no quarto patamar. Comparando-se os dois patamares, o quarto patamar demonstra sofrer oscilações menos bruscas. Os picos causados pela chuva acontecem, mas são pequenos. Antes da intensificação das chuvas, a umidade volumétrica vinha caindo até atingir um valor mínimo de 31,3%. Conforme a chuva aumentou, a umidade volumétrica atingiu um pico de 33,5%. A umidade gravimétrica oscilou entre 21,3% e 22,8%, e o grau de saturação variou entre 72,5% e 77,6%.

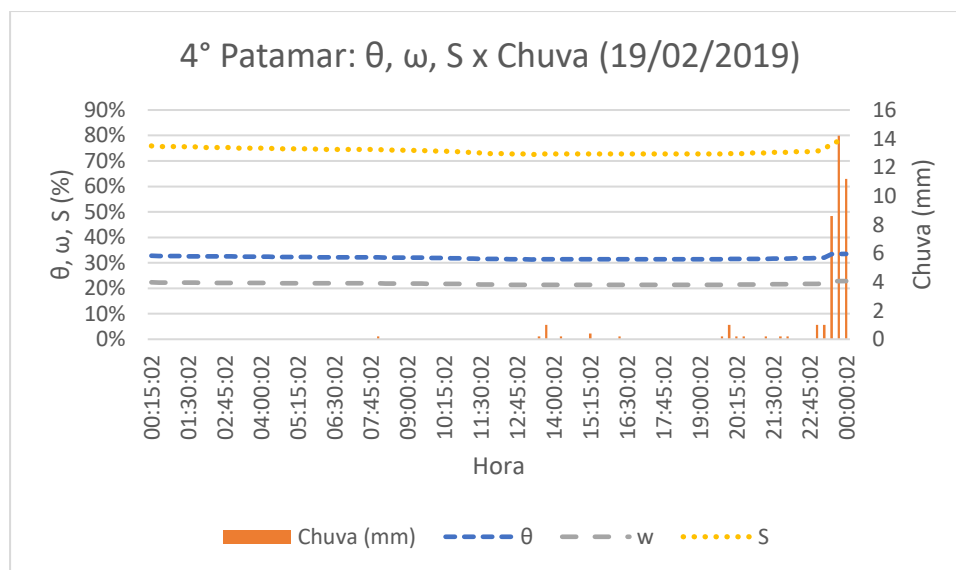


Figura 4.43: Valores de θ , ω e S referentes ao quarto patamar no dia 19 de fevereiro de 2019.

A Defesa Civil de Petrópolis (2019) divulgou um boletim referente ao dia 19 de fevereiro de 2019 informando que foram registradas três ocorrências, todas deslizamentos de terra, em diferentes bairros, sem feridos ou desalojados. Segundo a Defesa Civil de Petrópolis (2019), não houve necessidade do acionamento de nenhuma das 20 sirenes instaladas na cidade.

Outro caso a ser estudado ocorreu entre os dias 25 e 26 de fevereiro de 2019. O dia 25 de fevereiro teve um total de 15,5 mm de chuva e, em menos de 24 horas, ocorreram chuvas que ultrapassaram os limites de segurança estabelecidos pela Defesa Civil de Petrópolis (2013-2014). O destaque será dado ao dia 26 de fevereiro.

O gráfico da Figura 4.44 mostra que o momento mais crítico ocorreu entre às 13:45h e 14:30h. O primeiro intervalo de 15 minutos registrou 3,4 mm, o segundo intervalo registrou 11,6 mm e o terceiro intervalo registrou 3,8 mm. Tem-

se um intervalo de 15 minutos com chuva superior a 10 mm e dois intervalos de 30 minutos com chuva igual ou superior a 15 mm.

A Figura 4.45 mostra a variação da sucção no segundo patamar ao longo do dia. Os valores variavam próximos a 11 kPa até a ocorrência de uma leve chuva no início da manhã, que fez com que os valores caíssem para cerca de 9 kPa. Assim que a chuva terminou os valores de sucção voltaram a subir e atingiram 10 kPa, até que o início da chuva mais forte provocou nova queda de sucção, que chegou perto dos 7,5 kPa. Com o fim da chuva os valores de sucção voltaram a subir novamente.

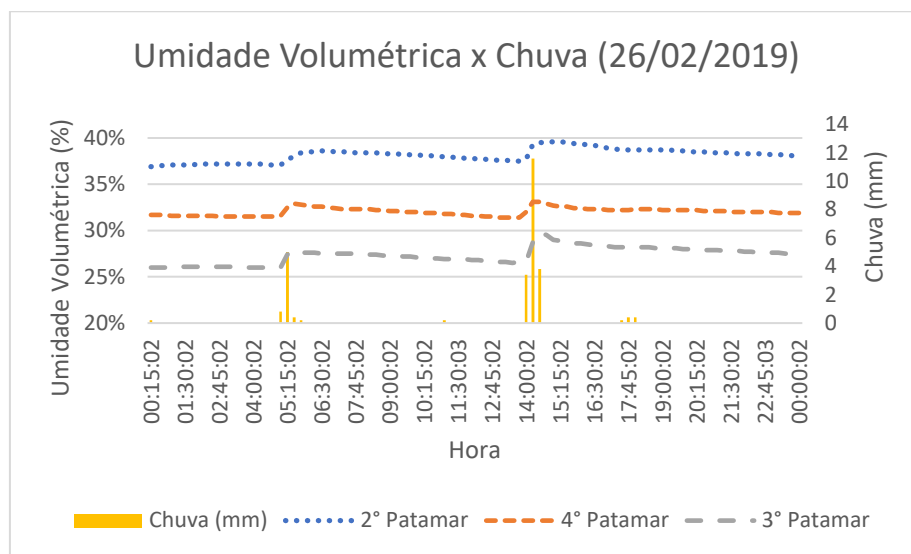


Figura 4.44: Leituras das sondas TDR no dia 26 de fevereiro de 2019.

