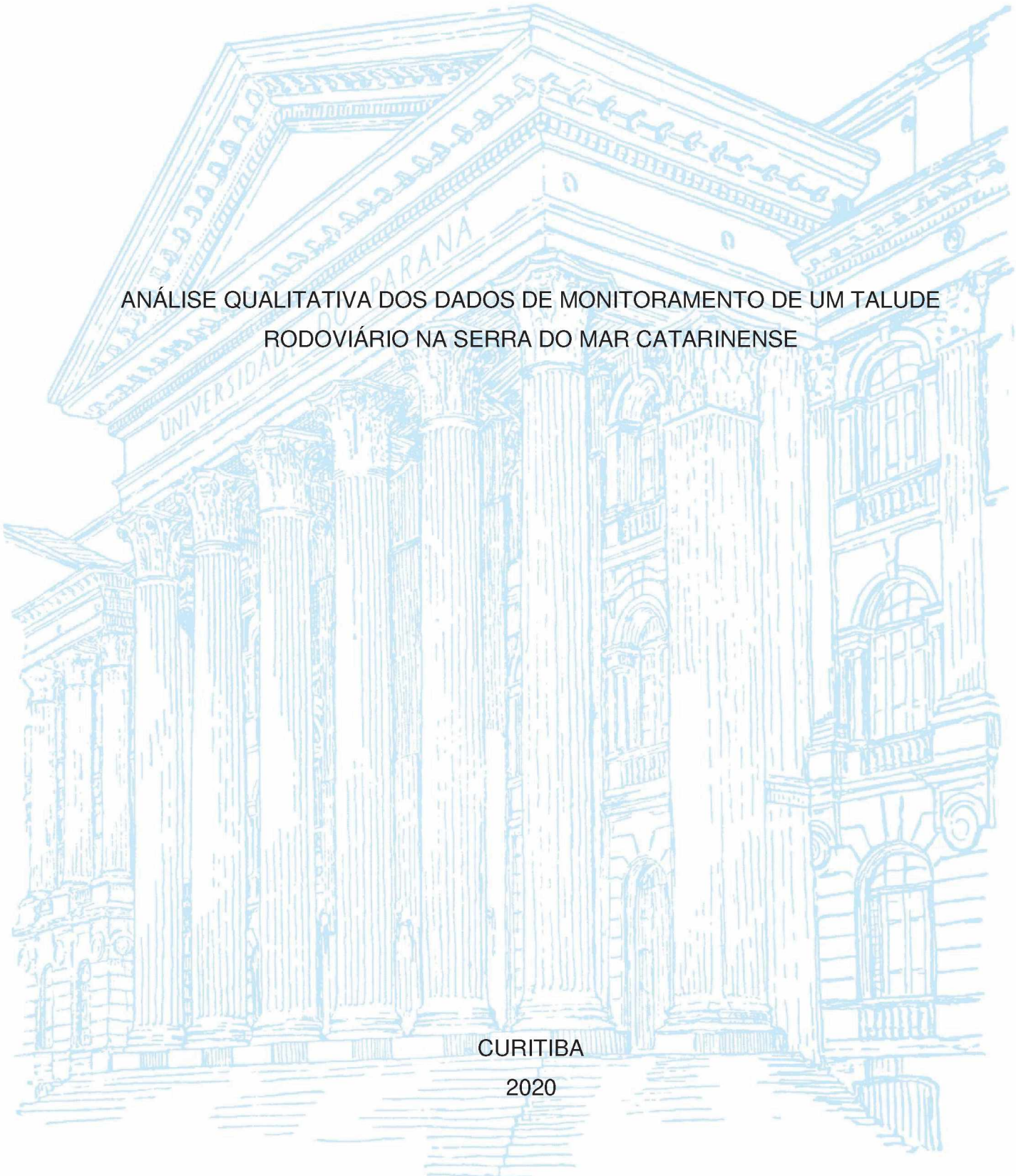
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GIANCARLO DOMINGUES



ANÁLISE QUALITATIVA DOS DADOS DE MONITORAMENTO DE UM TALUDE RODOVIÁRIO NA SERRA DO MAR CATARINENSE

CURITIBA

2020

GIANCARLO DOMINGUES

ANÁLISE QUALITATIVA DOS DADOS DE MONITORAMENTO DE UM TALUDE RODOVIÁRIO NA SERRA DO MAR CATARINENSE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Pereira Faro

CURITIBA

2020

Catalogação na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

D676a Domingues, Giancarlo
Análise qualitativa dos dados de monitoramento de um talude rodoviário na serra do mar catarinense [recurso eletrônico] Giancarlo Domingues. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2020.

Orientador: Vitor Pereira Faro.

1. Taludes (Mecânica do solo). 2. Tensiômetros. 3. Solo - Erosão. I. Universidade Federal do Paraná. II. Faro, Vitor Pereira. III. Título.

CDD: 624.151363

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **GIANCARLO DOMINGUES** intitulada: **ANÁLISE QUALITATIVA DOS DADOS DE MONITORAMENTO DE UM TALUDE RODOVIÁRIO NA SERRA DO MAR CATARINENSE** sob orientação do Prof. Dr. VITOR PEREIRA FARO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Novembro de 2020.

VITOR PEREIRA FARO
Presidente da Banca Examinadora

SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

CAROLINE TOMAZONI SANTOS
Avaliador Externo (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA)

ANDRÉS MIGUEL GONZÁLEZ ACEVEDO
Avaliador Interno Pós-Doc (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao professor Vitor Pereira Faro, pela confiança e orientação para realização deste trabalho, além dos demais professores e servidores da UFPR e dos colegas de mestrado.

Agradeço a Maccaferri do Brasil pela compreensão e apoio, em especial o Engenheiro Fabricio Zambotto.

Agradeço ao Dr. Andrés Miguel Gonzalez Acevedo, pelo apoio constante e compartilhamento de informações.

Finalmente, agradeço a minha esposa Marcia e meu filho Vicente por tolerarem minhas ausências e dividirem nosso tempo juntos com este projeto.

"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis."

(JOSÉ DE ALENCAR)

RESUMO

A estabilidade de encostas ou a ocorrência de movimentos de massa estão diretamente relacionados com a incidência de chuvas. Motivados pelas ocorrências de escorregamentos registrados em 2008 na rodovia BR-101, o grupo de Geotecnia da UFPR, junto com a Concessionária Autopista Litoral Sul, vem monitorando o Morro do Boi, encosta na Serra do Mar entre os municípios de Balneário Camboriú e Itapema, no estado de Santa Catarina. O monitoramento foi iniciado em 2012 e chegou em 2019 no seu sétimo ano. Este trabalho objetiva apresentar uma análise geral do desenvolvimento das poro pressões e deslocamentos com dados de cerca de 7 anos de monitoramento. O local é uma encosta rodoviária típica da Serra do Mar, com um leito rochoso e solos residuais cobertos por uma fina camada coluvionar, suscetível à movimentos de massa. O sistema de monitoramento contempla 8 tensiômetros do tipo *jet fill*, 6 piezômetros de corda vibrante, 2 inclinômetros e 1 pluviógrafo. Neste trabalho é feita uma análise qualitativa das séries históricas para o período entre maio de 2012 a fevereiro de 2019, onde avalia-se o desenvolvimento das poro pressões, analisando os comportamentos dos instrumentos, correlacionando suas leituras com a precipitação e com variações do nível d'água. Foi possível estimar a duração de um evento pluviométrico para o solo, como sendo aquele intervalo de tempo entre a ocorrência da chuva e a dissipação do excesso de poro pressão. Esses intervalos têm entre 3 e 26 dias de duração. Identificou-se 8 padrões de comportamento para as leituras de sucção, inclusive comportamentos não esperados. Identificou-se uma possível profundidade de superfície de ruptura a 5 m e deslocamentos totais de 10,33 mm com velocidades médias de 1,41 mm/ano. Através de uma análise determinística usando o método de equilíbrio limite, foi possível estimar os possíveis valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento na superfície de ruptura. As principais conclusões foram: Não é possível correlacionar as leituras de poro pressão e sucção diretamente com dados de precipitação; Há um atraso entre a ocorrência da precipitação e o registro de pico de poro pressão, bem como há um intervalo de tempo necessário para dissipação do acréscimo de poro pressão gerado; São identificados padrões de comportamento esperados para os desenvolvimentos da sucção, porém também são identificados padrões não esperados, o que levanta uma questão quanto a confiabilidade dos tensiômetros do tipo *jet fill;* A magnitude e velocidade dos deslocamentos são esperados e compatíveis com o tipo de estrutura de contenção existente.

Palavras-chave: Monitoramento, poro pressão, sucção, tensiômetros, inclinômetros, taludes

ABSTRACT

The stability of slopes or the occurrence of mass movements are directly related to the incidence of rainfall. Motivated by the occurrences of landslides recorded in 2008 on the BR-101 highway, the UFPR Geotechnics group, together with the Concessionaire Autopista Litoral Sul, has been monitoring Morro do Boi, a hillside in Serra do Mar between the municipalities of Balneário Camboriú and Itapema, in the state of Santa Catarina. Monitoring started in 2012 and arrived in 2019 in its seventh year. This work aims to present a general analysis of the development of pore pressures and displacements with data from about 7 years of monitoring. The site is a typical Serra do Mar road slope, with a bedrock and residual soils covered by a thin colluvial layer, susceptible to mass movements. The monitoring system includes 8 jet fill type tensiometers, 6 vibrating wire piezometers, 2 inclinometers and 1 rain gauge. In this work a qualitative analysis of the historical series is made for the period between May 2012 and February 2019, where the development of pore pressures is evaluated, analyzing the behaviors of the instruments, correlating their readings with precipitation and with variations in the water table. It was possible to estimate the duration of a rainfall event for the soil, as that time interval between the occurrence of rain and the dissipation of excess pore pressure. These intervals are between 3 and 26 days in duration. 8 behavior patterns were identified for the suction readings, including unexpected behaviors. A possible rupture surface depth at 5 m and total displacements of 10.33 mm were identified with average speeds of 1.41 mm / year. Through a deterministic analysis using the limit equilibrium method, it was possible to estimate the possible values of the shear strength parameters on the rupture surface. The main conclusions were: It is not possible to correlate the pore pressure and suction readings directly with precipitation data; There is a delay between the occurrence of precipitation and the recording of the peak pore pressure, as well as a time interval required to dissipate the increase in the pore pressure generated; Patterns of behavior expected for suction developments are identified, but unexpected patterns are also identified, which raises a question about the reliability of jet fill type tensiometers; The magnitude and speed of the displacements are expected and compatible with the type of existing retaining structure.

Keywords: Field monitoring. suction, pore water pressure, piezometers, tensiometers, inclinometers, slopes.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE MASSA NO BRASIL DE 1992 A 2012 22
FIGURA 2 - FASES DO SOLO NÃO SATURADO – MODELO RIGOROSO E SIMPLIFICADO 25
FIGURA 3 - INFLUÊNCIA DAS PARCELAS DE SUCÇÃO NAS DIFERENTES FAIXAS DE SUCÇÃO 27
FIGURA 4 – FORMATOS DE CURVAS DE RETENÇÃO 28
FIGURA 5 – EXEMPLO DE CRAS COM FORMATO TRIMODAL 29
FIGURA 6 - ELEMENTOS NA CURVA DE RETENÇÃO 29
FIGURA 7 - HISTERESE ENTRE AS CURVAS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM 30
FIGURA 8 - RELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E GRAU DE SATURAÇÃO 32
FIGURA 9 – CICLO HIDROLÓGICO 35
FIGURA 10 - ENVOLTÓRIA ESTENDIDA DE MOHR - COULOMB. 38
FIGURA 11 - EXEMPLOS DE ESCORREGAMENTOS PLANARES (A) TRANSLACIONAL (B) EM CUNHA (A) 39
FIGURA 12 - EXEMPLO DE ESCORREGAMENTO ROTACIONAL 40
FIGURA 13 - CLASSIFICAÇÃO APRESENTADA POR CRUDEN E VARNES (1996) 41
FIGURA 14 – SUPERFÍCIE DE RUPTURA PLANA E TRINCA DE TRAÇÃO DE RANKINE (1857) 42
FIGURA 15 - ENCOSTA TÍPICA DA SERRA DO MAR 43
FIGURA 16 - ESQUEMA DE UM TALUDE INFINITO 44
FIGURA 17 - PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE 46
FIGURA 18 - TENSIÔMETROS – (A) ESQUEMA, (B) EXEMPLOS 48
FIGURA 19 - MODELO DAS FENDAS PARA EXPLICAR A CAVITAÇÃO 48
FIGURA 20 - ERRO NA LEITURA DE UM TENSIÔMETRO DEVIDO À NÃO SATURAÇÃO DO FILTRO. 49
FIGURA 21 - ESQUEMA DE UM INCLINÔMETRO 51
FIGURA 22 - SEÇÃO DO TUBO GUIA 51
FIGURA 23 - ERROS EM UM INCLINÔMETRO 52

FIGURA 24 - PRINCIPAIS FORMAS DE GRÁFICOS DE LEITURAS DE INCLINÔMETROS 54
FIGURA 25 - LOCALIZAÇÃO DO MORRO DO BOI 60
FIGURA 26 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE 61
FIGURA 27 - SEÇÃO ESQUEMÁTICA DO KM 140+700 DA BR-101 62
FIGURA 28 - PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO 64
FIGURA 29 - SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS - SEV 65
FIGURA 30 - IMAGEAMENTO ELÉTRICO E INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA 65
FIGURA 31 - CURVA GRANULOMÉTRICA 68
FIGURA 32 - CURVA GRANULOMÉTRICA 68
FIGURA 35 - ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA 69
FIGURA 34 - PARÂMETROS DE AJUSTE POR VAN GENUTCHEN (1980) 70
FIGURA 35 - CRAS PARA O CP 19 70
FIGURA 38 - CURVA DE INFILTRAÇÃO – DADOS DO ENSAIO DE INFILTRAÇÃO 71
FIGURA 37 - CROQUI DE LOCALIZAÇÃO INSTRUMENTOS 73
FIGURA 38 - POSIÇÃO DOS PIEZÔMETROS DA ILHA 2 NO PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO 74
FIGURA 39 - POSIÇÃO DOS PIEZÔMETROS DA ILHA 1 NO PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO 75
FIGURA 40 - ESQUEMA PARA TRANSFORMAÇÃO DA LEITURAS DE NA E DE PORO PRESSÃO EM VALORES DE ELEVAÇÃO EM METROS OU POTENCIAIS TOTAIS. 78
FIGURA 41 - EVENTO 2 - PICO DE PP E TEMPO PARA ATINGIR O PICO DE PP 79
FIGURA 42 - EVENTO 2 - TENDÊNCIAS DE DISSIPAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE PP 80
FIGURA 43 - EVENTO 2 - TENDÊNCIAS DE DISSIPAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE PP 80
FIGURA 44 - PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA 82
FIGURA 45 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES PRÓXIMAS 83
FIGURA 46 - GRÁFICO DISPERSÃO COM ESTAÇÃO C-2927 - LARANJEIRAS 84
FIGURA 47 - GRÁFICO DISPERSÃO COM ESTAÇÃO C-2385 - TIJUCAS 84
FIGURA 48 - GRÁFICO DISPERSÃO COM ESTAÇÃO C-2033 – RIO CANOAS 84

FIGURA 49 - PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA COM DADOS PREENCHIDOS 85
FIGURA 50 - CHUVAS MENSAIS.....86
FIGURA 51 - DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS (SEM DADOS PREENCHIDOS) – DIAS CHUVOSOS POR ESTAÇÃO DO ANO (A) E POR ACUMULADO EM MM/DIA (B) 86
FIGURA 52 - DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS (COM DADOS PREENCHIDOS) – DIAS CHUVOSOS POR ESTAÇÃO DO ANO (A) E POR ACUMULADO EM MM/DIA (B) 87
FIGURA 53 - DISTRIBUIÇÃO SAZONAL POR INTERVALOS DE ACUMULADOS DIÁRIOS (DADOS PREENCHIDOS). 88
FIGURA 54 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PIEZÔMETROS ILHA 2 89
FIGURA 55 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PIEZÔMETROS ILHA 1 90
FIGURA 56 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E MEDIDAS DE NA EM TERMOS DE ELEVAÇÃO PARA A ILHA 2. 91
FIGURA 57 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E MEDIDAS DE NA EM TERMOS DE POTENCIAL TOTAL PARA A ILHA 2, NO PERÍODO ENTRE 20/02/2013 E 09/06/2013 92
FIGURA 58 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E MEDIDAS DE NA EM TERMOS DE ELEVAÇÃO PARA A ILHA 1 92
FIGURA 56 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E MEDIDAS DE NA EM TERMOS DE POTENCIAL TOTAL PARA A ILHA 1, NO PERÍODO ENTRE 27/04/2017 E 16/07/2017 93
FIGURA 60 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E PRECIPITAÇÃO NO EVENTO 1 NA ILHA 2 – PERÍODO DE 23/03/2013 A 28/05/2013 96
FIGURA 61 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E PRECIPITAÇÃO NO EVENTO 1 NA ILHA 1 – PERÍODO DE 23/03/2013 A 28/05/2013 97
FIGURA 62 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA EVENTO 3 NA ILHA 2.....97
FIGURA 63 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DO EVENTO 2 NA ILHA 1. 98
FIGURA 64 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DA ILHA 2 PARA OS EVENTOS 4 E 5 99

FIGURA 65 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PIEZÔMETROS DA ILHA 1 NOS EVENTOS 4 E 5 99
FIGURA 66 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS EVENTOS 7 E 7A NA ILHA 2. 100
FIGURA 67 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS EVENTOS 7 E 7A NA ILHA 1. 101
FIGURA 68 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS EVENTOS 8 E 8A NA ILHA 2. 102
FIGURA 69 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS EVENTOS 8 E 8A NA ILHA 1 102
FIGURA 70 - ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À INTENSIDADE MÉDIA DAS CHUVAS PARA A ILHA 2 106
FIGURA 71 - ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À INTENSIDADE MÉDIA DAS CHUVAS PARA A ILHA 1 106
FIGURA 72 - TAXA DE ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À INTENSIDADE MÉDIA DAS CHUVAS PARA A ILHA 2 107
FIGURA 73 - TAXA DE ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À INTENSIDADE MÉDIA DAS CHUVAS PARA A ILHA 1 107
FIGURA 74 - ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À UMIDADE NO DIA ANTERIOR NA ILHA 2 108
FIGURA 75 - ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À UMIDADE NO DIA ANTERIOR NA ILHA 1 109
FIGURA 76 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 3 111
FIGURA 77 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 2 111
FIGURA 78 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 1 112
FIGURA 79 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 3 DE 29/09/2014 A 22/02/2015 116
FIGURA 80 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 2 DE 15-08-2012 A 07-11-2012 117
FIGURA 81 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 3 DE 03/01/2013 A 16/03/2013 118