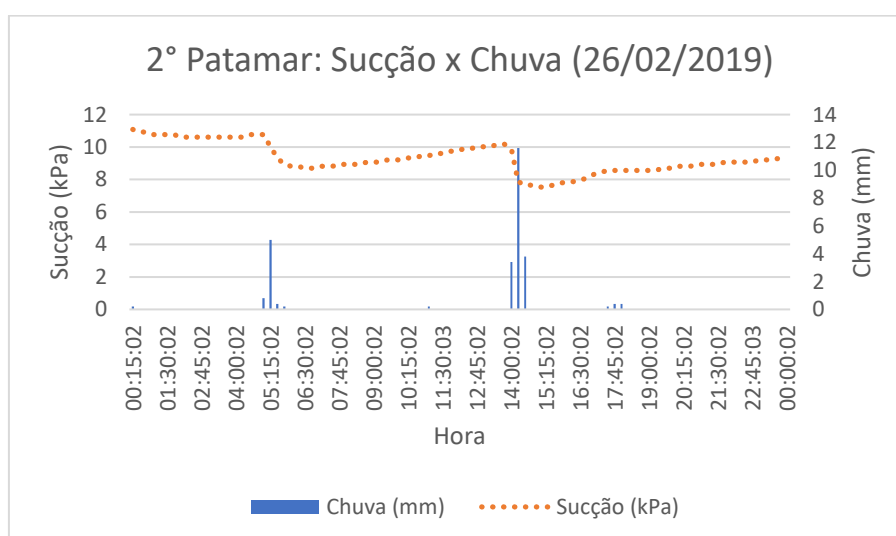


Figura 4.45: Valores de sucção referentes ao segundo patamar no dia 26 de fevereiro de 2019.

Já a Figura 4.46 mostra a variação dos valores de θ , ω e S no segundo patamar. Nas chuvas ocorridas no início da manhã e da tarde, os picos foram bem pequenos e as oscilações foram quase inexistentes. A umidade volumétrica teve um valor mínimo de 36,9% e um valor máximo de 39,6%; a umidade gravimétrica oscilou entre 36,8% e 39,5%; o grau de saturação variou entre 59,5% e 63,8%.

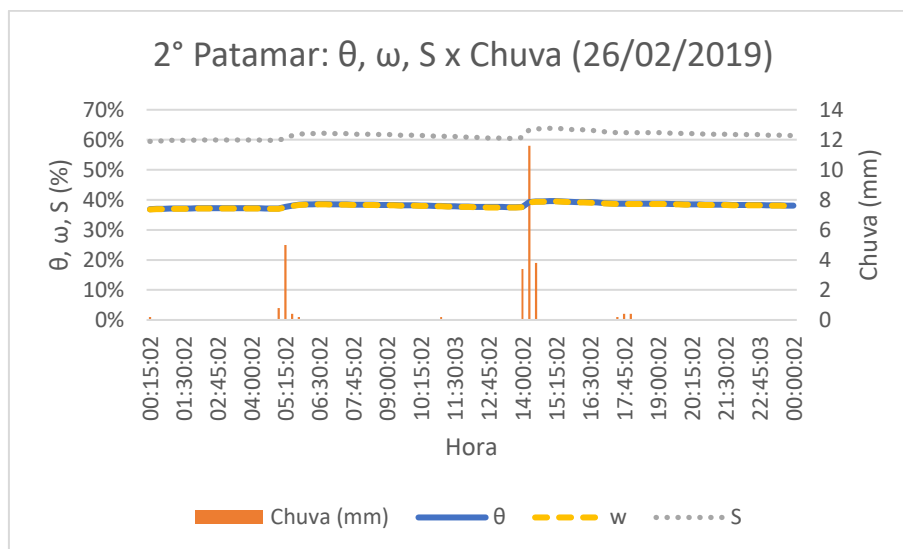


Figura 4.46: Valores de θ , ω e S referentes ao segundo patamar no dia 26 de fevereiro de 2019.

Quanto ao quarto patamar, a Figura 4.47 mostra a variação da sucção ao longo do dia. As chuvas ocorridas ao longo do dia 25 de fevereiro fizeram as sucções variarem entre 150 kPa e quase 300 kPa.

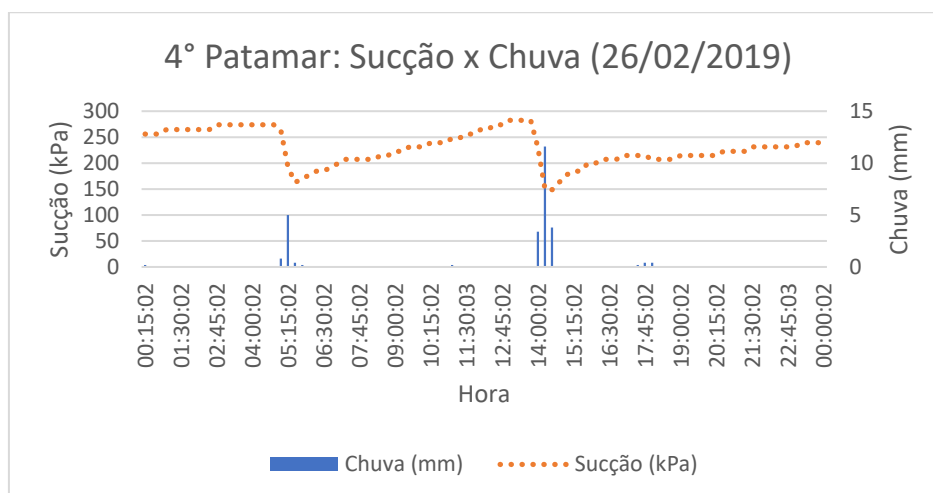


Figura 4.47: Valores de sucção referentes ao quarto patamar no dia 26 de fevereiro de 2019.

A Figura 4.48 mostra a variação dos valores de θ , ω e S no quarto patamar durante o dia. Aqui as oscilações são ainda menores, em comparação com as ocorridas no segundo patamar, e os picos causados pelas chuvas não são muito elevados. A umidade volumétrica teve um valor mínimo de 31,4% e um valor máximo de 33,1%; a umidade gravimétrica oscilou entre 21,4% e 22,6%; o grau de saturação variou entre 72,7% e 76,6%.

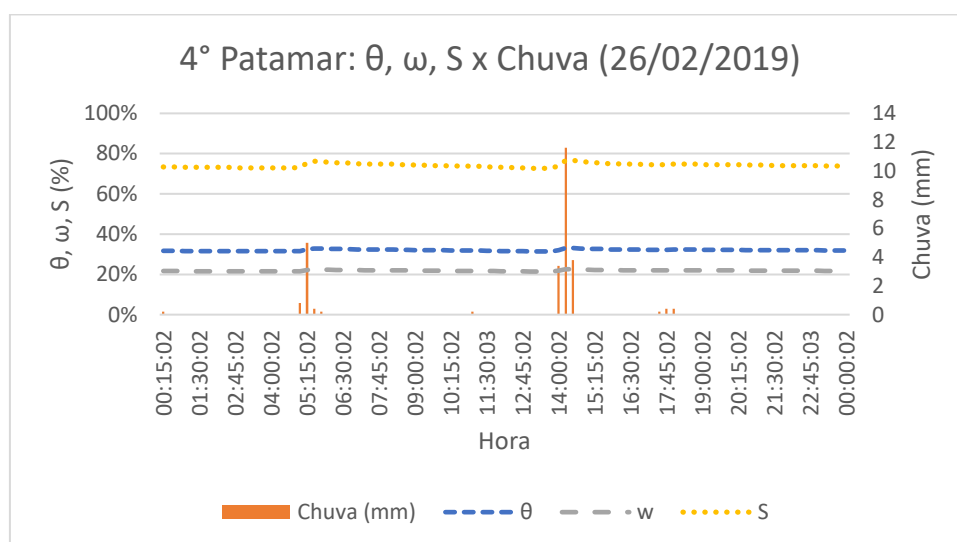


Figura 4.48: Valores de umidade θ , ω e S referentes ao quarto patamar no dia 26 de fevereiro de 2019.

A Defesa Civil de Petrópolis (2019) divulgou um boletim referente ao dia 19 de fevereiro de 2019 informando que apenas uma ocorrência foi registrada, por conta da abertura de um buraco em uma via provocada pelas chuvas ocorridas entre os dias 25 e 26 de fevereiro.

Por fim, o último caso a ser estudado ocorreu entre os dias 01 e 02 de março de 2019. Esse caso já foi citado anteriormente no item 4.7.3. No início do dia 01 de março ocorreu uma pequena chuva de 1,6 mm e, entre os dias 01 e 02 de março, ela se intensificou. A Tabela 4.25 mostra o volume de chuva do momento mais crítico, entre às 23:45h do dia 01 e 00:45h do dia 02. Nota-se que alguns dos acumulados de 15 minutos e todos os acumulados de 30 minutos dentro desse intervalo ultrapassam os limites de segurança da Defesa Civil de Petrópolis (2013-2014). Por muito pouco esse caso não foi incluído no item 4.7.4.1, pois choveu 47,4 mm em apenas uma hora (o item em questão determina 50 mm em 1 hora). O caso também não pode ser colocado no item 4.7.4.2, pois os acumulados de 48

horas são muito inferiores a 55 mm. A Figura 4.49 mostra o comportamento das três sondas TDR no momento da chuva e reforça os valores indicados na Tabela 4.25

Tabela 4.25: Momento mais crítico da chuva ocorrida entre os dias 01 e 02 de março de 2019.

Hora (h)	23:45	00:00	00:15	00:30	00:45
Chuva (mm)	8,8	10,4	16,6	11,6	5,8

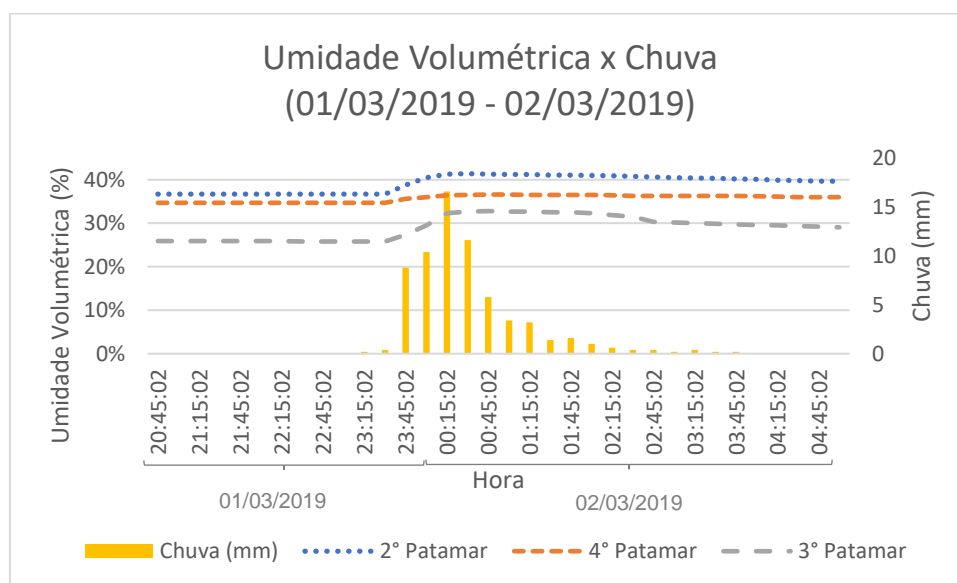


Figura 4.49: Leituras das sondas TDR entre os dias 01 e 02 de março de 2019.