FIGURA 82 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 2 DE 03/10/2013 A 23/02/2014 119
FIGURA 83 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 1 DE 02/04/2018 A 02/09/2018 120
FIGURA 84 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 2 DE 03/08/2017 A 24/03/2018 121
FIGURA 85 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 1 DE 06/04/2018 A 29/08/2018 123
FIGURA 86 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 3 DE 03/08/2017 A 03/01/2018 124
FIGURA 87 - SÉRIE HISTÓRICA DAS LEITURAS DE NÍVEL D'ÁGUA 126
FIGURA 88 - PERFIL DE PORO PRESSÃO NA ILHA 2 127
FIGURA 89 - PERFIL DE PORO PRESSÃO NA ILHA 1 128
FIGURA 90 - PORO PRESSÃO EM TERMOS DE ELEVAÇÃO NA ILHA 2. 129
FIGURA 91 - MEDIDAS DE NA EM TERMOS DE POTENCIAL TOTAL. 129
FIGURA 92 - LEITURAS INCL-01. 131
FIGURA 93 - LEITURAS INCL-01 – EIXO A 132
FIGURA 94 - LEITURAS INCL-01 – EIXO B. 133
FIGURA 95 - LEITURAS INCL-02. 134
FIGURA 96 - LEITURAS INCL-02 – EIXO A. 135
FIGURA 97 - LEITURAS INCL-02 – EIXO B. 136
FIGURA 98 - LEITURAS INCL-01 PARA 1 M DE PROFUNDIDADE 137
FIGURA 99 - LEITURAS INCL-01 PARA 1 M DE PROFUNDIDADE COM CHUVAS MENSAIS 138
FIGURA 100 - LEITURAS INCL-01 PARA 1 M DE PROFUNDIDADE COM CHUVAS MENSAIS 138
FIGURA 101 - VARIAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA E DESLOCAMENTOS COM O TEMPO PARA COESÃO ZERO 140
FIGURA 102 - VARIAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA DESTACADOS NA TABELA TABELA 10 COM COESÃO ZERO. 141
FIGURA 103 - VARIAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA DESTACADOS NA TABELA TABELA 10 COM COESÃO DE 1 KPA. 142
FIGURA 104 - VARIAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA DESTACADOS NA TABELA TABELA 10 COM COESÃO DE 2 KPA. 142

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - EQUAÇÕES PARA AJUSTE DA CURVA DE RETENÇÃO 31
QUADRO 2 - EQUAÇÕES PARA AJUSTE DA CURVA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....34
QUADRO 3 - INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA 95% DAS PERMEABILIDADES 71
QUADRO 4 - RESUMO DA CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA 72
QUADRO 5 - PIEZÔMETROS DE CORDA VIBRANTE INSTALADOS 74
QUADRO 6 - DISTRIBUIÇÃO DOS TENSIÔMETROS.....75
QUADRO 7 - ELEVAÇÃO DOS INSTRUMENTOS.....77
QUADRO 8 - INTERVALO DOS EVENTOS ESCOLHIDOS PARA ANÁLISE QUALITATIVA 79
QUADRO 7 - PERÍODOS PARA CADA CORRELAÇÃO COM ESTAÇÕES VIZINHAS.....83
QUADRO 8 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE AS ESTAÇÕES VIZINHAS E O PLUVIÓGRAFO DO MORRO DO BOI. 85
QUADRO 9 - CLASSIFICAÇÃO CONFORME CIRAM (2016) 87
QUADRO 10 - VALORES MEDIDOS MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE PORO PRESSÃO POSITIVA 89
QUADRO 12 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE OS VALORES DE POTENCIAL TOTAL MEDIDO NOS PIEZÔMETROS E NAS LEITURAS DE NA.....91
QUADRO 13 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE OS VALORES DE POTENCIAL TOTAL MEDIDO NOS PIEZÔMETROS E NAS LEITURAS DE NA.....93
QUADRO 15 - RESUMO DOS TEMPOS PARA PICO E DISSIPAÇÃO DE PORO PRESSÃO. 103
QUADRO 16 - VALORES MEDIDOS MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE SUÇÃO 113
QUADRO 17 - LIMITES PRÁTICOS DOS TENSIÔMETROS.....113
QUADRO 18 - RESUMO DOS INTERVALOS ANALISADOS.....125
QUADRO 17 - LEITURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DOS INCLINÔMETROS 130
QUADRO 18 - VALORES ADOTADOS PARA O CÁLCULO DOS FATORES DE SEGURANÇA.....139

QUADRO 19 - VALORES ESTIMADOS PARA COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA.....143

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PROFUNDIDADES DAS AMOSTRAS 66
TABELA 2 - LIMITES DE ATTERBERG E DENSIDADE REAL DOS GRÃOS..... 66
TABELA 3 - DENSIDADES DOS GRÃOS..... 67
TABELA 4 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO 68
TABELA 5 - MELHORES CORRELAÇÕES OBTIDAS ENTRE AS LEITURAS DOS PIEZÔMETROS E A PRECIPITAÇÃO 94
TABELA 6 - EVENTOS ESCOLHIDOS PARA ANÁLISE QUALITATIVA 95
TABELA 7 - ACRÉSCIMOS DE PORO PRESSÃO, TEMPO PARA PICO DE PORO PRESSÃO E TEMPO ESTIMADO PARA DISSIPAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE PORRO-PRESSÃO PARA A ILHA 2..... 104
TABELA 8 - ACRÉSCIMOS DE PORO PRESSÃO, TEMPO PARA PICO DE PORO PRESSÃO E TEMPO ESTIMADO PARA DISSIPAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE PORRO-PRESSÃO PARA A ILHA 1..... 105
TABELA 9 - MELHORES CORRELAÇÕES OBTIDAS ENTRE AS LEITURAS DOS TENSIÔMETROS E A PRECIPITAÇÃO 114
TABELA 10 - MAIORES E MENORES VALORES DE FS OBTIDOS, VARIANDO c' E Ø' 141

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CE – Caminhamento Elétrico

CEPED – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres

CIRAM – Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina

CRAS – Curva de retenção de água no solo

CI – Cota ou Elevação do Instrumento

CP – Corpo de Prova

CT – Cota ou elevação do terreno

EM – Elevação medida

FS – Fator de segurança

INCL – Inclinômetro

INV – Inverno

LNA – Leitura do nível d'água

NA – Nível d'água

NBR – Norma Brasileira

OUT – Outono

PI – Profundidade do instrumento

PP – Poro pressão

PRI – Primavera

PZE – Piezômetro de Corda Vibrante

SEV – Sondagem Elétrica Vertical

SM – Sondagem Mista

TENS – Tensiômetro

UNESP – Universidade do Estado de São Paulo

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

VER – Verão

LISTA DE SÍMBOLOS

γ - Peso específico natural

γ_{sat} - Peso específico saturado

γ_s - Peso específico dos grãos

γ_d - Peso específico aparente seco

γ_{sub} - Peso específico submerso

γ_w - Peso específico da água

w - Teor de umidade

Ps - Peso dos sólidos

Pt - Peso total

Pw - Peso de água

Vs - Volume de sólidos

Vt - Volume total

V_w - Volume de água

θ_w - Teor de umidade volumétrico

e - Índice de vazios

n - Porosidade

S - Grau de saturação

D_r - Densidade relativa

IP - Índice de plasticidade

LL - Limite de liqueidez

LP - Limite de plasticidade

IC - Índice de consistência

Q - Vazão

k_{sat} - Coeficiente de permeabilidade saturada

i - Gradiente hidráulico, Inclinação

σ' - Tensão normal efetiva

σ - Tensão normal

v - Velocidade

v_s - Velocidade real

τ - Tensão cisalhante, Resistencia ao cisalhamento

C - Coesão ou intercepto coesivo

$\emptyset$, ϕ - Ângulo de atrito interno

c' - Coesão efetiva ou intercepto coesivo efetivo

$\emptyset'$, ϕ' - Ângulo de atrito interno efetivo

u - Poro pressão

F.S. - Fator de segurança

B - Inclinação

Hc - Profunidade crítica

Ψ - Sucção Total

u_a - Pressão do ar

u_w - Pressão da água

π - Sucção osmótica

ψ_m - Sucção mátrica

k - Condutividade hidráulica não saturada

θ_r - Teor de umidade volumétrico residual

θ_s - Teor de umidade volumétrico saturado

$\emptyset^b$, ϕ^b - Parâmetro que representa o incremento de resistência em função da sucção

ψ_b - Pressão na entrada de ar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 21
1.1 JUSTIFICATIVA 22
1.2 OBJETIVOS 24
1.2.1 Objetivo geral 24
1.2.2 Objetivos específicos 24
2 REVISÃO DE LITERATURA 25
2.1 SOLOS NÃO SATURADOS 25
2.1.1 Sucção 26
2.1.2 Curva de Retenção de Água nos Solos 27
2.1.3 Condutividade hidráulica dos solos não-saturados 31
2.1.4 Ciclo hidrológico 35
2.1.5 Resistência ao cisalhamento dos solos não-saturados 36
2.2 ESCORREGAMENTOS 38
2.2.1 Deflagradores dos movimentos de massa 41
2.2.2 Estabilidade de taludes 42
2.2.2.1 Talude Infinito 43
2.3 INSTRUMENTAÇÃO 45
2.3.1 Medidas de poro pressão positivas 45
2.3.2 Medidas de poro pressão negativas 47
2.3.3 Medidas de deslocamentos subsuperficiais 49
2.4 HISTÓRICO DAS PESQUISAS NO MORRO DO BOI 55
3 MATERIAIS E MÉTODOS 60
3.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL 60
3.1.1 Formação geológica 61
3.1.2 Perfil geológico-geotécnico 63
3.1.3 Caracterização geotécnica do solo coluvionar 65
3.1.4 Curvas de retenção de água no solo (CRAS) 69
3.1.5 Coeficiente de permeabilidade 70
3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO 72
3.3 METODOLOGIA 76
3.3.1 Precipitação 76
3.3.2 Poro pressão 77

3.3.2.1 Análise da relação da variação do nível d'água (NA) com as leituras de poro pressão 77
3.3.2.2 Correlação linear entre leituras de poro pressão e registros de precipitação 78
3.3.2.3 Análise qualitativa dos acréscimos de poro pressão. 78
3.3.3 Sucção 81
3.3.3.1 Análise qualitativa do desenvolvimento da sucção. 81
3.3.4 Deslocamentos 81
4 RESULTADOS 82
4.1 PRECIPITAÇÃO 82
4.2 PORO PRESSÃO POSITIVA 88
4.2.1 Variação da poro pressão com o nível d'água. 90
4.2.2 Correlação dos valores de poro pressão com a precipitação 94
4.2.3 Análise qualitativa do desenvolvimento das poro-pressões. 95
4.3 MEDIDAS DE SUCÇÃO 110
4.3.1 Avaliação da correlação entre precipitação e medidas de sucção. 113
4.3.2 Análise qualitativa do desenvolvimento da sucção. 114
4.4 PERFIS DE PORO PRESSÃO MEDIDOS E PERFIS HIDROSTÁTICOS 125
4.5 MEDIDAS DE DESLOCAMENTOS SUB-HORIZONTAIS 130
4.5.1 Avaliação da variação dos fatores de segurança e deslocamentos 138
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 144
5.1 CONCLUSÕES 144
5.1.1 Pluviometria 144
5.1.2 Poro pressão 144
5.1.3 Sucção 146
5.1.4 Perfis de poro pressão medidos e hidrostáticos 146
5.1.5 Medidas de deslocamentos sub-horizontais 147
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 148
REFERÊNCIAS 149
ANEXOS 155

1 INTRODUÇÃO

As encostas brasileiras, em especial aquelas na serra do mar, se caracterizam por serem formadas por um leito rochoso recoberto por camadas residuais ou coluvionares de pequena espessura. Também são notadamente conhecidas pelo número de ocorrências de movimentos de massa. (MASSAD, 2010; GERSCOVICH, 2016).

Uma típica encosta da serra do mar possui uma cobertura coluvionar rasa, ou seja, de um material que sofreu um movimento e foi depositado num determinado local. Esta formação é bastante suscetível à movimentos de massa, pois qualquer mudança no seu arranjo pode desencadear um movimento. Seguindo esta linha de raciocínio, pode-se assumir que os fatores de segurança de um talude natural, coluvionar, tende a ser baixo, talvez até próximo à unidade (MASSAD, 2010).

Portanto, em taludes naturais não saturados, o desenvolvimento das poro-pressões é fator importante como possível gatilho para desencadear um movimento de massa.

Em Santa Catarina, estado caracterizado por um relevo montanhoso contemplado pelas Serras do Mar e Serra Geral, é conhecido pelo histórico de ocorrências de movimentos de massa. O atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012, apresenta, conforme a FIGURA 1, registros de ocorrências de movimentos de massa, onde fica evidenciado a maior suscetibilidade do litoral sudeste e sul do Brasil e mostra Santa Catarina como o 5º estado com maior número de ocorrências. O evento recente mais emblemático e traumático foi certamente o desastre de 2008, onde 135 pessoas morreram e os prejuízos somaram mais de R$ 4,75 bilhões. (Banco Mundial, 2012)

Neste mesmo período houve vários movimentos de massa ao longo da rodovia BR-101, rodovia que corta o litoral de Santa Catarina. Um desses movimentos foi o escorregamento no km 140+700, no Morro do Boi, que interrompeu a pista, gerando prejuízos à sociedade (PRETTO, 2014)

Essa ocorrência motivou a implantação de um sistema de contenção e um plano de instrumentação que serviu como base para o projeto de pesquisa ao qual este trabalho está vinculado. A instrumentação foi implantada em 2012 e desde então são coletados dados de precipitação, poro pressão, sucção, deslocamentos sub-

horizontais, carga em grampos, deformação nos grampos e deslocamentos superficiais.

FIGURA 1 - OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE MASSA NO BRASIL DE 1992 A 2012



FONTE: UFSC / CEPED, 2013

Com cerca de 7 anos de monitoramento foi possível desenvolver uma visão ampla do comportamento da área monitorada.

São apresentadas análises dos dados de precipitação, das variações de poro pressão, sucção e deslocamentos, bem como é avaliada a confiabilidade das leituras e identificada possíveis erros ou comportamentos não esperados.

1.1 JUSTIFICATIVA

O local de estudo deste trabalho já foi objeto de algumas dissertações, trabalhos de conclusão de curso e de vários artigos científicos, como, Sestrem (2012), Lazarim (2012), González (2013), Pretto (2014), Sestrem et al.(2015), González et al.(2017), Joly (2018), entre outros. Uma das principais justificativas apresentadas por estes autores é a relevância da malha rodoviária para a economia brasileira e para o transporte de pessoas, uma vez que 61% do transporte de mercadorias e 96% do transporte de pessoas é feito pelo modal rodoviário, (CNT – Confederação Nacional do Transporte, 2019). Além disso a rodovia BR-101/SC é a principal artéria da malha rodoviária catarinense, com um tráfego diário médio de 24.000 veículos por dia

segundo a EPL – Empresa de Planejamento e Logística S.A. (2020). Este trecho da BR-101 é também responsável por interconectar os três estados da região sul, que foram responsáveis por 17% do PIB em 2017 (IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020), e conectar a região sudeste à região sul e aos países do Mercosul.

A ocorrência de desastres naturais gera danos às infraestruturas e nesse sentido, o relatório da Universidade Federal de Santa Catarina (2016) levanta os danos e prejuízos causados pelos desastres naturais no Brasil de 1995 a 2014 e demonstram que neste período o montante foi de mais de 182 bilhões de Reais, dos quais, quase 27 bilhões foram na Infraestrutura, o que corrobora para a importância do entendimento do processo de instabilidade de encostas junto à infraestruturas sociais como as rodovias.

Se buscarmos os dados do evento extremo de 2008 em Santa Catarina, dentro do qual houve o grande movimento de massa no talude objeto deste trabalho (SESTREM, 2012; PRETTO, 2014), pode-se perceber que mesmo em um evento de grande precipitação como o de 2008, onde a grande maioria dos registros foi de alagamentos, a principal causa das mortes, indicados como 97% dos óbitos, foram os soterramentos decorrentes de deslizamentos de terra (BANCO MUNDIAL, 2012). Santos (2014) relata 94 ocorrências de escorregamento em 2008 e 31 em 2011 ao longo da BR-101. Apenas no trecho que é objeto deste trabalho, foram registradas 14 ocorrências de deslizamentos entre janeiro de 2015 e dezembro de 2018 relacionadas à eventos pluviométricos (SALAH et al., 2019).

Um dos possíveis gatilhos deflagradores de movimentos de massa é a precipitação e a maioria dos desastres naturais no Brasil são de ordem climática ou meteorológica (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2016), logo, o entendimento dos movimentos de massa é de grande relevância, visto que a chuva pode ser um agente deflagrador da instabilidade, seja pela redução da sucção ou pelo aumento da poro pressão (GERSCOVICH, 2016).

Logo, estudos relacionados à infraestrutura rodoviária, dado sua importância econômica e social, relacionados a influência da chuva na ocorrência de acidentes geotécnicos ou à segurança das encostas de forma geral são de grande valia para sociedade.

O projeto de pesquisa para o qual este trabalho visa contribuir, foi iniciado em 2012 e teve inúmeras contribuições, como Sestrem (2012) que descreveu a encosta

e o projeto de monitoramento, Lazarim (2012) que fez caracterização geotécnica da camada coluvionar, Gonzalez (2013) que avaliou os primeiros resultados e deu tratamento estatístico, Pretto (2014) que obteve parâmetros de permeabilidade e as curvas de retenção de águas no solo e Joly (2017) que avaliou a profundidade da frente de umedecimento.