A Figura 4.50 mostra a variação da sucção no segundo patamar. Os valores variavam próximos a 12 kPa até o início da chuva, que provoca uma queda e faz com que seus valores cheguem a 6 kPa. Com o fim da chuva, os valores de sucção voltam a subir.

A Figura 4.51 mostra a variação dos valores de θ , ω e S no segundo patamar. A chuva provoca um pequeno pico, e os valores demoram um pouco a voltar ao normal, possivelmente porque o período intenso da chuva durou cerca de 1 hora. A umidade volumétrica teve um valor mínimo de 36,7% e um valor máximo de 41,4%; a umidade gravimétrica oscilou entre 36,6% e 41,3%; o grau de saturação variou entre 59,2% e 66,7%.

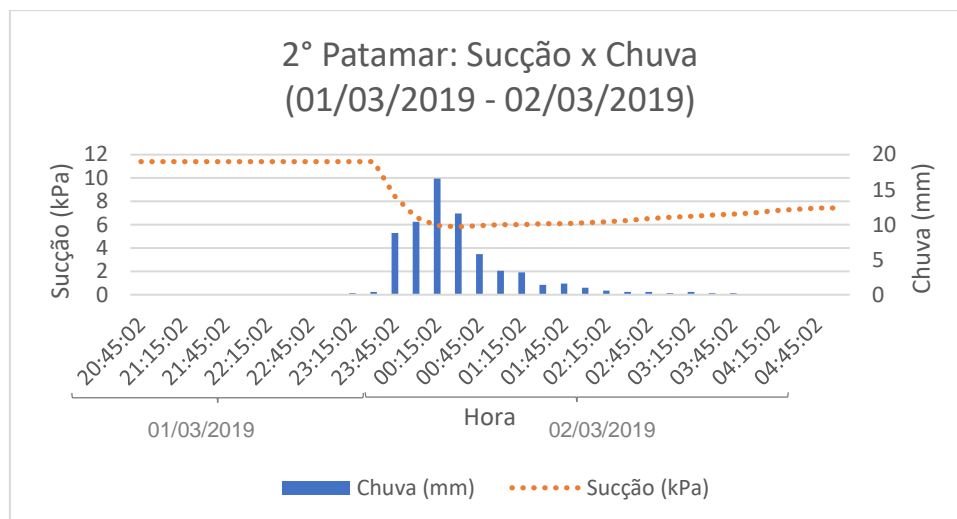


Figura 4.50: Valores de sucção referentes ao segundo patamar entre os dias 01 e 02 de março de 2019.

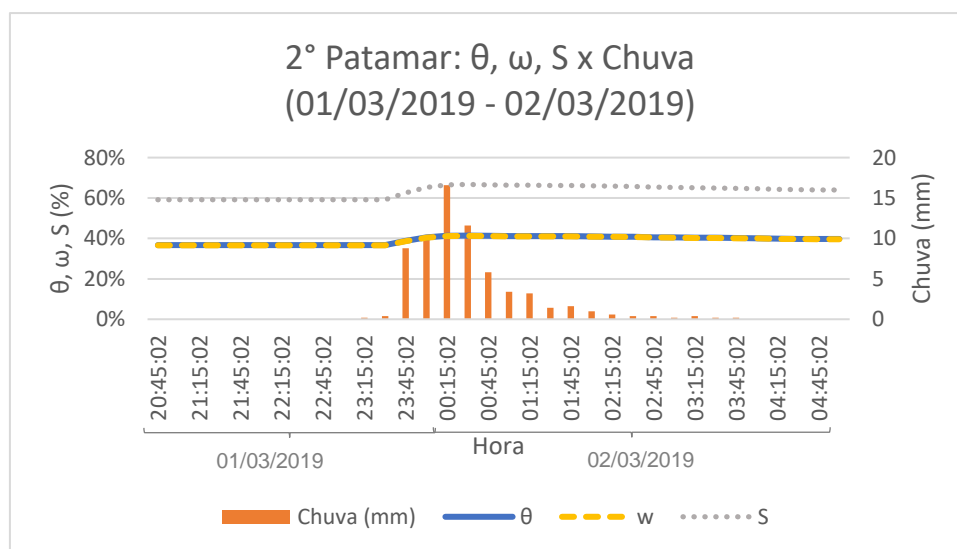


Figura 4.51: Valores de θ , w e S referentes ao segundo patamar entre os dias 01 e 02 de março de 2019.

Em relação ao quarto patamar, a Figura 4.52 mostra a variação da sucção. Antes da chuva, a sucção mantinha-se estável com valores próximos a 60 kPa. Nesse dia, a chuva mais intensa foi capaz de quase zerar a sucção, fazendo com que ela chegasse no seu menor valor ao longo do período de medição (0,2 kPa). Passado o período mais intenso, a sucção manteve-se baixa, e só voltou a subir um pouco após o cessar da chuva.