A contribuição deste trabalho será na avaliação geral do comportamento do Morro do Boi em relação ao desenvolvimento das poro pressões e deslocamentos, analisando dados consolidados e referentes à cerca de 7 anos de monitoramento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é, através de análises qualitativas, desenvolver uma visão geral do comportamento do talude do Morro do Boi, no que diz respeito ao desenvolvimento das poro-pressões e deslocamentos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estimar a duração de um evento pluviométrico para o solo.
- Estabelecer correlações entre a precipitação e as variações de poro pressão e sucção.
- Identificar padrões de comportamento para os sensores monitorados.
- Identificar e quantificar deslocamentos medidos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SOLOS NÃO SATURADOS

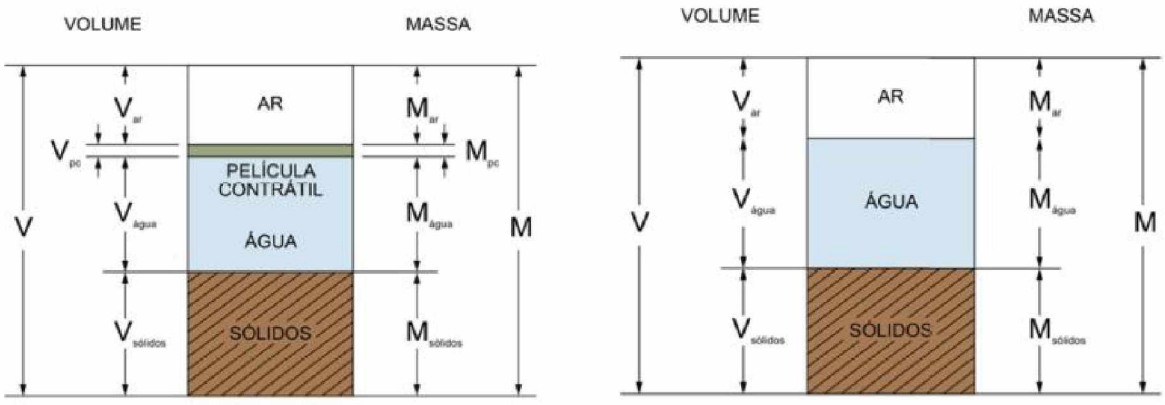
A mecânica dos solos clássica teve suas principais teorias desenvolvidas a partir da consideração dos solos em dois estados: Saturado e seco (CONCIANI et al., 2015). Entretanto, os solos na condição não saturada ou parcialmente saturada são abundantes e são aqueles com os quais em geral lidamos nas obras de engenharia, em especial em regiões tropicais onde há ocorrência de um grande manto de intemperismo.

Os solos lateríticos, muito presentes no Brasil, são grandes exemplos de solos não saturados e que possuem características peculiares, que os fazem objeto de estudos específicos. Os solos residuais, mesmo que ainda não laterizados, são muitas vezes encontrados também em condições não saturadas.

Os solos sedimentares são, em muitos casos, formados inicialmente saturados e com a deposição de novos sedimentos e drenagem do lençol freático tornam-se não saturados apresentando reduções nos valores de poro pressão até o desenvolvimento de poro-pressões negativas, não só pela capilaridade, mas também por efeito da evapotranspiração. (FREDLUND, 1979)

Fredlund (1979) assume que os solos não saturados possuem 4 fases, diferentemente dos saturados que apresentam duas fases. Os saturados apresentam as fases sólida e água, enquanto os não saturados apresentam as fases sólida, água, ar e uma película contrátil da interface solo-água como ilustrado na Figura 2.

FIGURA 2 - FASES DO SOLO NÃO SATURADO – MODELO RIGOROSO E SIMPLIFICADO



FONTE: Fredlund e Rahardjo (1993, *apud* BURGOS e CONCIANI, 2015)

A presença de água nos solos não saturados, ou o grau de saturação desses solos é o que governa as principais características estudadas nesses materiais, que são o incremento de resistência através dos potenciais de água no solo e a redução da sua permeabilidade (BOSZCZOWSKI, 2008; CONCIANI et al., 2015). Outra forma de dizer isso é que a sucção e a condutividade hidráulica dependem do teor de umidade. Quanto maior a umidade do solo ou quanto mais próximo do teor de umidade saturada, menor serão os valores da sucção e maiores serão os valores da condutividade hidráulica.

A água no solo pode ter vários potenciais que somados representam o potencial total e a diferença entre potenciais totais é o que gera o fluxo. A água pode ter um potencial cinético, gravitacional, térmico, pneumático, de pressão, osmótico e matricial (MACHADO e VILAR, 2015). Os potenciais matriciais e osmóticos são pressões de atração entre as partículas e por isso recebem o nome de sucção.

2.1.1 Sucção

A sucção é a poro pressão negativa, que ao invés de reduzir a tensão efetiva a eleva através de forças de atração entre as partículas.

Para empuxo e problemas de equilíbrio limite, um solo não saturado pode ser considerado como um solo saturado com um incremento de coesão. Este incremento é proporcional à sucção mátrica. (FREDLUND, 1979)

A sucção total é a soma da sucção mátrica e da sucção osmótica. A mátrica é composta pelas tensões capilares e tensões de adsorção e a osmótica tem relação com a presença de sais na água. (MACHADO e VILAR, 2015)

Dessa forma, a sucção total (ψ) é a soma da sucção matricial e da sucção osmótica conforme a equação 1 (GITIRANA JR et al., 2015):

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (1)$$

Onde:

u_a é a pressão do ar

u_w é a pressão da água

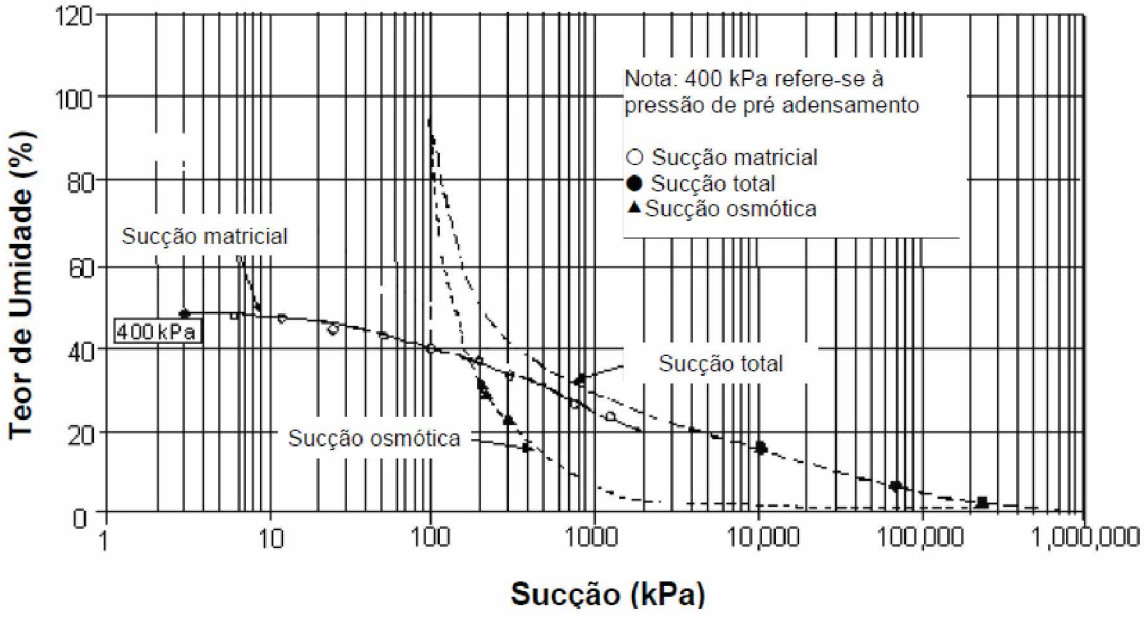
π é a sucção osmótica

A parcela $(u_a - u_w)$ é a sucção matricial.

Para altos teores de umidade, a sucção mátrica prevalece sobre a osmótica, devido a sua magnitude superior, enquanto, para baixos valores de teor de umidade, a osmótica pode prevalecer. (BOSZCZOWSKI, 2008). Ou seja, para maiores magnitudes de sucção, a sucção osmótica terá mais influência na sucção total, enquanto nas faixas de menor magnitude, a sucção mátrica terá maior influência na sucção total conforme Figura 3.

Gitirana Jr et al. (2015) argumentam que a sucção osmótica é tratada como de pouca relevância em problemas práticos, mas observam que em problemas relativos à contaminação do solo ou com variações significativas do teor de umidade por evaporação, a sucção osmótica pode ter grande variação.

FIGURA 3 - INFLUÊNCIA DAS PARCELAS DE SUCÇÃO NAS DIFERENTES FAIXAS DE SUCÇÃO



FONTE: Fredlund (2002, *apud* BOSZCZOWSKI, 2008)

2.1.2 Curva de Retenção de Água nos Solos

A curva de retenção de água no solo (CRAS) representa a quantidade de água presente no solo e a energia ou sucção necessária para removê-la. Segundo Gitirana Jr et al. (2015), é a propriedade mais importante dos solos não saturados.

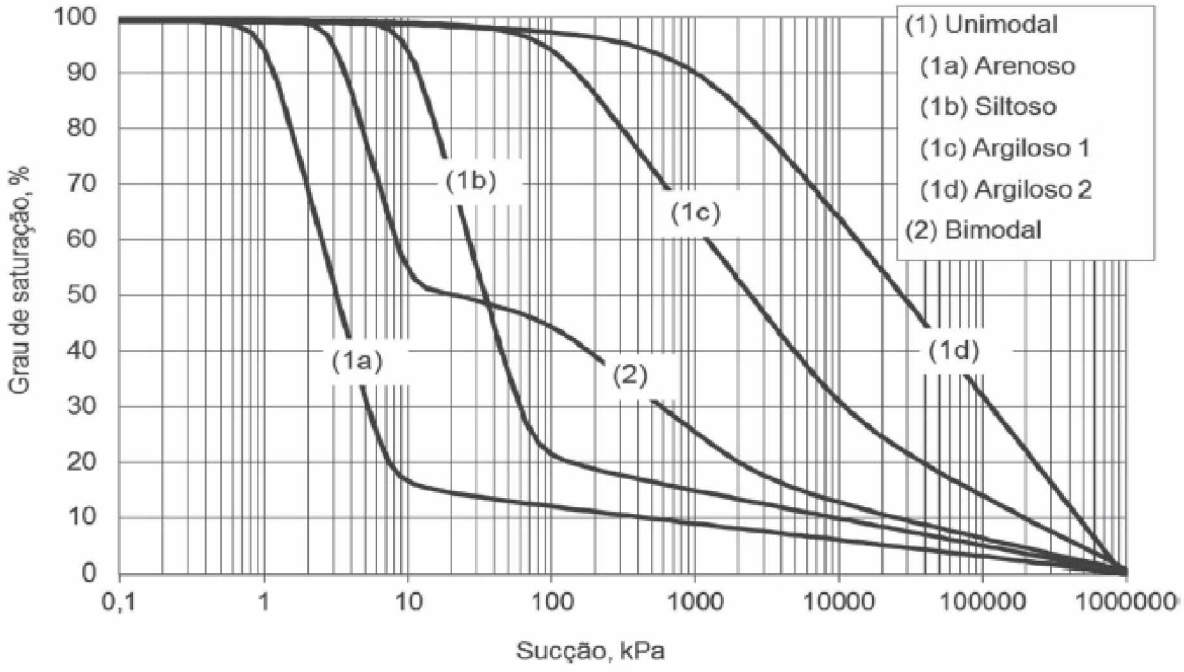
As curvas de retenção de água ou curvas características expressam como cada solo ou o mesmo solo em estados diferentes retém água para uma mesma sucção.

Gitirana Jr et al. (2015) faz uma analogia à tensão capilar ou poro pressão negativa em função da capilaridade que pode ter valores similares para diferentes solos, porém esses solos podem apresentar teores de umidade diferentes para os mesmos valores de sucção ou tensão capilar. Ou seja, um determinado solo possui uma maior capacidade de retenção de umidade que outro.

Vários são os fatores que influenciam o formato e valores das curvas de retenção, variação de volume, granulometria, história de tensões, grau de intemperismo, mineralogia e compactação.

Na Figura 4 são apresentados os formatos das curvas de retenção, onde pode ser observado que solos arenosos possuem curvas mais inclinadas e com menores valores de entrada de ar e de sucção residual.

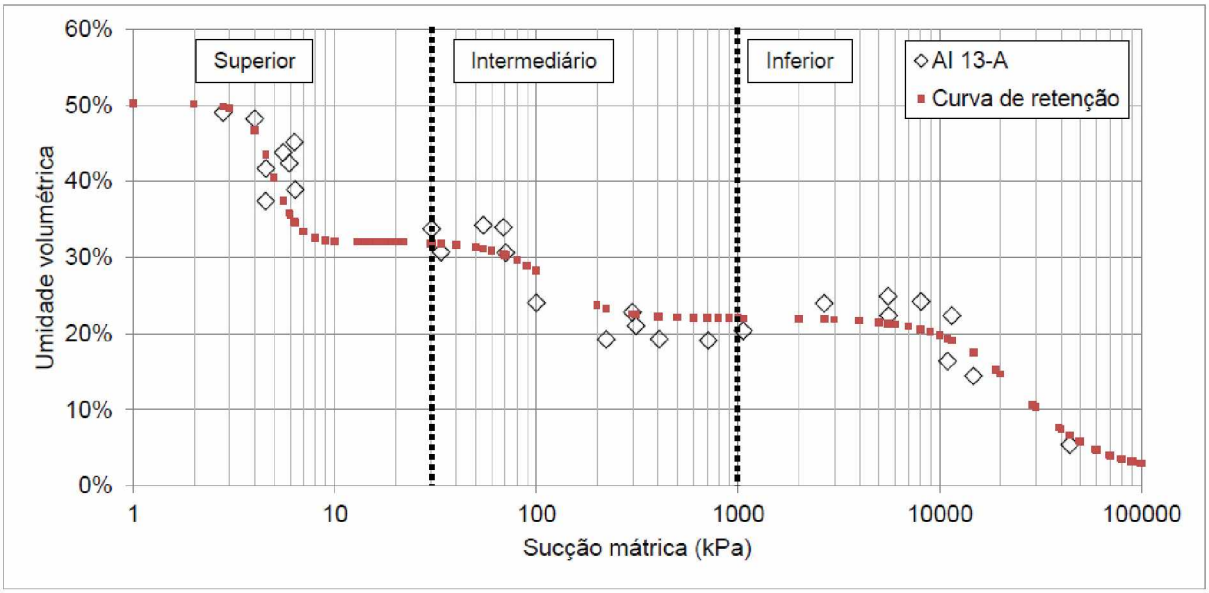
FIGURA 4 – FORMATOS DE CURVAS DE RETENÇÃO



FONTE: Gitirana e Fredlund (2004 apud GITIRANA Jr et al., 2015)

Além dos formatos bimodal e unimodal mostrados na Figura 4, Ferreira (2017) apresenta uma curva de retenção de água com formato trimodal. (FIGURA 5)

FIGURA 5 – EXEMPLO DE CRAS COM FORMATO TRIMODAL

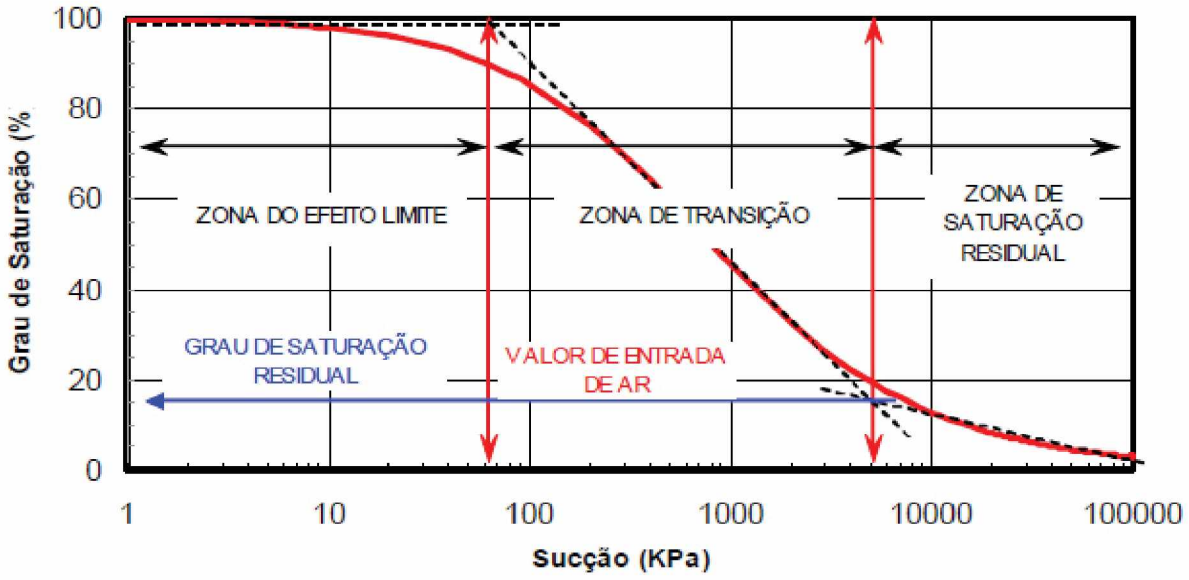


FONTE: Ferreira (2017)

A Figura 6 mostra uma representação típica de uma curva de retenção, onde podem ser definidos três trechos. Zona do efeito limite ou zona saturada, zona de transição ou desaturação e zona residual ou de saturação residual.

A zona saturada é limitada pelo valor de entrada de ar (ψ_b), que pode ser entendido como o maior valor de sucção que os poros podem suportar sem que haja a drenagem.

FIGURA 6 - ELEMENTOS NA CURVA DE RETENÇÃO



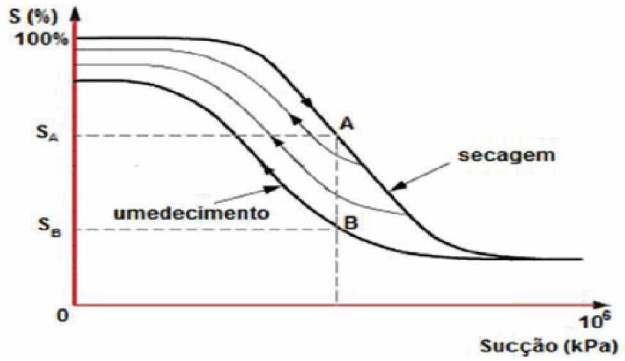
FONTE: Boszczowski (2008)

O trecho de desaturação, é aquele onde efetivamente há a variação da sucção com a umidade e é limitado pelo valor de entrada de ar e a sucção residual (ψ_{res}). É o trecho no qual o solo sofre a drenagem. A sucção residual seria o valor limite de sucção para drenar a água livre do solo.

Na zona residual, a umidade representada pelo grau de saturação residual (S_{res}) é aquela que não está livre para ser drenada e cuja remoção estaria atrelada a elevados valores de sucção, normalmente relativos à evaporação.

Conforme pode ser observado na Figura 7, há uma histerese entre as trajetórias de umedecimento e secagem e entre estas curvas existem infinitas curvas que podem representar a relação entre sucção e umidade no solo (BOSZCZOWSKI, 2008). Apesar da CRAS ser uma importante propriedade dos solos não saturados e ser uma ferramenta para a predição da sucção ou umidade do solo, a histerese torna esta finalidade muito difícil de ser alcançada (FREDLUND, 2002). Segundo Bear (1979 apud TAMI et al., 2004) as causas para a histerese são a irregularidade da seção dos vazios, o ângulo de contato e o envelhecimento devido à processos de secagem e umedecimento. Leung e Ng (20) através da obtenção de CRAS com a medição da variação da sucção e do teor de umidade *in situ* observaram que há uma tendência de redução da histerese com o tempo.

FIGURA 7 - HISTERESE ENTRE AS CURVAS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM



FONTE: Marinho et al. (2015)

A histerese influencia o comportamento do solo no que diz respeito ao desenvolvimento da sucção durante os ciclos de umedecimento ou secagem atingindo inclusive valores de pico de sução ou de umidade diferentes. A predição ou análise de estabilidade de taludes de solos não saturados deve, portanto, considerar em qual

ciclo o solo está para se escolher a melhor CRAS. Se o solo está em um ciclo de umedecimento, deve-se usar a curva de umedecimento, se está num processo de drenagem, deve-se usar a curva de secagem. (TAMI et al., 2004)

Existem inúmeras equações para predição da curva de retenção. Gitirana Jr et al. (2015) apresentam o QUADRO 1, com indicação das principais equações.

QUADRO 1 - EQUAÇÕES PARA AJUSTE DA CURVA DE RETENÇÃO

Autor	Equação	Parâmetros
Garder (1956)	$\Theta_n = 1/(1 + a_g \cdot \psi^{n_g})$	a_g, n_g
Brooks e Corey (1964)	$\Theta_n = 1 \mid \psi \leq \psi_b$ $\Theta_n = (\frac{\psi}{\psi_b})^{\lambda_{bc}} \mid \psi > \psi_b$	ψ_b, λ_{bc}
Brutsaert (1966)	$\Theta_n = \frac{1}{(1 + (\psi/a_b)^{n_b}}$	a_b, n_b
van Genuchten (1980)	$\Theta_n = 1/(1 + (a_{vg} \cdot \psi)^{n_g})^{m_{vg}}$	a_{vg}, n_{vg}, m_{vg}
McKee e Bumb (1984)	$\Theta_n = 1 \mid \psi \leq \psi_b$ $\Theta_n = \exp(\frac{a_{m1} - \psi}{n_{m1}}) \mid \psi > \psi_b$	a_{m1}, n_{m1}, ψ_b
McKee e Bumb (1987)	$\Theta_n = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{a_{m2} - \psi}{n_{m2}}\right)}$	a_{m2}, n_{m2}
Fredlund e Xing (1994)	$w = \frac{C_{(\psi)} \cdot w_s}{(\ln(e + \left(\frac{\psi}{a_{fx}}\right)^{n_{fx}})^{m_{fx}}}$ $C_{(\psi)} = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)}$	a_{fx}, n_{fx} m_{fx}, ψ_{rb}
Gitirana Jr e Fredlund (2004) – Unimodal	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\frac{\psi}{\sqrt{\psi_b \cdot \psi_{res}}})^d} + S_2$	a_{fx}, n_{fx} m_{fx}, ψ_{rb}

FONTE: Gitirana Jr et al. (2015)

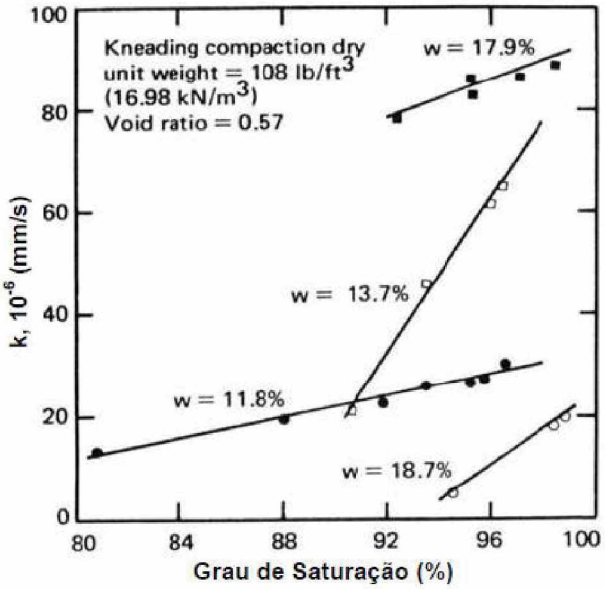
2.1.3 Condutividade hidráulica dos solos não-saturados

A capacidade do solo de permitir o fluxo de um fluido, independentemente de sua viscosidade é a sua permeabilidade que é uma característica intrínseca do solo. A condutividade hidráulica é capacidade do solo permitir o fluxo de um fluido específico e é representada através do coeficiente de permeabilidade. Em um meio

não saturado, esse parâmetro muda de valor com o grau de saturação do solo (BICALHO et al. 2015).

A condutividade hidráulica é tão maior quanto maior o grau de saturação, atingindo o que conhecemos como coeficiente de permeabilidade (k_{sat}) quando o grau de saturação é 100% (BOSZCZOWSKI, 2008). A Figura 8 exemplifica essa relação.

FIGURA 8 - RELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E GRAU DE SATURAÇÃO



FONTE: Das (1983, *apud* BOSZCZOWSKI, 2008)

A lei de Darcy é aplicada aos solos não saturados, entretanto, considera a condutividade hidráulica como função da sucção ou do teor de umidade ou do grau de saturação do solo. A Equação de Buckinghram-Darcy (Equação 2), muito similar a equação de Darcy, fornece a velocidade de fluxo no meio não saturado. (BICALHO, et al., 2015)

$$v = k \cdot i \qquad (2)$$

Onde:

v é a velocidade de fluxo

k é a condutividade hidráulica não saturada, que é f(S, e); f(w, e); f(S, w) ou f(θ) (Bicalho et al. 2015)

i é gradiente hidráulico (dh/dx)

A Equação 2 considera que a condutividade hidráulica (k) é função não apenas do índice de vazios ou porosidade e viscosidade do fluido, como no caso dos solos saturados, mas também em função do grau de saturação ou da umidade volumétrica.

A variação da condutividade hidráulica pode ser representada pela curva de condutividade hidráulica. Estas curvas podem ser obtidas de forma direta através de ensaios de laboratório e campo, ou através de métodos indiretos através de modelos analíticos (BICALHO et al., 2015). Existem várias proposições para as funções da condutividade hidráulica, segundo Boszczowski (2008) muitas dessas apresentam bons ajustes quando comparado com ensaios de laboratório, entretanto apresentam dispersões maiores quando comparadas à ensaios de campo.

Solos granulares apresentam elevados valores de k_{sat} quando comparados à solos mais finos, entretanto ao reduzir sua umidade ou grau de saturação, esse valor pode ser reduzido em várias ordens (RIDLEY et al., 2003b).

O apresenta algumas equações para o ajuste da curva.

QUADRO 2 - EQUAÇÕES PARA AJUSTE DA CURVA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

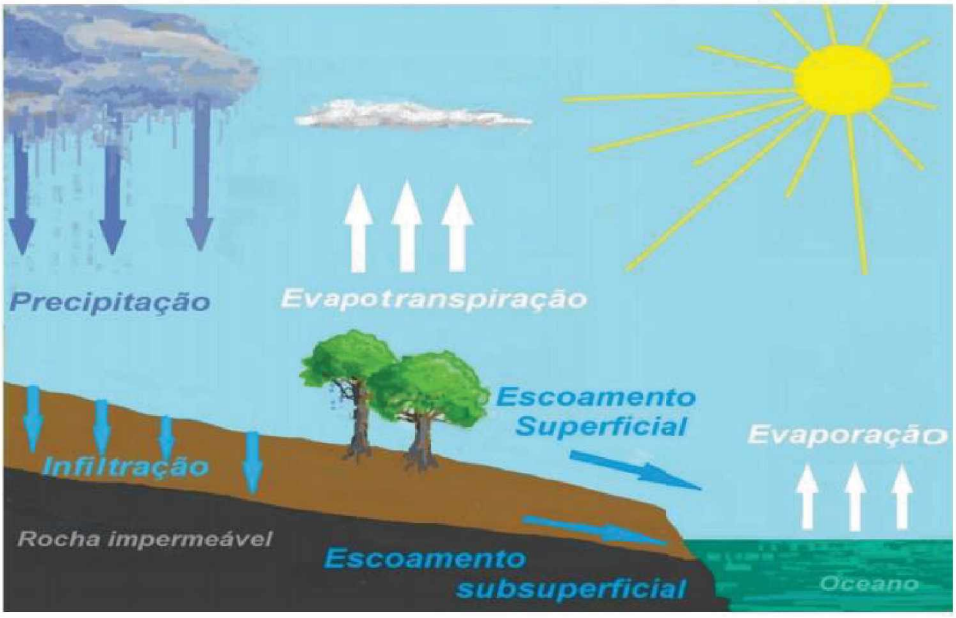
Autor	Equação	Definição de variáveis
Garder (1958)	$\mathrm{k} = \frac{k_{sat}}{1 + a \cdot (\frac{\psi}{\rho_w \cdot g})^n}$	ψ = sucção a e n = parâmetros de ajuste ρ_w = densidade da água g = aceleração da gravidade
Brooks e Corey (1968)	$k_\psi = k_{sat} \cdot \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^n \mid \psi > \psi_b$ $k_\psi = k_{sat} \mid \psi \leq \psi_b$	ψ_b = sucção de entrada de ar ψ = sucção n = parâmetro de ajuste
Arbhabhirama e Kridakorn (1968)	$\mathrm{k} = \frac{k_{sat}}{(\frac{\psi}{\psi_b})^{n'} + 1}$	ψ_b = sucção de entrada de ar ψ = sucção n' = parâmetro de ajuste
Davidson et al. (1969)	$k = k_{sat} \cdot e^{[\beta(\theta - \theta_s)]}$	θ_s = teor de umidade volumétrica saturada β = parâmetro de ajuste
Campbell (1974)	$k = k_{sat} \cdot (\frac{\theta}{\theta_s})^{2b+3}$	θ_s = teor de umidade volumétrica saturada b = parâmetro de ajuste
Mualem (1976)	$k_{rel} = \frac{[1 - (\alpha\psi)^{nm} \cdot (1 + (\alpha\psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{\frac{m}{2}}}$ $\psi > 0$	ψ = sucção m, n e α = parâmetro de ajuste $k_{rel} = {}^{k}/_{k_{sat}}$
Mualem e Dagan (1978)	$k_{rel} = S_e^x \cdot \left(\frac{\int_0^\theta \frac{d\theta}{\psi^{1+b}}}{\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi^{1+b}}}\right)^2$	ψ = sucção $k_{rel} = {}^{k}/_{k_{sat}}$ θ = teor de umidade volumétrica b = fator de tortuosidade
Van Genuchten (1980)	$k(S_e) = k_{sat} \cdot S_e^l \cdot [1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m]^2$ $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	θ_s e θ_r = teor de umidade volumétrica saturada e residual m = parâmetro de ajuste S_e = grau de saturação do solo l=0,5
Leong e Rahardjo (1998)	$k_{rel} = \Theta^p \rightarrow \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	$k_{rel} = {}^{k}/_{k_{sat}}$ θ_s e θ_r = teor de umidade volumétrica saturada e residual p = parâmetro de ajuste Θ = teor de umidade normalizado
Vanapalli e Lobbezzo (2002)	$k_{rel} \approx 10^{(7{,}9 \log S^y)}$ $y = 14{,}08 \cdot (I_p)^2 + 9{,}4 \cdot (I_p) + 0{,}75$	$k_{rel} = {}^{k}/_{k_{sat}}$ S = grau de saturação I_p= índice de plasticidade

FONTE: Gerscovich e Guedes (2004, *apud* BICALHO et al., 2015)

2.1.4 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico (FIGURA 9) consiste na troca de água, em estado líquido, gasoso ou sólido, entre superfície terrestre e a atmosfera. A água atinge a superfície através da precipitação e a deixa através de processos de vaporização. A vaporização ou retorno da água para a atmosfera pode se dar pela evaporação da água dos rios, lagos, oceanos, solos e copas das árvores e pela transpiração através das plantas. A evapotranspiração, que é a associação dos fenômenos de evaporação e transpiração é parte importante do ciclo, pois pode transportar cerca de 60% da chuva (BORNA et al. 2015).

FIGURA 9 – CICLO HIDROLÓGICO



FONTE: Borna et al. (2015)

Nem toda água que incide no solo infiltra, pois parte dela é interceptada pela vegetação e outra parte escoa superficialmente (*runoff*). A quantidade de água que infiltra depende da condição de umidade do solo, da sua capacidade de infiltração, da declividade da superfície e da intensidade da chuva e sua duração (TSAPARAS et al., 2003; RAHARDJO et al., 2005; CUOMO e DELLA SALA, 2016); BORNA et al., 2015). A capacidade de infiltração refere-se ao fluxo entre a atmosfera e a superfície e difere da condutividade hidráulica que é a capacidade de fluxo no solo.

Rahardjo et al. (2005) executam um experimento em um talude em Singapura, onde concluem que a infiltração é de 40 a 100% da precipitação, a depender da

intensidade da chuva. Observam também que há um atraso entre o início da chuva e a geração de *runoff*.

A relação entre as parcelas da precipitação que infiltram ou escoam é variável e depende dos fatores citados anteriormente. Se a intensidade da chuva é menor que a capacidade de absorção do solo, toda chuva infiltra. Porém, haverá um momento que o *runoff* vai ser gerado, mesmo que a intensidade da chuva seja menor que o Ksat. Segundo Cuomo e Dalla Sala (2013) isso acontece quando a sucção é zerada. Portanto a CRAS tem papel importante nessa relação, pois a condição de umidade anterior a chuva é determinante para a infiltração.

2.1.5 Resistência ao cisalhamento dos solos não-saturados

Para aplicações de engenharia, um dos temas de maior relevância certamente é a resistência ao cisalhamento, pois é baseado na análise e no conhecimento deste comportamento dos solos que os profissionais irão projetar, dimensionar, verificar e analisar a maior parte dos projetos e obras de geotecnia.

A resistência ao cisalhamento dos solos é governada pela adesão ou cimentação entre as partículas, pelo atrito entre as partículas e pelo nível de tensão ao qual o solo está submetido. Nos solos não saturados isso acontece da mesma forma, porém conta com a contribuição da sucção que se reflete num incremento de resistência na forma de uma coesão aparente ou de um incremento do intercepto coesivo. (CAMPOS e MOTTA, 2015)

Nos solos não saturados parte-se também do conceito de tensões efetivas proposto por Terzaghi e entre várias proposições, Bishop (1958, *apud* Fredlund e Rahardjo, 1993; BOSZCZOWSKI, 2008; CAMPOS e MOTTA, 2015) apresenta a Equação 3 para as tensões efetivas:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi \cdot (u_a - u_w) \tag{3}$$

Onde:

σ' é a tensão efetiva

u_a é a pressão do ar

u_w é a poro pressão

σ é a tensão total

χ é um parâmetro que depende do tipo de solo e do grau de saturação, variando entre 0 e 1.

A parcela $(u_a - u_w)$ é a sucção mátrica (ψ_m), logo a Equação 3 poderia ser reescrita da seguinte forma:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi \cdot \psi_m \tag{4}$$

E a equação para a resistência ao cisalhamento proposta por Bishop aplicando o critério de Mohr-Coulomb é:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan \emptyset' + \chi \cdot \psi_m \cdot \tan \emptyset' \tag{5}$$

Existem na literatura várias equações propostas para a resistência ao cisalhamento de solos não saturados (BOSZCOZOWSKI, 2015), entretanto Campos e Motta (2015) sugerem que atualmente a equação proposta por Fredlund et al. (1978) é mais empregada pois o parâmetro χ é de determinação experimental mais complexa do que o parâmetro ϕ^b proposto por estes autores na Equação 6.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)_f \cdot \tan \emptyset' + (\psi_m)_f \cdot \tan \emptyset^b \tag{6}$$

Onde:

$(\sigma_n - u_a)_f$ é a tensão nominal na superfície de ruptura, na ruptura

$(\psi_m)_f$ é a sucção mátrica na ruptura ou seja: $\psi_m = (u_a - u_w)$

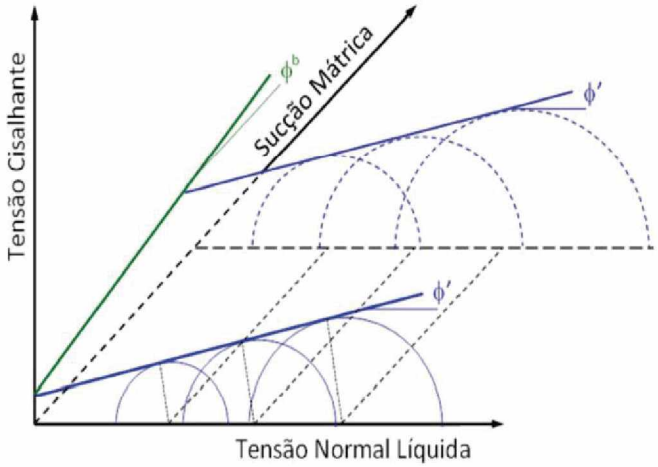
$\emptyset^b$ é um parâmetro que quantifica o incremento de resistência devido ao aumento da sucção.

O parâmetro $\emptyset^b$ é o ângulo que indica a razão entre o acréscimo de resistência ao cisalhamento e a sucção (CAMPOS e MOTTA, 2015). Como se fosse o coeficiente angular da função linear que relaciona a resistência à sucção. Esse conceito pode ser

observado na envoltória estendida de Mohr-Coulomb apresentada por Fredlund et al. (1978, apud CAMPOS e MOTTA, 2015) na Figura 10.

Apesar da analogia do parâmetro $\emptyset^b$ com um coeficiente angular de uma função linear, segundo Campos e Motta (2015) muitos autores sugerem que este não seja linear e varie com o nível de sucção.

FIGURA 10 - ENVOLTÓRIA ESTENDIDA DE MOHR - COULOMB.



FONTE: Fredlund et al. (1978, *apud* CAMPOS e MOTTA, 2015)

2.2 ESCORREGAMENTOS

Escorregamentos são movimentos de massa que possuem uma superfície de ruptura definida e que possuem velocidade média a alta e ocorrem quando o nível de tensões numa determinada fração do solo da encosta ou talude se iguala ou supera a tensão cisalhante máxima suportada pelo solo (GERSCOVICH, 2016).

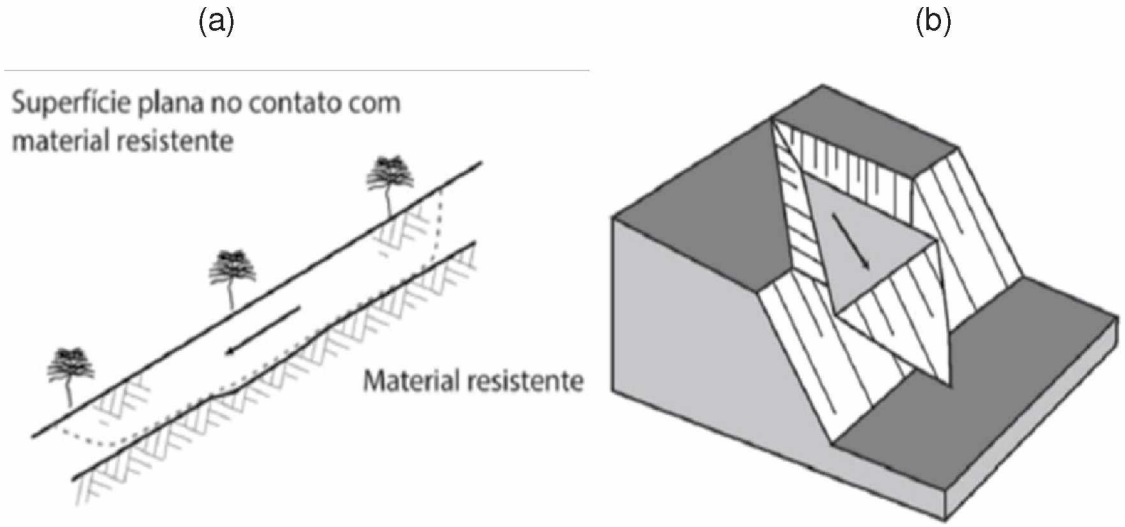
Os escorregamentos podem ser planares ou translacionais, rotacionais ou em cunha.