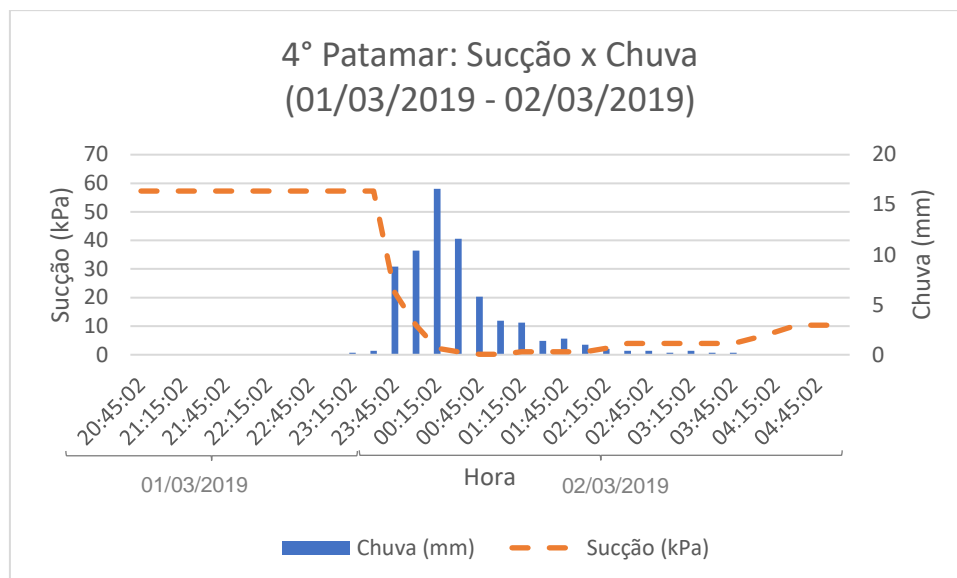


Figura 4.52: Valores de sucção referentes ao quarto patamar entre os dias 01 e 02 de março de 2019.

A Figura 4.53 mostra a variação dos valores de θ , ω e S no quarto patamar. Mais uma vez se observam oscilações e picos menores em comparação com as ocorridas no segundo patamar. A umidade volumétrica teve um valor mínimo de 34,7% e um valor máximo de 36,6%; a umidade gravimétrica oscilou entre 23,7% e 24,9%; o grau de saturação variou entre 80,3% e 84,7%.

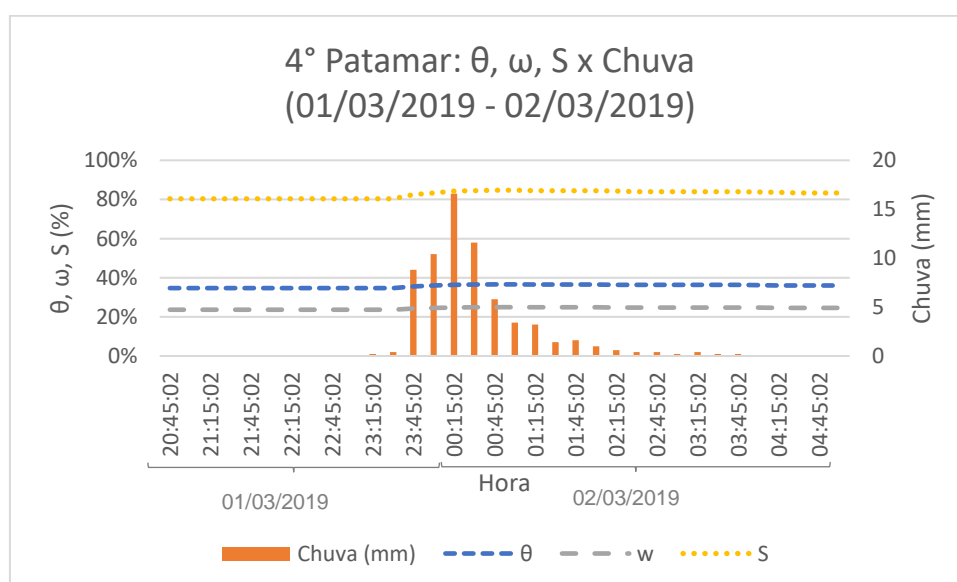


Figura 4.53: Valores de θ , ω e S referentes ao quarto patamar entre os dias 01 e 02 de março de 2019.

A Defesa Civil de Petrópolis (2019) divulgou um boletim referente à madrugada do dia 02 de março de 2019 informando que foram registradas cinco ocorrências, sem feridos. As sirenes de uma região de risco foram acionadas, mas ninguém compareceu ao ponto local de apoio.

4.7.5. Problemas encontrados

O primeiro problema foi o não funcionamento do TDR 4, instalado no terceiro patamar a 90 cm de profundidade. Não se sabe se tal sensor possui algum tipo de defeito ou se houve alguma falha na sua programação.

Em relação às outras três sondas, a única falha foi observada no dia 03 de janeiro de 2019. A Figura 4.29 mostrou que o segundo patamar não apresentou nenhum tipo de alteração, mantendo umidade volumétrica de 30,5% mesmo com a ocorrência de chuvas intensas. Não se sabe o motivo do problema, já que as outras duas sondas TDR registraram oscilações normalmente. Além disso, o sensor com o suposto problema voltou a gerar valores coerentes de umidade volumétrica no dia seguinte.

5

Conclusões e sugestões

5.1. Conclusões

Os resultados e análises obtidos a partir dos dados gerados pela instrumentação instalada – composta pelos quatro sensores tipo TDR, tensiômetro, pluviômetro e estação meteorológica – mostraram a possibilidade real de seu uso no monitoramento de encostas com risco de escorregamento de solo. Apesar do curto período de medição e de alguns problemas com equipamentos – cerca de três meses de funcionamento total ou parcial da instrumentação instalada em campo – os dados obtidos mostraram coerência, com rápido tempo de resposta e baixo índice de erro.

A seguir são apresentadas as principais conclusões alcançadas através da análise dos capítulos anteriores:

- A participação do Eng.º Agrônomo e Pedólogo Dr. Maurício Rizzato Coelho foi de fundamental importância no entendimento do perfil em estudo e na análise dos resultados obtidos. O local da instalação da instrumentação havia sido consideravelmente modificado por conta do retaludamento feito anteriormente, e sem a análise meticulosa de um pedólogo experiente, muitas características importantes teriam sido perdidas. De um ponto de vista mais amplo, monitorar áreas de risco envolve instalar instrumentação em regiões alteradas pela ação humana, e a presença de um pedólogo ou de um engenheiro de engenharia se mostra valiosa, tanto para a escolha dos pontos e das profundidades mais adequadas para a instalação da instrumentação como, conseqüentemente, para a obtenção de dados mais exatos.
- A análise físico-química dos horizontes do solo do quarto patamar mostram a presença de solos mais intemperizados.
- Os ensaios de caracterização dos solos do segundo e do quarto patamares apresentaram grandes diferenças entre eles. A maior quantidade de argila no solo do quarto patamar pode ser considerada como uma das responsáveis pelas maiores sucções nele medidas.