Os escorregamentos planares ou translacionais ocorrem em terrenos não homogêneos, onde há um plano de separação entre camadas com resistências diferentes de solo, ou uma camada de solo e um leito rochoso ou de um manto coluvionar sobre uma camada residual.

Os escorregamentos em cunha também ocorrem seguindo planos definidos, porém estão associados a descontinuidades ou planos de fraqueza que se cruzam formando cunhas.

A Figura 11 apresenta exemplos de escorregamentos planares.

FIGURA 11 - EXEMPLOS DE ESCORREGAMENTOS PLANARES (A) TRANSLACIONAL (B) EM CUNHA (A)



FONTE: Georio (1999, *apud* GERSCOVICH, 2016)

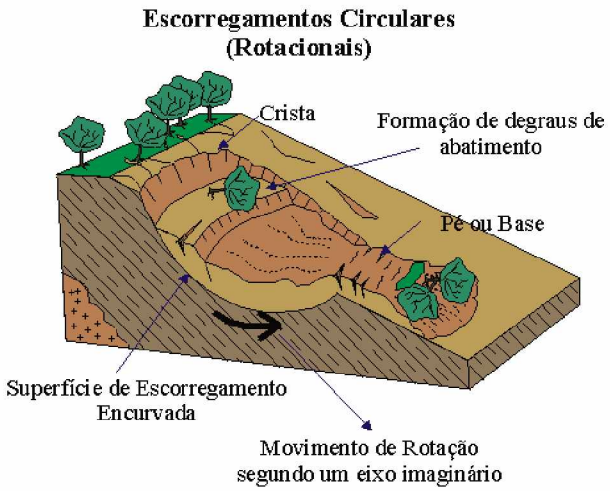
Quando o terreno é homogêneo a superfície de ruptura terá uma forma circular e o movimento será rotacional. O escorregamento rotacional poderá ser múltiplo, isto é, com escorregamentos consecutivos podendo ser retrogressivo, quando os primeiros movimentos são no pé do talude ou progressivo, quando os primeiros escorregamentos são na crista (GERSCOVICH, 2016). A Figura 12 apresenta uma ilustração de um escorregamento rotacional.

Quanto a atividade, Cruden e Varnes (1996) classificam os escorregamentos e movimentos de massa de forma geral como:

"Ativos", quando ainda há deslocamentos;

"Suspensos", quando os últimos registros de deslocamentos ocorreram no último ciclo ou estação, porém não há mais movimentos no presente. Vegetação ainda não recomposta e presença de trincas na crista;

FIGURA 12 - EXEMPLO DE ESCORREGAMENTO ROTACIONAL



FONTE: Infanti e Fornassari (1998, *apud* UNESP, 2001)

"Reativados", quando apresentam movimentos após algum tempo inativos;

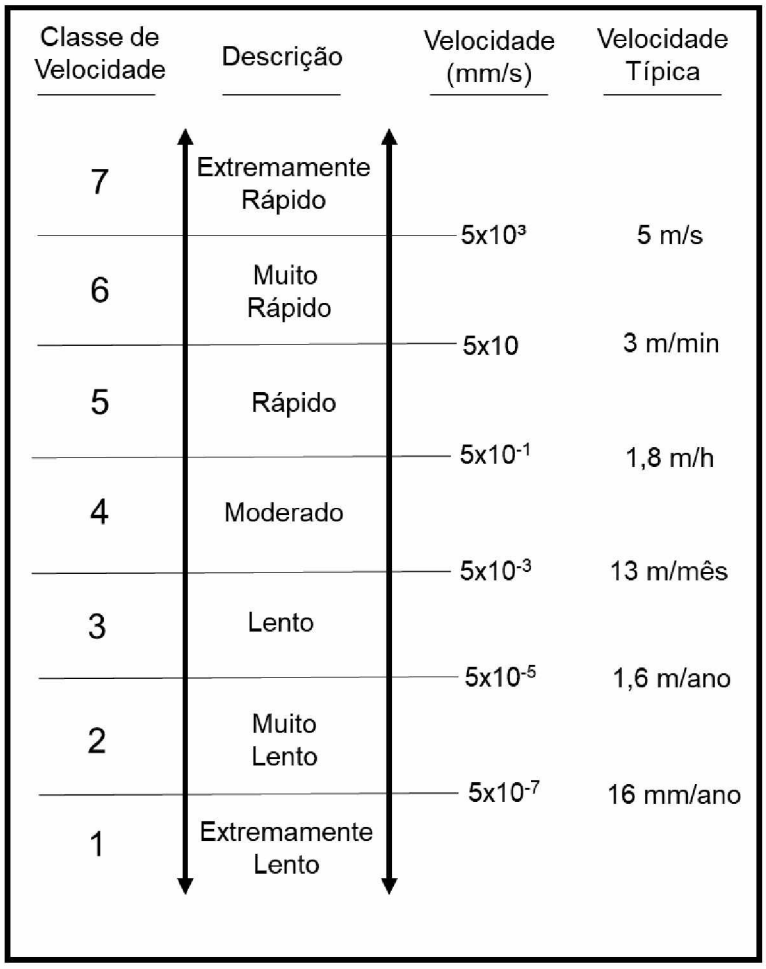
"Inativos", quando não há registros de movimentos por mais de um ciclo anual. Podem ser "dormentes" quando os fatores que causaram o deslizamento ainda são aparentes, ou "abandonados, quando o fator causador do escorregamento foi alterado e não é mais presente;

"Estabilizados", quando processos naturais ou antrópicos protegem o talude ou encosta contra novos deslizamentos ou processos que possam causá-los.

"Relíquia", os escorregamentos ocorreram em condições geomorfológica e climática diferente das atuais.

Outra classificação dentre as várias apresentadas por Cruden e Varnes (1996) e que é muito importante, uma vez que dá indicativos do potencial destrutivo dos escorregamentos e muito citada por diversos autores (SIMEONI e MONGIOVI, 2007; GONZALEZ et al, 2017; ASKARINEJAD et al., 2018; GULLA et al., 2018), é quanto a velocidade do movimento. A FIGURA 13 apresenta esta classificação como uma variação da escala de Varnes (1978 *apud* Cruden e Varnes, 1996).

FIGURA 13 - CLASSIFICAÇÃO APRESENTADA POR CRUDEN E VARNES (1996)



LEGENDA:

Classe 1 – Perceptível apenas com instrumentos – Construções possíveis com precauções.
Classe 2 – Sem danos em algumas estruturas permanentes
Classe 3 – Construções corretivas podem ser realizadas durante o movimento. Algumas estruturas menos sensíveis podem ser mantidas com a devida manutenção a depender da magnitude do movimento.
Classe 4 – Algumas construções menos sensíveis podem ser mantidas temporariamente
Classe 5 – Evacuação é possível, porém estruturas, bens e equipamentos serão perdidos.
Classe 6 – Evacuação será parcial e algumas vidas serão perdidas
Classe 7 – Catástrofe violenta, construções destruídas, pouca possibilidade de evacuação e muitas mortes.

FONTE: Adaptado de Cruden e Varnes (1996)

2.2.1 Deflagradores dos movimentos de massa

Varnes (1978, *apud* GERSCOVICH, 2016) classifica os deflagradores de movimentos de massa em dois grupos: Aqueles que aumentam as solicitações nos taludes e aqueles que reduzem a resistência ao cisalhamento do solo.

Segundo Gerscovich et al. (2015) o aumento das solicitações está ligado à ações antrópicas, como a execução de cortes, depósitos de materiais e construções e a redução de resistência ao cisalhamento está ligada a infiltração de água, seja no aumento da poro pressão, devido à elevação do nível d'água, ou na redução da sucção ou na geração de fluxo preferencial através de fraturas nos embasamentos rochosos.

2.2.2 Estabilidade de taludes

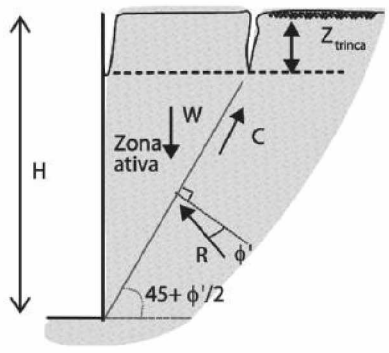
O nome genérico de talude se dá a qualquer superfície inclinada que limita um maciço de solo, rocha ou ambos (TONUS, 2009). Para se evitar, mitigar ou entender os movimentos de massa descritos anteriormente existem modelos para análise de estabilidade.

Estas análises podem ser determinísticas, quando se avalia a estabilidade baseada em parâmetros médios, ou probabilísticos, quando se considera a variação dos parâmetros para se calcular a probabilidade de falha ou ruptura.

Os métodos determinísticos podem ser divididos entre os de equilíbrio limite, nos quais calculam-se as resistências e as solicitações e da razão entre estes se obtém um fator de segurança, e aqueles que avaliam a relação entre tensões e deformações.

Existem várias abordagens e métodos para as análises de estabilidade por equilíbrio limite, desde Rankine (1857) (FIGURA 14) com a verificação da profundidade da trinca de tração, depois revisado por Terzaghi e Peck (1967) até os métodos das fatias inicialmente proposto por Fellenius (1927) e derivações como Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967) e Janbu (1968) (TONUS, 2009; GERSCOVICH, 2016).

FIGURA 14 – SUPERFÍCIE DE RUPTURA PLANA E TRINCA DE TRAÇÃO DE RANKINE (1857)



FONTE: Gerscovich (2016)

Os métodos de Fellenius e Bishop são para superfícies de ruptura circulares e diferenciam entre si pela direção dos equilíbrios (normal à superfície no caso de Fellenius e vertical no caso de Bishop) além de diferenças quanto à consideração das

forças entre as lamelas, fazendo o método de Fellenius mais conservador e passível de grandes distorções para valores de poro pressão mais elevados (MASSAD, 2010).

Os demais métodos citados acima consideram superfícies de ruptura com qualquer forma e o Morgenstern-Price é considerado um método mais rigoroso (MASSAD, 2010). Com a facilitação de acesso aos softwares de análises de estabilidade é possível fazer verificações com os vários métodos.

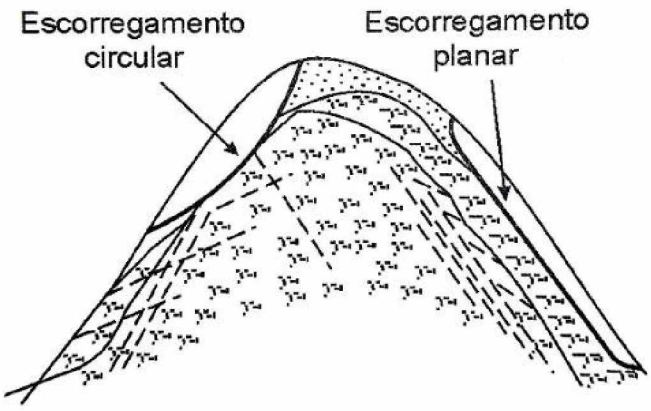
2.2.2.1 Talude Infinito

Em encostas naturais, em especial as com depósitos coluvionares sobrejacente à leitos rochosos ou a camadas residuais mais resistentes, adota-se o conceito de talude infinito. A Figura 15 apresenta as possíveis superfícies numa encosta natural.

Devido às grandes extensões e pequenas profundidades dos solos, considera-se o talude como infinito com movimento translacional paralelo ao talude e despreza-se a contribuição das extremidades (GERSCOVICH, 2016).

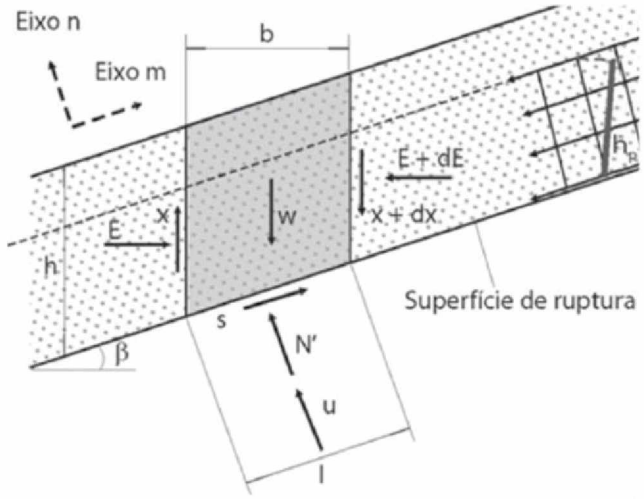
Como pode ser observado na Figura 16, define-se uma lamela de largura b que atravessa a espessura de solo até a possível superfície de ruptura e faz-se o equilíbrio entre a força cisalhante na superfície de ruptura e a resistência ao cisalhamento nesta interface.

FIGURA 15 - ENCOSTA TÍPICA DA SERRA DO MAR



FONTE: Vargas e Pichler (1957, *apud* Massad, 2010)

FIGURA 16 - ESQUEMA DE UM TALUDE INFINITO



Onde:

W é o peso da Lamela
E e X são esforços inter-lamelas
N' é a Reação normal
U é a força devido à poro pressão
β é a inclinação
s é a resistência ao cisalhamento
b é a largura da lamela
l é o comprimento da superfície da lamela
h é a profundidade da superfície de ruprtura

FONTE: Adaptado de Gerscovich (2016)

Através o equilíbrio de forças e usando o conceito de tensões efetivas chega-se a Equação 7 (FIORI, 2017; GERSCOVICH, 2016).

$$FS = \frac{c' + [(\gamma . h . \cos^2\beta) - u] . \tan \emptyset'}{\gamma . h . \ sen\ \beta . \cos \beta} \quad (7)$$

Igualando-se FS a 1, pode-se obter a profundidade crítica (hc) que representa posição da superfície de ruptura.

$$hc = \frac{c' - u . \tan \emptyset'}{\gamma . \cos \beta . (\text{sen}\ \beta - \cos \beta . \tan \emptyset')} \quad (8)$$

Para considerar o efeito da sucção é acrescentado um termo na parcela resistente da equação em função da sucção e do $\emptyset^b$. Dessa forma a Equação 7 que define o fator de segurança fica com a seguinte forma:

$$FS = \frac{c' + \gamma . h . \cos \beta^2 . \tan \emptyset' + \psi_m \cdot \tan \emptyset^b}{\gamma \cdot h \cdot \cos \beta . \text{sen}\ \beta} \quad (9)$$

2.3 INSTRUMENTAÇÃO

A engenharia geotécnica não é uma ciência exata, e os modelos adotados pelos geotécnicos são tentativas de se racionalizar o comportamento da natureza. Entretanto, esses modelos são certamente simplificadores da realidade e hipóteses são assumidas, assim como parâmetros e condições de contorno são adotados.

Para que se possa confirmar ou refutar hipóteses de projeto, é necessário a aferição ou medição de parâmetros, que podem ser indicadores de desempenho ou apenas de estado ou ainda da influência de fatores externos ao solo. Nesse sentido os projetos de engenharia deveriam contemplar a instrumentação, no intuito de minimizar as incertezas do projeto e assim garantir a melhor segurança e economia das obras.

Segundo escreve Ralph Peck (1988 in DUNNICLIFF, 1988), a instrumentação não pode ser superdimensionada de forma a gerar dados redundantes ou irrelevantes, gerando custos desnecessários, por outro lado, deve ser adequadamente planejada para não pôr um projeto em risco por falta de dados.

A instrumentação é usada para medir e monitorar grandezas que reflitam as condições de campo em obras geotécnicas sujeitas à movimentos superficiais e subsuperficiais, tensões referentes à água ou ao solo e tensões ou deformações de elementos estruturais (HUNT, 2007).

Dunnicliff (1988) apresenta o tema de forma detalhada, Sestrem (2012) e González (2013) fazem revisões sobre este tema. Portanto, objetiva-se aqui apresentar suscintamente o tema, com foco nos instrumentos utilizados no Morro do Boi.

2.3.1 Medidas de poro pressão positivas

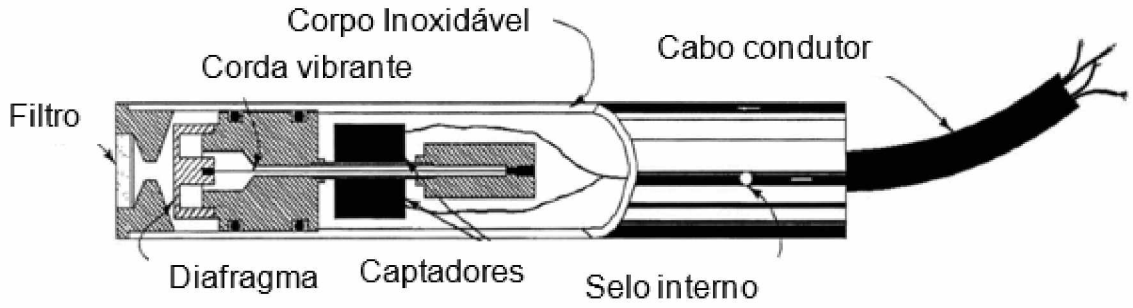
A medida da pressão de água é de suma importância para os projetos de engenharia civil, devido ao fato de que a poro pressão está diretamente ligada à resistência e ao comportamento dos solos e rochas. Apenas conhecendo a magnitude da pressão de água, é que pode se obter os valores de tensão efetiva do solo, o que governa a resistência ao cisalhamento, sendo por exemplo indispensável na análise de taludes (BRESSANI, 2009). Em rochas, a pressão hidráulica existente em juntas

ou falhas contribuirá também positiva ou negativamente para a resistência do maciço. (DUNNICLIFF, 1988)

Os principais instrumentos para medição das poro-pressões positivas são os piezômetros e o que caracteriza estes dispositivos é a capacidade de medir a pressão d'água em pontos específicos, diferentemente de poços de observação que medem apenas o nível de água. (DUNNICLIFF, 2012)

O piezômetro de corda vibrante, apresentado na Figura 17, é um equipamento elétrico que é conectado à um *data logger* e funciona através do movimento de um diafragma metálico que tenciona ou alivia uma corda, cuja frequência de vibração é medida por um captador. É a esta frequência de vibração que é associada a pressão que empurra a membrana e consequentemente a medida de poro pressão.

FIGURA 17 - PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE



FONTE: Campbell Scientific

Os instrumentos de corda vibrante são muito utilizados por permitirem medições contínuas, de forma simples e por longos períodos com razoável nível de confiabilidade, estabilidade e de forma remota. Como o volume de água necessário para movimentar o diafragma é muito baixo, esses equipamentos possuem baixo atraso nas leituras (*time lag*) (CHOQUET et al., 1999; DUNNICLIFF, 2012).

Um estudo com vários instrumentos de corda vibrante, analisando dados por um período entre 600 e 1400 dias, concluiu que as leituras apresentaram boa estabilidade neste período. Os piezômetros apresentaram baixa variação quando recalibrados após 5 anos e praticamente não sofreram influência da variação de temperatura (CHOQUET et al., 1999).

2.3.2 Medidas de poro pressão negativas

A medida e monitoramento da sucção é de relevante importância tanto para corrigir ou estimar a umidade de amostras coletadas, como para aferir as condições de taludes naturais ou construídos.

Apesar de alguns piezômetros de corda vibrante serem capazes e até usados para esta finalidade, os tensiômetros são os equipamentos mais utilizados para medir a poro pressão negativa ou a sucção do solo. Tarantino et al. (2008) cita que os primeiros tensiômetros datam do início do século XX e Ridley et al. (2003b) relata que pesquisadores do *Imperial College* já estudavam a sucção em taludes nos anos 40. Nos anos 70 e 80 houve o interesse da medição da sucção para aplicações de agricultura e com isso o desenvolvimento dos tensiômetros do tipo "*jet fill*".

Estes instrumentos consistem em um tubo plástico com uma ponteira cerâmica porosa na parte inferior, um medidor de pressão e um reservatório de água na parte superior. A ponteira cerâmica, que deve ter elevado valor de entrada de ar, faz o contato entre o solo e a água de dentro do tubo. Para atingir um equilíbrio, a água de dentro do tensiômetro é sugada pela ponteira porosa, gerando um vácuo que é então medido pelo medidor de pressão.

O medidor de pressão pode ser um manômetro, vacuômetro ou um transdutor elétrico (MARINHO et al., 2015).

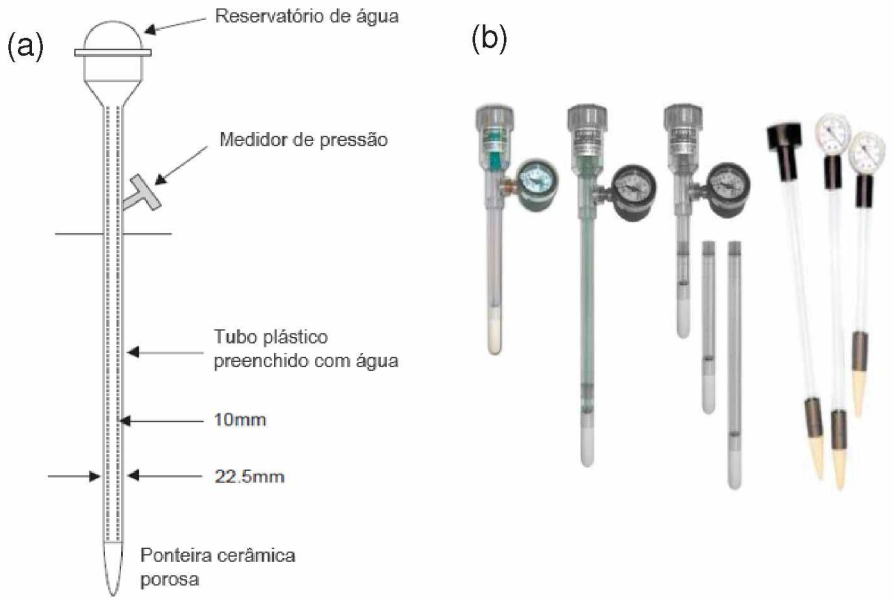
Os tensiômetros convencionais ou chamados de vácuo ou tensiômetros tipo "*jet fill*" (Figura 18) possuem limitações quanto a sua capacidade de leitura: até cerca de 80kPa segundo Ng et al. (2008) e Dunnicliff (2012), e 90kPa segundo Marinho et al. (2015). Ridley et al. (2003b) destacam essa limitação, e, ao compararem com o mini tensiômetros desenvolvido por Ridley (1992 *apud* RIDLEY et al., 2003b), sugerem que o desempenho do tensiômetros de vácuo teria sido satisfatório até cerca de 50kPa. Entretanto, vários autores reportam medidas de sucção máximas ou limitadas a 90kPa quando usam tensiômetros do tipo "*jet fill*" (LIM et al., 1996; TSAPARAS et al., 2003; LI et al., 2005; TARANTINO e RIDLEY, 2008; LEUNG e NG, 2013b; YAN e ZHANG, 2015).

A principal razão para essa limitação é o fenômeno da cavitação que gera bolhas de ar ao desprender ar de imperfeições na parede do tubo. Toda superfície possui imperfeições e algumas são na forma de micro cavidades. Se o processo de enchimento e desaeração do tubo não for adequado, as micro cavidades reterão ar e

ao impor um vácuo no tubo, o ar se desprenderá e formará uma bolha, conforme ilustrado na Figura 19.

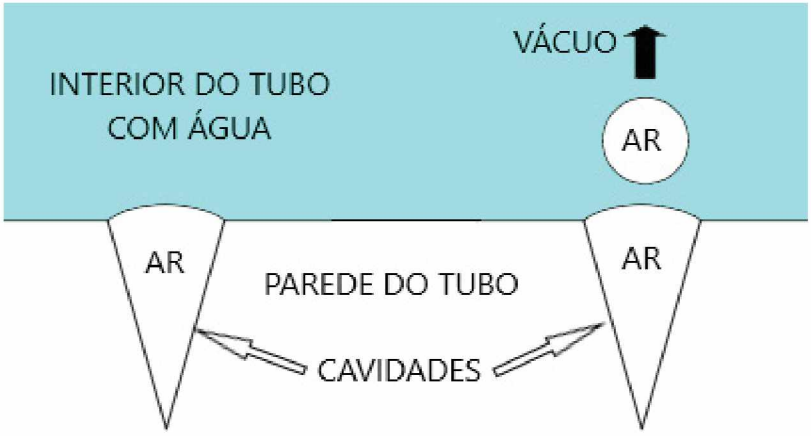
Além da cavitação, que pode colocar em dúvida a confiabilidade das leituras de longo prazo até dos tensiômetros de alta capacidade, a saturação insuficiente do filtro poroso também pode induzir o tensiômetro a apresentar leituras erradas (MARINHO et al., 2008). A Figura 20 apresenta o desempenho de um tensiômetro cujo filtro poroso foi saturado a um grau de saturação de 0,77.

FIGURA 18 - TENSIÔMETROS – (A) ESQUEMA, (B) EXEMPLOS



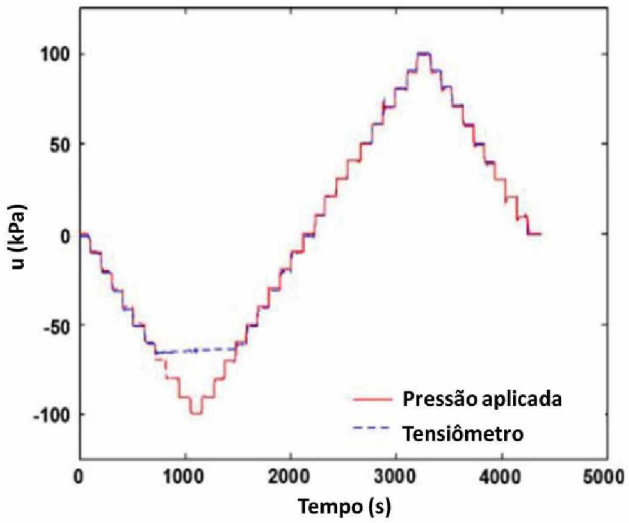
FONTE: (a) Adaptado de Ridley et al. (2003a); (b) Sestrem (2012)

FIGURA 19 - MODELO DAS FENDAS PARA EXPLICAR A CAVITAÇÃO



FONTE: Adaptado de Ridley et al. (2003b)

FIGURA 20 - ERRO NA LEITURA DE UM TENSIÔMETRO DEVIDO À NÃO SATURAÇÃO DO FILTRO.



FONTE: Take e Bolton (2003 *apud* MARINHO et al., 2008)

Gonzalez (2013) analisa a primeira série de dados de instrumentação do Morro do Boi e Joly (2017) analisa estes dados até 2017. Ambos informam sucções máximas de cerca de 80kPa a 50cm de profundidade e não relatam problemas devido a cavitação.

Leung e Ng (2013a) relatam a utilização de tensiômetros com profundidades entre 0,5 e 2,5m e com leituras limitadas a 90kPa em função da possibilidade de cavitação. Entretanto relatam o uso de um tensiômetro de alto desempenho (HDS – *High Dissipation Matric Water Potention Sensor*) com capacidade de até 400kPa e com os quais registram valores de sução de cerca de 190kPa para profundidade de 20cm.

2.3.3 Medidas de deslocamentos subsuperficiais

Medir os deslocamentos de uma obra geotécnica significa medir seu desempenho, pois os projetos de engenharia, mesmo que considerando a possibilidade dos deslocamentos, são elaborados com a intenção de minimizar tais deformações.

Os deslocamentos podem ser verticais no caso de fundações ou aterros sobre solos moles, resultado do adensamento ou recalque. Podem ser horizontais no caso

de taludes ou estruturas de contenção ou inclinados, que seria consequência dos dois anteriores. (HUNT, 2007)

As principais medidas de deslocamento são as medidas de recalque ou adensamento com placas de recalque e a medida de deslocamentos horizontais com os inclinômetros.

Inclinômetros são dispositivos instalados em furos verticais que através das variações em sua inclinação são usados para medir deslocamentos horizontais, usualmente, a cada 50cm.

Em se tratando de encostas ou taludes, inclinômetros são instrumentos capazes de indicar, além dos acréscimos ou decréscimos nos deslocamentos, a posição de possíveis superfícies de ruptura. Para isso seu comprimento e posicionamento deve ser bem estudado de forma que o furo atravesse a posição das possíveis superfícies de ruptura. (DUNNICLIFF, 1988)

Segundo Green e Mikkelsen (1988 *apud* Stark e Choi, 2008), os inclinômetros mais comummente utilizados são baseados no protótipo desenvolvido em 1952 e posteriormente comercializados pela *Slope Indicator Company.*

Os inclinômetros são compostos por um tubo guia e um torpedo. O tubo guia que é inserido e fixado no furo, possui ranhuras em duas direções, de forma que possam ser medidas as inclinações do tubo em duas direções ortogonais entre si. O torpedo é um instrumento a prova d'água que possui roldanas que se encaixam nas ranhuras do tubo guia e um acelerômetro interno, cuja voltagem de saída é função da inclinação.

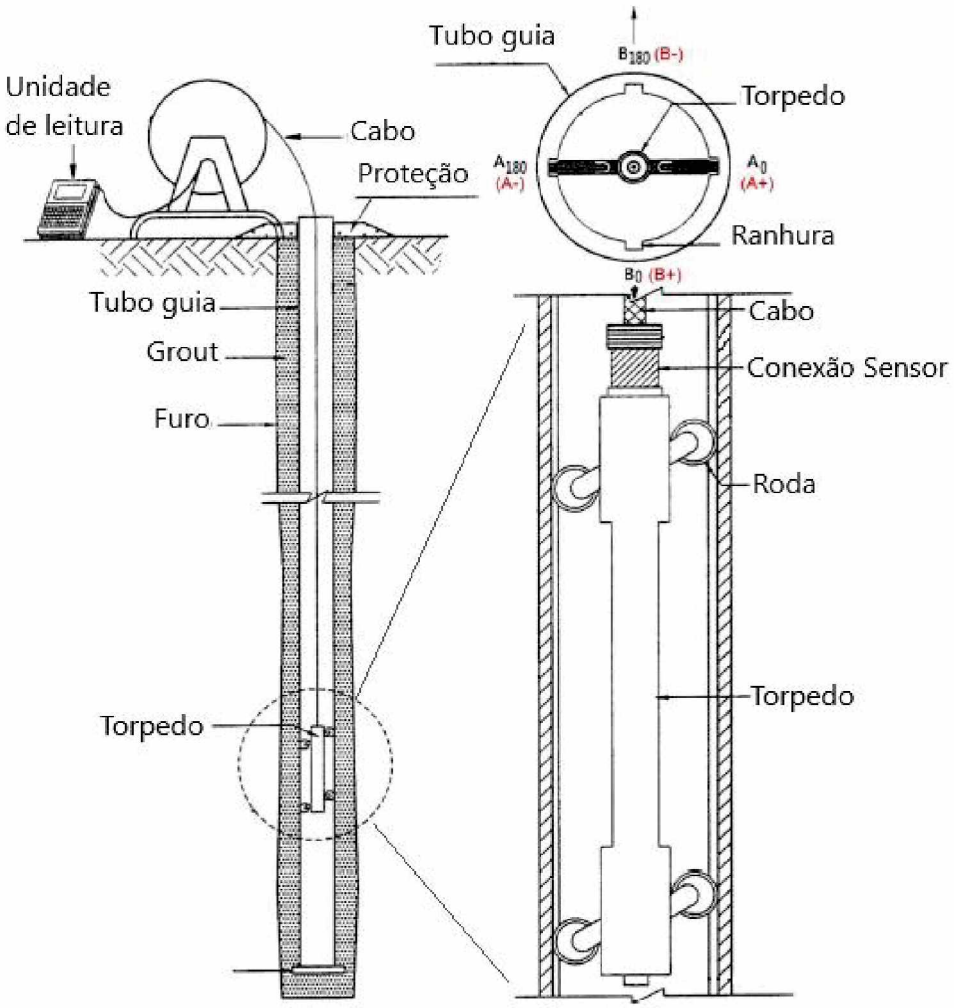
O tubo guia possui 4 ranhuras que formam dois eixos ortogonais, chamados de eixo A e eixo B. O eixo A normalmente é atribuído para representar a direção do principal movimento e o eixo B representa um deslocamento lateral. A resultante dos deslocamentos nestas duas direções representa a direção real do deslocamento.

Os inclinômetros podem ser uniaxiais ou biaxiais. Nos uniaxiais existe apenas um acelerômetro e são necessárias quatro manobras de inserção e remoção do torpedo dentro do tubo guia. No caso dos biaxiais existem dois acelerômetros capazes de fazer leituras transversais e desta forma permitindo que sejam feitas as leituras com apenas duas manobras de inserção e remoção do torpedo.

Para cada eixo devem ser feitas duas leituras, 0° e 180°, onde 0° indica o sentido esperado do deslocamento e 180° indica o sentido oposto.

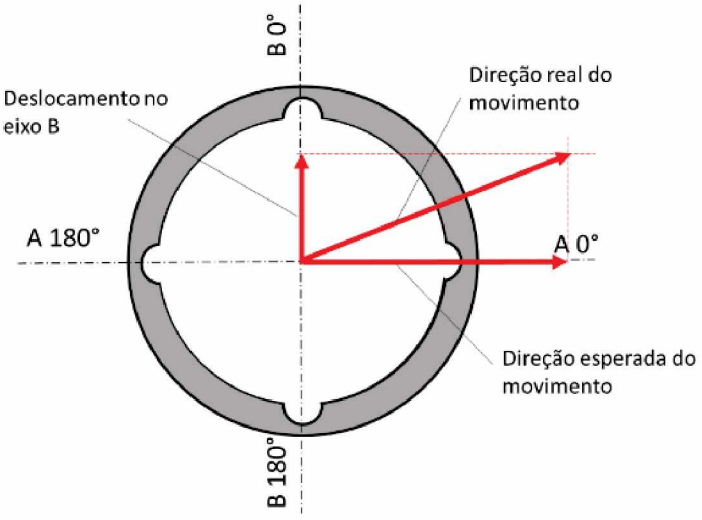
As Figuras 21 e 22 apresentam esquemas de um inclinômetro.

FIGURA 21 - ESQUEMA DE UM INCLINÔMETRO



FONTE: Adaptado de Jeng et al. (2017)

FIGURA 22 - SEÇÃO DO TUBO GUIA

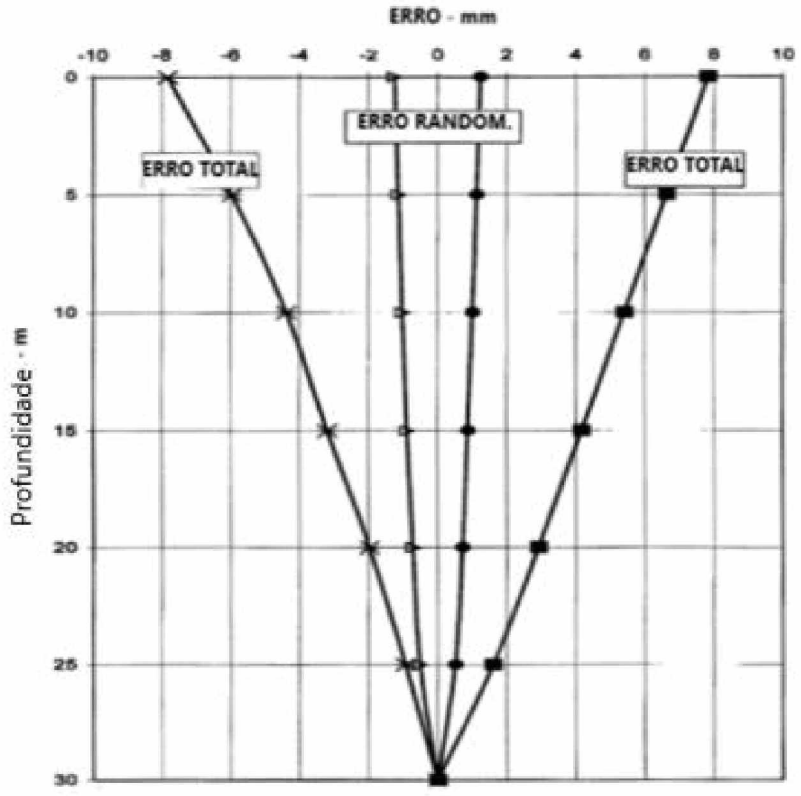


FONTE: O autor.

As leituras dos inclinômetros possuem erros e estes podem ser divididos em erros randômicos e erros sistemáticos. Os erros randômicos são constantes e inerentes ao instrumento. Podem ser minimizados com a execução de várias leituras e a utilização das médias das leituras. Os erros sistemáticos são acumulativos e podem ter várias origens, como uma inversão de polaridade, desvio de sensibilidade, rotação dos eixos e profundidade do tubo guia (DUNNICLIF, 1988; MIKKELSEN, 2003; CORNFORTH, 2005).