- Os ensaios de caracterização realizados separadamente em cada horizonte presente no quarto patamar mostrou diferenças sutis que poderiam ter auxiliado na melhor escolha de profundidade de instalação das sondas tipo TDR e do tensiômetro.
- Os ensaios de papel filtro foram eficientes na obtenção das curvas características para os solos dos dois patamares em estudo. Dentre os três modelos de curva característica, o que se mostrou melhor ajustado aos pontos encontrados foi o modelo de Fredlund & Xing (1994), o que permitiu uma comparação direta entre as curvas geradas. No entanto, percebe-se que o modelo de van Genuchten (1980) também teria gerado bons resultados. Quanto ao quarto patamar, as diferenças de tamanho das amostras geraram curvas bastante diferentes: as amostras com 100 cm³ forneceram sucções bem inferiores em relação às amostras com 20 cm³. Uma justificativa para desigualdades tão altas é a discrepância de profundidade de coleta das amostras, pois o quarto patamar possui cinco perfis diferentes em apenas 90 cm, e qualquer diferença na profundidade de coleta corresponde à obtenção de amostras de diferentes perfis. Vale enfatizar que as amostras maiores conseguiram captar melhor as menores sucções, conseguindo encontrar sucções próximas a 1 kPa para umidades volumétricas acima dos 30%. Por ter melhor representatividade, a curva com maiores amostras foi escolhida para representar o quarto patamar. Vale destacar, porém, que existe a possibilidade de amostras maiores sofrerem problemas de equalização entre a sucção do solo e a do papel filtro, exigindo mais tempo de equalização na câmara úmida.
- Comparando-se as sucções obtidas diretamente pelo tensiômetro e as sucções obtidas pela sonda TDR instalada no segundo patamar, geradas pela correlação com a curva característica, os valores se mostraram semelhantes. Isso prova que é possível adquirir parâmetros de sucção com confiabilidade usando as sondas tipo TDR.
- As sondas TDR mostraram respostas bastante adequadas, apresentando nítidos aumentos de umidade volumétrica no instante em que se iniciava um período chuvoso. Consequentemente, as curvas características também se mostraram competentes na conversão das umidades volumétricas em sucção, apresentando quedas bruscas de sucção no início dos períodos chuvosos.
- Não foi possível estabelecer uma transmissão dos dados via internet com o modem instalado no datalogger. Possivelmente, a tecnologia de 2010 (ano

em que o modem foi adquirido, juntamente com a estação meteorológica e o pluviômetro) é muito diferente da atual, gerando incompatibilidades entre o modem e o chip.

5.2.

Sugestões para pesquisas futuras

- Escolher locais com tipos de solo diferentes e verificar a resposta da instrumentação;
- Realizar a caracterização do solo e a descrição do perfil, junto a um pedólogo experiente, antes da instalação da instrumentação, para que seja possível determinar os melhores locais e as profundidades mais adequadas para a instalação da instrumentação;
- Estimar as curvas de condutividade hidráulica não saturada;
- Obter mais dados de tensiometria, para melhor comparação com os dados de sondas tipo TDR;
- Fazer medições com o tensiômetro no período de seca e verificar a possibilidade de cavitação;
- Realizar mais ensaios de papel filtro e comparar amostras de diferentes tamanhos retiradas da mesma profundidade, para que seja possível um comparativo mais adequado;
- Elaborar um sistema de transmissão de dados coletados pela instrumentação via internet e montar uma base centralizadora de informações, capaz de analisar os dados em tempo real e de emitir sinais de alerta.

Referências bibliográficas

ASTM **D5298**: Standard Test method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. USA, 2016.

ASTM **D2487**: Standard on the Unified Classification System. USA, 2017.

ABNT **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

ABNT **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

BIANSOONGNERN, S.; PLUNGKANG, B.; SUSUK, S. Development of Low Cost Vibration Sensor Network for Early Warning System of Landslides, **Energy Procedia**, v. 89, p. 417-420, 2016.

BRANDT, P. F. S. Previsão de Umidade de Solos Através de Redes Neurais Sem Peso. Dissertação de M.Sc, **UFRJ**, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulics Properties of Porous Media, **Colorado State Univ. Hydrol**, Paper nº 3, 1964.

BRUNETTI, M. T.; MELILLO, M.; PERUCCACCI, S.; CIABATTA, L.; BROCCA, L. How Far Are We From the Use of Satellite Rainfall Products in Landslide Forecasting?, **Remote Sensing of Environment**, v. 210, p. 65 – 75, 2018.

CAMPBELL SCIENTIFIC. Produtos. CS650. Manual, 2011-2012. Disponível em: <https://www.campbellsci.com.br/cs650>. Acesso em: 14 nov. 2018.

CASANOVA, F. J. O. C. Comunicação Pessoal, 2019.

CEMADEN. Notícias. Cemaden inicia a instalação de equipamentos da RedeGeo para monitoramento e pesquisas aplicadas sobre deslizamentos, 2019. Disponível em: <https://www.cemaden.gov.br/cemaden-inicia-a-instalacao-de-equipamentos-da-redegeo-para-monitoramento-e-pesquisas-aplicadas-sobre-deslizamentos/>. Acesso em: 15 mai. 2019.

CHANDLER, R.; CRILLY, M.; SMITH, M. A Low-Cost Method of Assessing Clay Desiccation for Low-Rise Buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, v. 92, n. 2, p. 82–89, 1 maio 1992.

DE LUCA, D. L.; VERSACE, P. A General Formulation to Describe Empirical Rainfall Thresholds for Landslides, **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 16, p. 98-107, 2016.