Mikkelsen (2003), baseado em uma vasta coleção de dados, sugere que o erro total de um inclinômetro seja aproximadamente 7,8 mm para 30 m de comprimento de tubo guia. A Figura 23 apresenta os erros em um inclinômetro, onde os erros randômicos seriam responsáveis por 1,2 mm e os sistemáticos por 0,11 mm por intervalo de leitura (50cm) ou 6,6mm para 30m.

FIGURA 23 - ERROS EM UM INCLINÔMETRO



FONTE: Adaptado de Mikkelsen (2003)

O erro randômico está associado à leitura "não-zero" que seria uma leitura registrada pelo instrumento, mesmo sem a inclinação do acelerômetro. A diferença algébrica de leituras opostas, ou seja, uma no sentido 0° e outra no sentido 180°,

elimina o valor "não zero". Esse procedimento é chamado de *Checksum.* A resultante desta operação indica a ocorrência de erros de inversão de polaridade que são minimizados ao se usar a média entre as leituras inversas. O desvio padrão das *checksum* que é tolerado para uma série de dados é de 8 unidades de medida para o eixo A e 16 unidades de leitura para o eixo B, podendo ser o dobro desses valores (MIKKELSEN, 2003). Cornforth (2005) sugere um valor de 10 unidades de leitura para o eixo A e 20 para o eixo B.

Simeoni e Mongiovi (2007) analisam estatisticamente uma série de dados de leituras de um monitoramento de uma encosta na Italia e concluem que a adoção do desvio padrão das *checksum* como a acurácia das leituras é uma boa prática.

Os erros devidos ao desvio de sensibilidade são intrínsecos ao instrumento e podem ser minimizados com a calibração deste.

Erros de rotação (quando há uma rotação dos eixos do tubo guia) são mais evidentes em inclinômetros instalados inclinados. Jeng et al. (2017) instalam um tubo guia com 12 m de altura numa escadaria e impõem uma rotação de 30° no topo do inclinômetro gerando um erro de 3 mm (0,075 a 0,085 mm/grau de rotação).

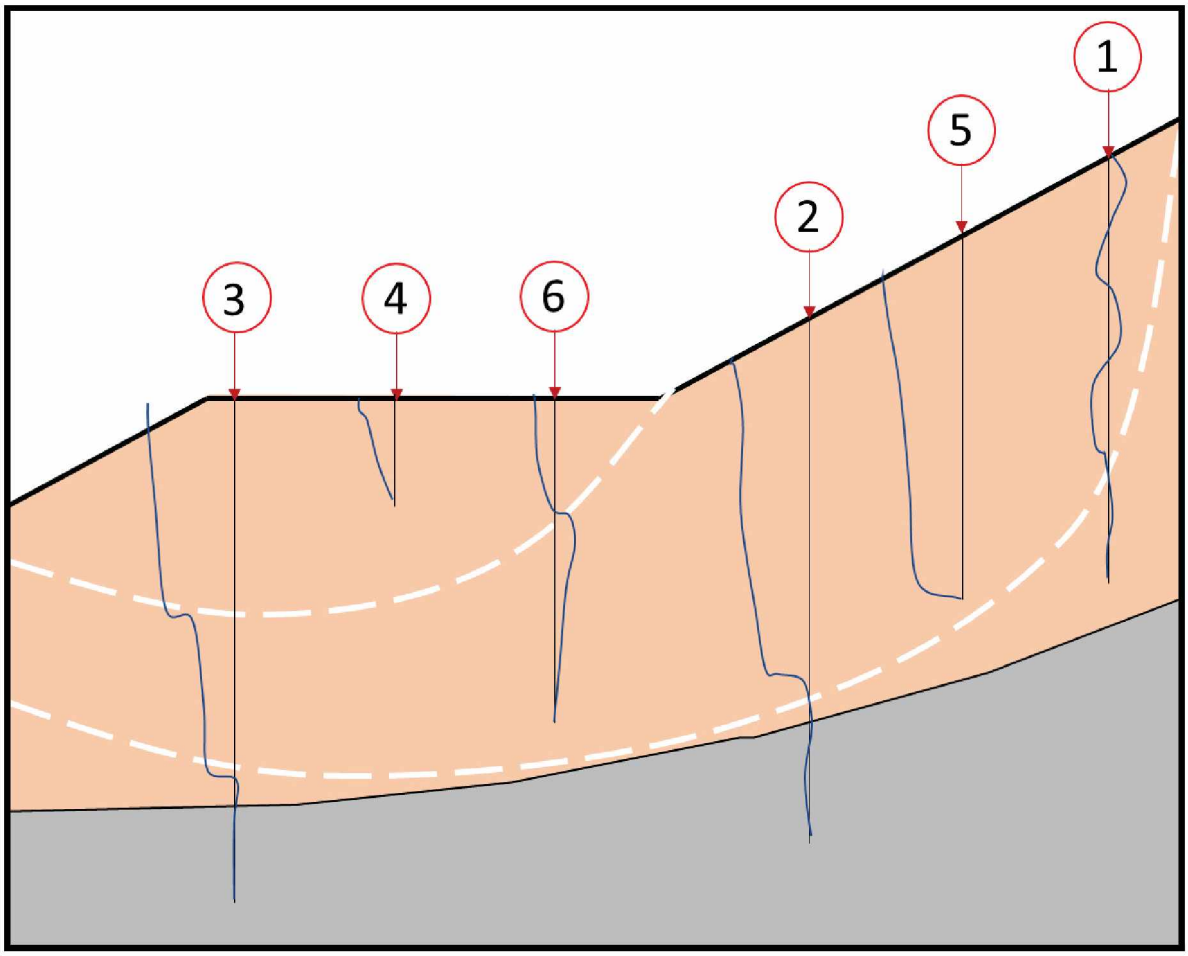
Erros devido a profundidade, que podem ser em função do assentamento do tubo são mais difíceis de corrigir.

Os erros espirais, que são devido a rotações entre os eixos do tubo, porém oriundos do próprio processo de fabricação do tubo guia podem acontecer e tem uma tolerância de 0,4° para cada 3 m (JENG et al., 2017). Mikkelsen (2003) sugere essa rotação pode chegar a 5° para 30 m e que devem ser especialmente observados para profundidades superiores a 60 m.

A correta plotagem dos gráficos e a sua interpretação são importantes para o entendimento dos fenômenos que estão gerando o movimento, como também para a indicação de erros relacionados a instalação dos inclinômetros. Cornforth (2005) destaca que a escolha de uma escala adequada para a plotagem dos gráficos é importante, pois uma escala exagerada pode induzir ao entendimento de que há um movimento, quando não há. Esse mesmo autor sugere escalas de 1/1 na horizontal e 1/12 na vertical.

Jeng et al. (2017) analisam dados de leituras de cerca de 40 inclinômetros instalados no campus de uma universidade em Taiwan. Identificam e descrevem várias formas de gráficos de leituras destes instrumentos. A Figura 24 apresenta uma síntese dos tipos de gráficos.

FIGURA 24 - PRINCIPAIS FORMAS DE GRÁFICOS DE LEITURAS DE INCLINÔMETROS



FONTE: O autor.

Os perfis de 1 a 6 indicados na Figura 24 têm as seguintes interpretações:

Perfil 1: Curva em forma de “S” – Indica que o tubo guia está sendo comprimido em função de um atrito negativo imposto ao tubo pelo assentamento do solo ao redor. Em taludes isso tende a acontecer nos instrumentos posicionados próximos a crista do movimento

Perfil 2: Plano único de cisalhamento – Quando o inclinômetro é instalado na posição correta e sem vícios na instalação e há a formação de uma superfície de deslizamento, esta fica evidente nos gráficos em função de acentuado deslocamento indicado em determinada profundidade.

Perfil 3: Múltiplas superfícies – Da mesma forma, quando inclinômetro é instalado de forma correta e com a profundidade adequada é possível identificar mais de uma superfície de ruptura.

Perfil 4: Forma de balanço – Quando o inclinômetro gira por inteiro, seja quando é instalado junto à alguma estrutura que sofre este movimento ou quando a profundidade do inclinômetro é insuficiente e a base do tubo fica distante da superfície de ruptura.

Perfil 5: Grande deslocamento na ponta do tubo indica que há uma superfície de ruptura imediatamente abaixo.

Perfil 6: Deslocamento negativo – Na forma de balanço quando a tubo guia gira totalmente ou quando existem mais de uma superfície de ruptura, onde a mais rasa interceptada pelo instrumento tem deslocamento maior que a segunda que fica abaixo a ponta do tubo.

2.4 HISTÓRICO DAS PESQUISAS NO MORRO DO BOI

Nesta seção faz-se um breve relato das principais publicações a respeito do Morro do Boi.

Dentro deste projeto de pesquisa a primeira publicação foi a de Sestrem (2012), onde a autora descreveu a encosta do morro do boi, bem como o projeto de instrumentação, detalhes de sua instalação e as primeiras leituras.

Lazarim (2012) realiza ensaios de caracterização geotécnica do solo coluvionar e Lazarim (2012) e Sestrem et al. (2012) apresentam retro análises para estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Gonzalez (2013) apresenta a primeira análise de dados com período maior de leituras. Através de tratamento estatístico correlaciona os dados dos instrumentos e faz as primeiras análises de correlações e tendências.

Pretto et al. (2013) e Pretto (2014) apresentam as curvas de retenção de água no solo para a camada coluvionar do Morro do Boi, assim como resultados de ensaio de permeâmetro de mini disco e sugerem um intervalo de valores de coeficiente de permeabilidade saturada para esta camada.

Pretto et al. (2014) e Pretto (2014) apresentam os ensaios geofísicos realizados na encosta do morro do boi. Destacam que foi utilizado o método ativo ou de indução eletro-resistivo com a utilização de 3 sondagens elétricas verticais e 6 caminhamentos elétricos. Com os levantamentos geofísicos foi possível identificar as interfaces entre as camadas de solo, rocha alterada e rocha sã, além de matacões e as fraturas nas camadas de rocha alterada e sã. Com isso e juntamente com as

sondagens mistas foi possível construir um perfil geológico geotécnico bastante confiável.

Joly et al. (2014) destacam o efeito da evapotranspiração sobre ao acréscimo nos valores de sucção na zona vadosa. Os autores apresentam uma equação empírica proposta por Allen et al. (1998) que calcula o potencial de evapotranspiração (PET) em função de dados climatológicos, que segundo os autores podem ser obtidos em estações meteorológicas. Eles usam essa equação e calculam o potencial de evapotranspiração para um período entre 6 de junho de 2013 a 31 de julho de 2014 e comparam com os valores de sucção medidos no tensiômetro 03 que está a 0,5 m de profundidade. Observam que há uma tendência de recuperação da sucção depois que um evento de chuva cessa. Desta forma avaliam a variação da sucção 3 dias após o término de um evento de chuva para 10 eventos específicos. Fazem a mesma coisa para os valores de potencial de evapotranspiração e concluem que há uma relação entre o PET e o incremento nos valores da sucção.

Sestrem et al. (2015) apresentam uma descrição da área de estudo e do plano de instrumentação e apresentam resultados das leituras de precipitação, poro pressão, sucção e nível d'água. Fazem uma análise das precipitações, onde observam a falta de uma tendência clara e registram discrepâncias grandes entre os registros de um mês nos dois anos analisados. Avaliam que há uma sazonalidade com maiores acúmulos no verão e menores no inverno. Com relação a poro pressão destacam a pouca relação com as precipitações diárias, mas sugerem uma melhor correlação com as precipitações acumuladas em 3 dias. Observam que há uma maior variação para precipitações superiores a 20 mm. O intervalado de variação das poro pressões também é pequeno, atingindo no máximo 11 kPa. Observam também que a incoerência nas leituras pode estar associada ao fato de que o nível freático medido nos furos dos inclinômetros e do furo de sondagem SM-04 estão na maioria das leituras abaixo dos piezômetros. Para os piezômetros instalados abaixo do nível do lençol freático, os autores afirmam serem bastante sensíveis a chuvas diárias com precipitação superiores a 60 mm. Com relação à sucção os autores também sugerem não haver uma relação direta com a precipitação diária, mas sugerem uma melhor relação com o acumulado de 3 dias. Observam que a variação da sucção é de cerca de 10 kPa para os instrumentos mais profundos e chegou até cerca de 80 kPa para os instrumentos mais rasos. Destacam que as variações raramente ultrapassam um possível perfil hidrostático e que possuem seus maiores valores no inverno e menores

valores no verão, inversamente proporcional aos acumulados de chuva nestes períodos. Observam também que para cumulados de 3 dias com valores abaixo de 100 mm possuem registros de sucção mais altos, acima dos 20 kPa. Também observam uma diferença na variação das leituras entre instrumentos locados em posições com tipos de vegetação diferentes. Alegam também uma diferença na sensibilidade das leituras atreladas ao crescimento da vegetação.

Gonzalez et al. (2017) apresentam as características e a instrumentação realizada no Morro do Boi com detalhes acerca dos equipamentos utilizados, sua preparação e instalação em campo. Apresentam um resumo da caracterização geotécnica até o momento, e caracterizam o material coluvionar como uma areia siltosa com mais de 60% de areia e cerca de 27% de silte. Sintetizam os resultados apresentados por Lazarim (2012) e Pretto (2014) e sugerem valores para peso específico natural de 16,2 kN/m^3, permeabilidade entre 4,47 x 10^-7 e 1,71x10^-6, intercepto coesivo médio de 2 kPa e ângulo de atrito médio de 34º. Analisam as leituras no período de maio de 2012 a março de 2013. Classificam as chuvas de acordo com os critérios da Ciram, aplicando o método dos quantis (Xavier e Xavier, 1987), que vão de uma chuva classificada como dia seco (< 0,2 mm/dia) até uma chuva violenta (45,6 mm/dia).Classificam os eventos de acordo com a técnica dos quantis, onde é observado que quase metade dos eventos, (44,11%) são classificados como dias secos, caracterizando o período como de pouca incidência de chuvas. Os autores também dividem o intervalo das leituras em 3 períodos, sendo os primeiros de maio a julho, o segundo de agosto a novembro e o último de dezembro a fevereiro. O primeiro foi caracterizado como chuvas moderadas e pesadas, o segundo com chuvas moderadas e o terceiro com chuvas pesadas. Observam a variação do nível d'água através das leituras feitas nos furos dos inclinômetros e constatam uma variação, especialmente no primeiro período. Sugerem que há um efeito de *runoff*, para chuvas com intensidade superiores ao coeficiente de permeabilidade, indicando que chuvas a partir de moderadas devem gerar *runoff*. Observam que há uma pequena variação nas leituras dos piezômetros, mesmo que bem relacionada às precipitações, destacando que os instrumentos mais profundos são os que apresentam maior sensibilidade e atribuem isso a variação do nível d'água. Já no caso dos tensiômetros, os instrumentos mais rasos são os mais sensíveis e aqueles na ilha inferior apresentam as maiores variações. Com relação as inclinômetros os

deslocamentos máximos foram de 2 mm, o que é desprezível e não caracteriza um fenômeno de *creep*, segundo Cruden e Varnes (1993).

Sestrem et al. (2018) apresentam uma análise dos dados do morro do boi com um intervalo de leituras maior, até 2015, onde apresentam possível relações entre a variação da sucção e as precipitações. Novamente afirmam que a melhor comparação é com dados acumulados de chuva de 3 dias. Destacam que para acumulados de 3 dias de chuva menores que 100 mm representam sucções superiores a 10 kPa, chegando a 80 kPa e para precipitações acumuladas em 3 dias superiores a 100 mm, a grande maioria das leituras fica abaixo dos 10 kPa de sucção. O Maior intervalo de leituras, agora com quase 3 anos mostrou uma falta de tendência ou padrão no comportamento pluviométrico da região com grande variação para o mesmo período nos 3 anos diferentes. Os autores também fazem uma comparação da variação da sucção com a varação nas leituras das células de carga, onde constatam que quando há um acréscimo na sucção há um decréscimo na leitura das células de carga.

Ferreira et al. (2018) analisam dois eventos pluviométricos extremos nos dias 25 de março de 2016 e dia 13 de abril de 2016, com acumulados de 240 mm e 190 mm respectivamente. Analisam as variações nas leituras de poro pressão, sucção e de deslocamentos horizontais com base na instrumentação instalada no morro do boi desde 2012. Observam os dados de chuva por mês ao longo de 6 anos e confirmam a falta de tendência clara no regime pluviométrico da região, apesar de conseguirem identificar dois períodos distintos: Mais chuvoso entre fevereiro e abril e setembro e novembro e menos chuvoso entre maio e agosto. Observam que os instrumentos foram sensíveis à estas ocorrências, mas que há um atraso na percepção do instrumento quando o evento não é precedido por períodos chuvosos. Neste caso, o segundo evento foi precedido de um acumulado em 7 dias de cerca de 100 mm, o que ocasionou uma variação praticamente imediata nas leituras dos piezômetros e dos tensiômetros. Já na primeira ocorrência com uma precipitação anterior inferior a 40mm, houve um atraso de alguns dias para a resposta dos instrumentos. Pode-se observar também que as variações foram pequenas, na casa dos 4 kPa de poro pressão e 5 kPa de sucção. Os autores observaram também os deslocamentos horizontais, que também foram pequenos, com deslocamento máximo de cerca de 2 mm. Por outro lado, observaram um acumulado de deslocamento no sentido transversal ao talude da ordem de 7 mm acima dos 5 m de profundidade. Por fim concluem que devido ao fato destas ocorrências terem causado escorregamentos em

taludes próximos ao sítio, os pequenos deslocamentos atestam que o sistema de estabilização está cumprindo seu papel.

Salah et al. (2019) apresentam uma proposta para predição de ocorrências de deslizamentos baseado na análise das precipitações anteriores aos eventos. Usam dados de 6 anos de registro pluviométrico do Morro do Boi e cruzam com 16 registros de escorregamentos naquela área. Identificam por exemplo que as datas destas ocorrências coincidem com meses de maior acúmulo de chuva ou com meses com maior máxima diária. Observam que as ocorrências foram registradas em meses com acumulados superiores a 250 mm. Utilizam um conceito de limiares pluviométricos e organizam os dados de precipitação em quantis. Definiram quantis para chuvas de 1 dia e de 3 dias acumulados. Adaptando a divisão em quartis feita por Disconzi et al. (2016), onde dividia as precipitações em Muito Seco, Seco (Q5), Normal (Q25), Chuvoso (Q50) e Muito Chuvoso (Q75), acrescentam mais três categorias, Excessivamente chuvoso, Extremo1 e Extremo 2 com quantis Q(95), Q(97,5) e Q(99), respectivamente. Ao plotarem dados dos dias com registros superiores a 2 mm de chuva no gráfico dos limiares, identificaram 2 na zona de alto risco, onde houve registro de escorregamentos. Em relação aos quantis, pode-se observar que todos os registros de escorregamentos ocorrem para chuvas em quantis superiores à Q75. Mas o intervalo onde todos os eventos tiveram registro de ocorrências foram para chuvas com baixíssima probabilidade de ocorrência situadas nos quantis Q(99).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a descrição do local, incluindo suas características geométricas e geológico-geotécnicas e a metodologia usada neste trabalho.