DEFESA CIVIL DE PETRÓPOLIS. Notícias. Notícias por data. Boletins de ocorrência da defesa civil, 2019. Disponível em: <http://www.petropolis.rj.gov.br/pmp/index.php/imprensa/noticias/item/11833-boletim-secretaria-de-defesa-civil-e-a%C3%A7%C3%B5es-volunt%C3%A1rias.html>. Acesso em: 4 abr. 2019.

DEFESA CIVIL DE PETROPOLIS. Planos de Contingência. Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil PLACON 2013/2014 para Deslizamentos de Grande Impacto, Inundações Bruscas ou Processos Geológicos ou Hidrológicos Correlatos (2013-2014). Disponível em: http://www.petropolis.rj.gov.br/dfc/phocadownload/plano_de_contingencia/deslizamentos_inundacoes/plano_de_contingencia_2013.pdf. Acesso em: 27 mar. 2019.

DIENE, A. A. Desenvolvimento de Tensiômetros para Sucção Elevada Ensaaiados em Lisímetros de Laboratório. Dissertação de M. SC., **COPPE/UFRJ**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

DIENE, A. A.; MAHLER, C. F. Um Instrumento para Medida de Potencial Matricial nos Solos sem Ocorrência de Cavitação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1262–1270, Nov/Dec, 2007.

DNER-ME 93-94: Solos – determinação da densidade real. 1994.

DRM-RJ. Risco Geológico. Núcleo de Análise e Diagnóstico de Escorregamentos, 2013. Disponível em: <<http://www.drm.rj.gov.br/index.php/risco-geologico>>. Acesso em: 11 set. 2019.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1988.

EMBRAPA, **Manual de Análise de Solo**, Serviço Nacional de Levantamentos e Conservação de Solos, RJ, 1979.

EMBRAPA, **Manual de Métodos de Análise do Solo**, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212p., RJ, EMBRAPA/CNPS, 1997.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed., Centro Nacional de Pesquisa de Solos, p. 306, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

FRANSCISCO FILHO, L. L. Uso do Geoprocessamento como Apoio na Gestão do Município: Petrópolis, um Estudo de Caso. Dissertação de M.Sc., **UFRJ**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.

FREDLUND, D. G. Comparison of Soil Suction and One-Dimensional Consolidation Characteristics of a Highly Plastic Clay, **Nat. Res. Council Tech. Report No. 245**. v, Div. of Building Res., Ottawa, Ont., Canada, 26 pp., July 1964.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p. 517-539, 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-Water Characteristic Curve. **Can Geotech**, J 31, p. 533-546, 1994.

GEO RIO. Prefeitura do Rio. Geo Rio. Secretaria Municipal de Infraestrutura e Habitação – SMIH, 2019. Disponível em: <<http://prefeitura.rio/web/infraestrutura-habitacao/geo-rio>>. Acesso em 11 set. 2019.

GREGÓRIO, L. T. Comunicação Pessoal, 2019.

INTRIERI, E.; GIGLI, G.; MUGNAI, F.; FANTI, R.; CASAGLI, N. Design and Implementation of a Landslide Early Warning System, **Engineering Geology**, p. 124-136, 2012.

IPT. Centros Tecnológicos. Solução IPT. Carta Geotécnica, 2019. Disponível em: <https://www.ipt.br/solucoes/406-carta_geotecnica.htm>. Acesso em 11. Set. 2019.

KEHRIG, A. G. As relações K_i e K_r no solo. **MA-CNEPA – Boletim do Instituto de Química Agrícola**, v.13, Rio de Janeiro, 1949.

KÖPPEN, W. Climatologia: com um Estudio de los Climats de la Tierra. México, Fondo de Cultura Economica, p. 478, 1948.

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated Soil Mechanics**. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2004.

MAHLER, C. F.; PACHECO, A. C. C. DOS S.; GONÇALVES, H. Desenvolvimento de um Tensiômetro para Medições de Sucções Elevadas. **5º Simpósio Brasileiro**

de Solos Não Saturados, v. 1, n. Suprema Gráfica e Editora Ltda - São Carlos/SP, p. 69–72, 2004.

MAHLER, C. F.; SOUZA, H. G. Tensiômetro para Medições de Sucções Elevadas. **COPPE/UFRJ**. BR n. PI 0403670-0, 01 Set. 2004.

MAHLER, C. F.; THOMAZ, I. P. L.; CALOBA, L. P.; NACINOVIC, M. G. G. Modeling Unsaturated Soils with Artificial Neural Network. **The 7th International Conference on Unsaturated Soils**, Hong Kong, 2018.

MELILLO, M.; BRUNETTI, M. T.; PERUCCACCI, S.; GARIANO, S. L.; ROCCATI, A.; GUZZETTI, F. A Tool for the Automatic Calculation of Rainfall Thresholds for Landslide Occurrence, v. 105, p. 230 – 243, 2018.

MOLINA, E. A.; CARDOSO, A. O.; NOGUEIRA, F. R. Relação Precipitação – Deslizamento no Município de São Bernardo do Campo – SP, **Ciência e Natura**, v. 37, p. 46 – 54, 2015.

NACINOVIC, M. G. G. Estudo de Erosão pela Análise de Sucção e Escoamento Superficial na Bacia do Córrego Sujo (Teresópolis, RJ). Dissertação de M.Sc., **UFRJ**, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

NACINOVIC, M. G. G. Avaliação de Erosão Hídrica Superficial em Parcelas Experimentais. Tese de D.Sc., **UFRJ**, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

NAIDU, S.; SAJINKUMAR, K. S.; OOMMEN, T.; ANUJA, V. J.; SAMUEL, R. A.; MURALEEDHARAN, C. Early Warning System for Shallow Landslides Using Rainfall Threshold and Slope Stability Analysis, **Geoscience Frontiers**, v. 9, p. 1871 – 1882, 2018.

NIMER, E. Climatologia da Região Sudeste do Brasil - Introdução à Climatologia Dinâmica. **R. Bras. Geog.**, Rio de Janeiro, p. 3-48, mar. 1972.

RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D. P. Pedologia e fertilidade do solo: interações e interpretações. **UFLA/FAEP**, Brasília, 1988.

RIDLEY, A. M.; BURLAND, J. B. A New Instrument for the Measurement of Soil Moisture Suction. **Géotechnique**, v. 43, n. 2, p. 321–324, 1993.

ROMANEL, C. Apostila da disciplina Mecânica dos Solos CIV2530, **PUC-Rio**, Rio de Janeiro, 2018.

SEKI, K. (2007) SWRC fit - A Nonlinear Fitting Program with a Water Retention Curve for Soils Having Unimodal and Bimodal Pore Structure. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 4: 407-437. Disponível em: <[doi:10.5194/hessd-4-407-2007](https://doi.org/10.5194/hessd-4-407-2007)>

SILVA, G. F. Influência da Pluviometria em Movimentos de Massa nas Encostas da Rodovia BR-116/RJ (Rodovia Rio – Teresópolis), Dissertação de M.Sc, **UFRJ**, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

SOILMOISTURE EQUIPAMENT CORP. Resources. Catalogs & Brochures, 2000. Disponível em: <<https://www.soilmoisture.com/resources/catalogs-and-brochures/>>. Acesso em: 9 mar. 2019.

TATIZANA, C. *et al.* Análise de Correlação entre Chuvas e Escorregamentos – Serra do Mar, Município de Cubatão, In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, 5, São Paulo. Anais, São Paulo: ABGE, v. 2, p. 225 – 236, 1987

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. **Water Resources Research**, v. 16, n° 3:574-582, 1980.

TRINTINALHA, M. A. *et al.* Efeito da Instalação e da Variabilidade entre Sondas no Uso da Técnica de TDR em um Nitossolo Vermelho Distroférrico. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 23, p. 1165–1171, 2001.

UCHIMURA, T.; TOWHATA, I.; WANG, L.; NISHIE, S.; YAMAGUCHI, H.; SEKO, I.; QIAO, J. Precaution and Early Warning of Surface Failure of Slopes Using Tilt Sensors, **Soils and Foundations**, v. 55 (5), p. 1086 – 1099, 2015.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, **Soil Science Society of American Journal**, v.44, pp. 892-898, 1980.

VAN RAIJ, B. Determinação do Ponto de Carga Zero em Solos, **Bragantia – Revista Científica do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo**, v.32, nº18, pp. 337-347, dez. 1973.

VENKATRAMAIAH, C. **Geotechnical Engineering**. New Age International Publishers, 4th edition, p. 926, 2012.

VILAR, O. M. Comunicação Pessoal, 2018.

VILLAR, L. F. S. Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese de D.Sc., **Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 2002.

Anexo 1 – Análises físico-químicas dos horizontes do quarto patamar

As análises físico-químicas dos horizontes identificados no quarto patamar foram realizadas de acordo com a metodologia da EMBRAPA/SNLCS. Segue abaixo a descrição das metodologias utilizadas para a obtenção dos valores mostrados na Tabela 4.2.

- **pH:** Medição realizada eletronicamente por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo:líquido (H₂O e KCl 1N) na proporção 1:2,5 (EMBRAPA, 1979);
- **Carbono orgânico:** Utilizou-se amostra seca ao ar e passada na peneira # 80. Determinado por oxidação com Dicromato de Potássio em meio sulfúrico a quente, usando Sulfato de Prata como catalisador. O excesso de dicromato, após a oxidação, foi dosado por titulação com solução padrão de Sulfato Ferroso Amoniacal, utilizando difenilamina como indicador. O teor de matéria orgânica foi calculado multiplicando-se o resultado do carbono orgânico por 1,724 (EMBRAPA, 1997);
- **Complexo sortivo e saturação de bases:** Os cátions adsorvidos são removidos por soluções de cloreto de potássio, acetato de cálcio e ácido clorídrico e, posteriormente determinados por métodos volumétricos (Ca, Mg e acidez), por espectrometria de absorção atômica (Al) e por fotometria de chama (Na e K) (EMBRAPA, 1997).

O grau de intemperismo do solo foi analisado pelo valor de K_i e K_r .

$$K_i = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (A.1)$$

$$K_r = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (A.2)$$

Foi utilizada a metodologia com ataque sulfúrico da EMBRAPA (1979), com modificações, para obter K_i e K_r :

- **Perda ao fogo (ΔP):** Obtida pela diferença de peso do solo ao ser calcinado à 550°C em relação ao solo seco à 105°C;

- **Ataque sulfúrico:** A amostra calcinada foi tratada com ácido sulfúrico (H_2SO_4 1:1) e, no extrato obtido, foi analisado o teor de ferro (Fe_2O_3) e alumínio (Al_2O_3). O resíduo foi tratado com hidróxido de sódio (NaOH 0,5 N) e no extrato obtido foi analisada a percentagem de sílica (SiO_2);
- **Resíduo:** O resíduo final foi calcinado a 1.000°C , calculando-se então a percentagem de material primário não atacado pelo tratamento (%Res.);
- **Determinação de Fe_2O_3 (%):** Obtido por complexometria pelo EDTA, utilizando o ácido salicílico como indicador;
- **Determinação de Al_2O_3 (%):** Obtido por complexometria pelo EDTA, após separação do ferro e titulando com ZnSO_4 (utilizando o xilenol orange como indicador);
- **Determinação de SiO_2 (%):** Obtido por colorimetria com molibdato de amônio, desenvolvendo o composto amarelo que absorve no comprimento de onda de 410 nm. O aparelho usado foi o Espectrofotômetro Hach DR/2000.