Com base nos trabalhos anteriores, são sintetizados aqui os principais dados já obtidos, que caracterizam o solo local, e são apresentadas as observações e conclusões dos autores quanto as variações das principais grandezas monitoradas pela instrumentação.

3.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL

O local de estudo é um talude às margens da BR-101 na pista sul do km 140+700 localizado na cidade de Balneário Camboriú/SC (Figura 25), entre as coordenadas S 27º 01' 30" e S 27º 02' 30" e O 48º 35' 30" e O 48º 36' 30". Estre trecho da rodovia fica entre as cidades de Balneário Camboriú e Itapema (Figura 26).

FIGURA 25 - LOCALIZAÇÃO DO MORRO DO BOI



FONTE: O autor.

Trata-se de uma encosta natural, pertencente a Serra do Mar, caracterizada pela ocorrência de camadas coluvionares sobre camadas residuais e um leito rochoso.

FIGURA 26 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE



FONTE: Sestrem (2012)

A região caracteriza-se também pelo registro de diversas ocorrências de escorregamentos, sendo a principal delas em 2008, o que ocasionou a interdição da pista e motivou a intervenção com obras de estabilização (SESTREM, 2012; LAZARIM, 2012; SANTOS, 2012; PRETTO, 2014).

Em 2010 foi elaborado um projeto para implantação de uma estrutura de contenção objetivando promover a estabilização do talude. A solução adotada foi um grampeamento do solo coluvionar nas camadas rochosas e a construção de uma viga robusta de concreto apoiada em estacas-raiz (SESTREM, 2012).

Este trecho já foi objeto de descrições detalhadas por diversos autores (SESTREM, 2012; GONZÁLEZ, 2013; PRETTO, 2014).

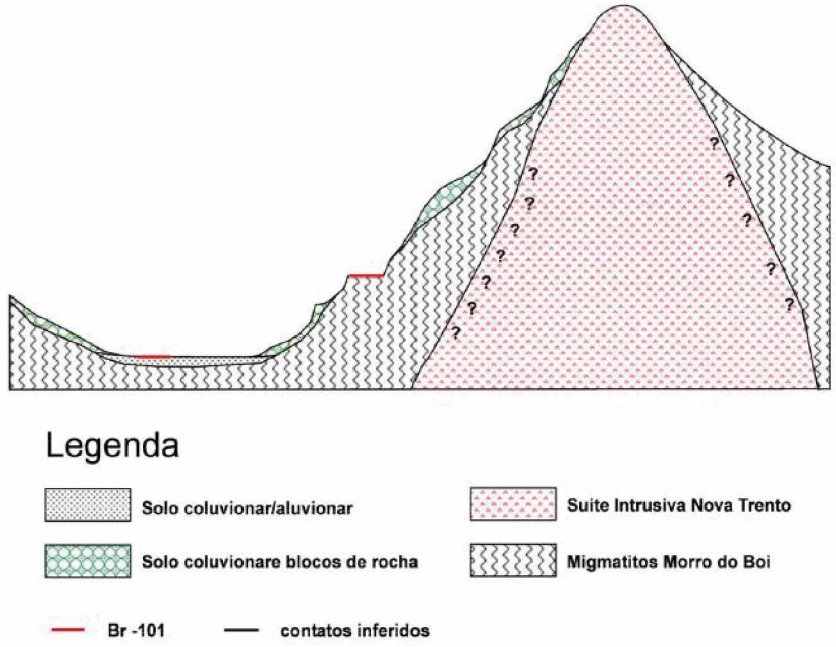
3.1.1 Formação geológica

O maciço do Morro do boi é uma formação pertencente à Serra do Mar catarinense composta por dois tipos de rocha. O migmatito Morro do Boi e o granito da suíte intrusiva Nova Trento, alinhada na direção NE-SW (FIORI, 2011 apud SESTREM, 2012).

O migmatito Morro do Boi com cerca de 2.000 Ma de idade, apesar de resistente e pouco fraturado quando fresco é afetado por zonas de cisalhamento na direção NE-SW e NW-SE e por fratura sub-horizontais, que dividem o maciço em blocos reduzindo sua resistência a facilitando o fluxo pela conexão entre as fraturas.

O granito da suíte intrusiva Nova Trento com cerca de 595 Ma de idade, também apresenta boa resistência e pouco faturamento quando fresco, mas divide com o migmatito a influência da mesma zona de cisalhamento NE-SW e NW-SE e as fraturas sub-horizontais (FIORI, 2011 *apud* SESTREM, 2012). O que sugere que os esforços que geraram estes sistemas de fraturas ocorreram após a intrusão (GONZÁLEZ, 2013). A Figura 27 apresenta um esquema da formação geológica do Morro do Boi.

FIGURA 27 - SEÇÃO ESQUEMÁTICA DO KM 140+700 DA BR-101



FONTE: Fiori (2011)

Existem 4 sistemas de fraturas que foram identificados por Fiori (2011, *apud* SESTREM, 2012), sendo o mais frequente, o sistema NE-SW, caracterizado pelas fraturas de cisalhamento verticais e sub-verticais na direção NE-SW. Neste sistema há presença de água seja pela identificação de umidade, gotejamento e até fluxo. Há ainda a presença de filmes de argila e de rocha alterada nas fraturas, podendo chegar à espessura de 5cm. Outro sistema relevante é o sistema de fraturas por alívio de pressão que ocorre nas porções mais superficiais do maciço.

Associado a estes dois sistemas ainda há o sistema NW-SE, menos frequente e com fraturas mais fechadas, o sistema NW-SE de baixos mergulhos para nordeste e o sistema de ruptura disposto paralelamente a estruturação metamórfica da rocha,

com planos relativamente espaçados. As interseções destes vários planos de fraturas geram blocos prismáticos irregulares de tamanhos e formas variadas que podem ficar em condições instáveis favorecendo tombamentos, ou ainda escorregamentos translacionais ao longo de uma superfície planar na direção do mergulho ou em cunha ao longo de dois planos que se intersectam. (SESTREM, 2012)

O maciço do Morro do Boi ainda se caracteriza, assim como várias encostas em regiões da Serra do Mar, pela ocorrência de uma camada de solo coluvionar com espessura média de 2m, porém irregularmente distribuída.

O perfil freático é irregularmente distribuído devido principalmente às fraturas, em especial às fraturas de alívio de pressão.

3.1.2 Perfil geológico-geotécnico

Para a elaboração de um perfil geológico geotécnico, Sestrem (2012) descreve a execução de sondagens mistas, que obtiveram a resistência a penetração das camadas de solo, o grau de faturamento das camadas de rocha e definiram as espessuras destas camadas. Pretto (2014) descreve a realização de um levantamento geofísico.

Sestrem (2012) descreve que foram realizadas duas campanhas de sondagem, onde na primeira foram realizados apenas três furos a percussão. Posteriormente foram realizadas cinco sondagens mistas onde foram identificadas uma camada de solo com espessura média de 6m na região fora do rompimento e de 3m na região do rompimento. Foram também identificados níveis de água variando entre 3,7m e 6,7m de profundidade.

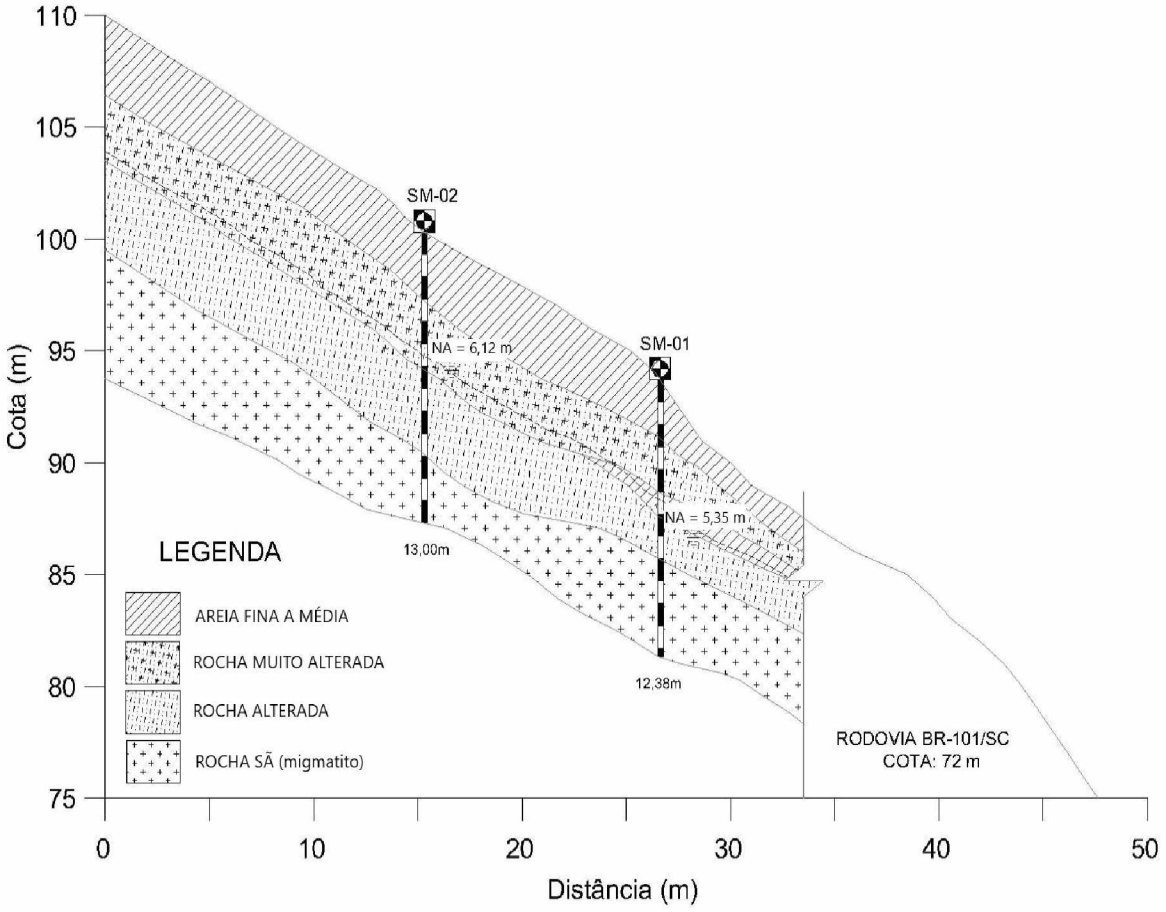
Os perfis gerados por estas campanhas de sondagem indicavam a presenta de material argiloso, porém posteriormente com as campanhas de coletas de amostras descritas por Lazarim (2012) e Lazarim et al. (2014) o material é caracterizado como areia siltosa. O perfil geológico-geotécnico adotado é apresentado na Figura 28.

O levantamento geofísico foi feito através de seis caminhamentos elétricos CE-1 a CE-6, sendo o último paralelo as curvas de nível da encosta nas proximidades do pé da encosta e os demais, perpendiculares às curvas de nível e afastados em 10m. Os caminhamentos perpendiculares tiveram cerca de 200m de extensão, e o caminhamento paralelo teve um comprimento de 110m (TECGEOFISICA, 2012).

Também foram realizadas 3 sondagens elétricas verticais (SEV) com o objetivo de se conhecer as espessuras dos estratos geoelétricos.

O levantamento geofísico foi realizado numa área muito mais abrangente do que o talude em si, adentrando encosta acima cor cerca de 200m. Apesar da diferença de escala entre os perfis geofísico e o perfil geológico-geotécnico obtido pelas sondagens, e do fato que há uma ausência do imageamento elétrico nos dez primeiros metros do pé da encosta, pode-se afirmar que as interpretações até o momento são bastante coerentes, desde a descrição geológica até a geofísica. Todos identificaram uma camada de solo coluvionar, sobre uma camada de rocha alterada ou de alteração de rocha e um leito rochoso com sistemas de fraturas verticais e horizontais.

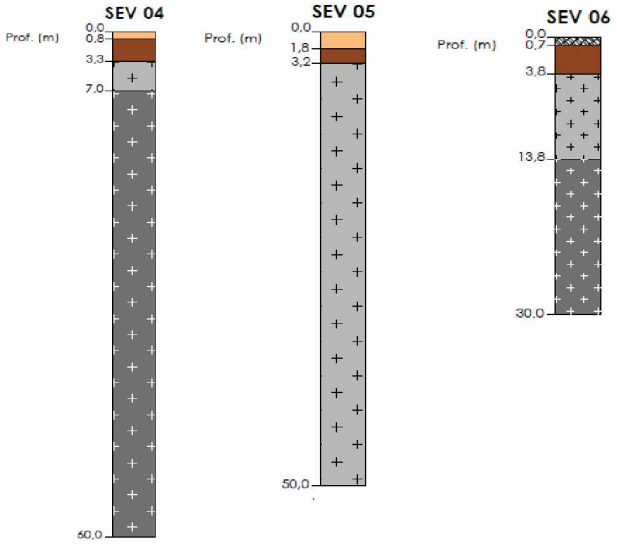
FIGURA 28 - PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO



FONTE: Adaptado de Sestrem et al. (2015)

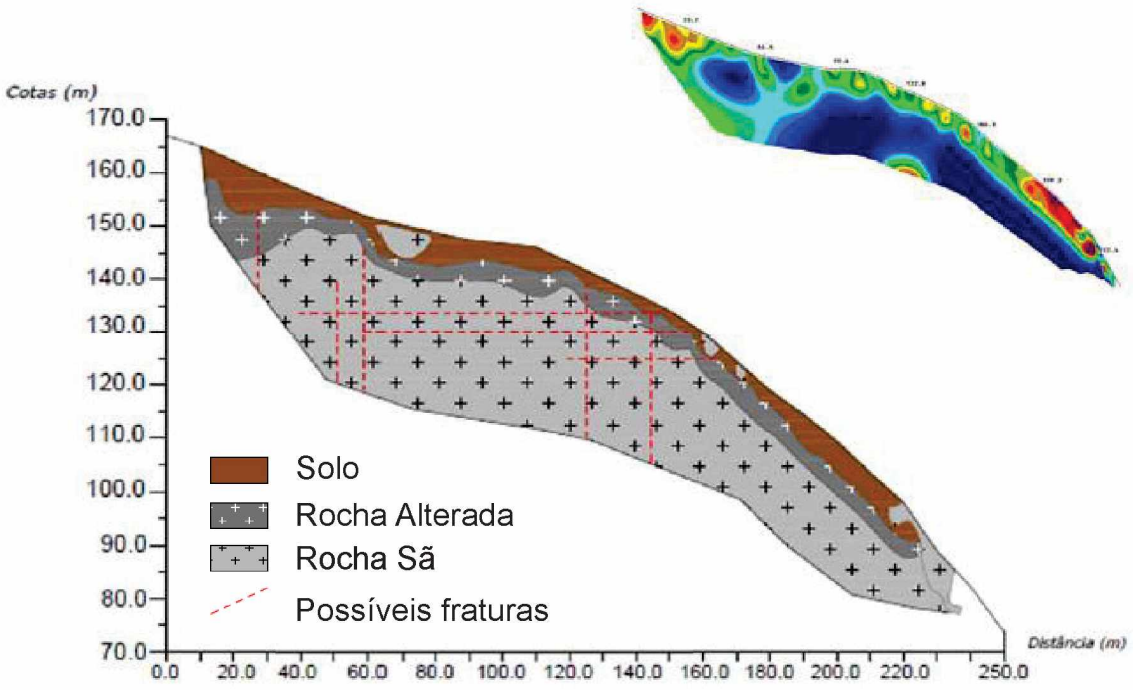
A Figura 29 apresenta os perfis das sondagens elétricas verticais e a Figura 30 mostra o perfil do caminhamento elétrico CE-3, que seria o da porção média da área.

FIGURA 29 - SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS - SEV



FONTE: Tecgeofisica (2012)

FIGURA 30 - IMAGEAMENTO ELÉTRICO E INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA



FONTE: Pretto (2014)

3.1.3 Caracterização geotécnica do solo coluvionar

Lazarim (2012) e Pretto (2014) fizeram campanhas de ensaios para caracterização geotécnica da camada coluvionar. Lazarim (2012) coletou 8 amostras,

sendo 4 indeformadas e 4 deformadas. Pretto (2014) coletou 19 amostras, incluindo outro trecho próximo, no km 140+950.

A TABELA 1 apresenta as profundidades de coleta das amostras indeformadas conforme apresentado por Lazarim (2012).

TABELA 1 - PROFUNDIDADES DAS AMOSTRAS

Amostra	Data da Coleta	Profundidade
Bloco 1	08/12/2011	0,25 a 0,55m
Bloco 2	09/12/2011	0,45 a 0,75m
Bloco 3	14/12/2011	0,58 a 0,85m
Bloco 4	15/12/2011	1,00 a 1,27m

FONTE: Lazarim (2012)

Das amostras deformadas foram obtidos os valores de densidade real dos grãos, limites de Atterberg e granulometria.

Na TABELA 2 são apresentados os valores obtidos para os limites de Atterberg e de densidade real dos grãos, conforme apresentado por Lazarim (2012).

TABELA 2 - LIMITES DE ATTERBERG E DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

Amostra	Limites de Atterberg			Massa Específica Real dos Grãos (g/cm³)
	LL(%)	LP(%)	IP(%)	
Bloco 1	32,2	26,6	5,6	2,610
Bloco 2	35,3	28,7	6,6	2,632
Bloco 3	28,4	25,3	3,1	2,694
Bloco 4	31,8	26,9	4,9	2,700
Média	31,9	26,9	5,0	2,660

FONTE: Lazarim (2012)

Pretto (2014) também apresenta valores determinados por ensaio e relações entre índices físicos para o peso específico dos grãos e peso específico natural, conforme pode ser observado na TABELA 3:

TABELA 3 - DENSIDADES DOS GRÃOS

Amostra	Massa Específica Real dos Grãos (g/cm³)	Amostra	Massa Específica Real dos Grãos (g/cm³)
1	2,62	15	2,49
2	2,65	16	2,64
3	2,62	17	2,62
4	2,57	18	2,70
8	2,65	19	2,42
9	2,58	20	2,73
10	2,58	21	2,72
11	2,43	22	2,70
12	2,60	23	2,56
13	2,57		

FONTE: Pretto (2014)

Na descrição de Lazarim (2012), os ensaios de granulometria classificaram as amostras como SM (Areia Siltosa) pelo Sistema Unificado de Classificação com mais de 60% de areia, 27% de silte, 4,3% de argila e outros 8% de fração pedregulhosa. Pretto (2014) não cita essa classificação, mas as frações de areia, argila, silte e pedregulho são muito parecidas com estas citadas por Lazarim (2012), conforme pode ser observado na Figura 31 e Figura 32.

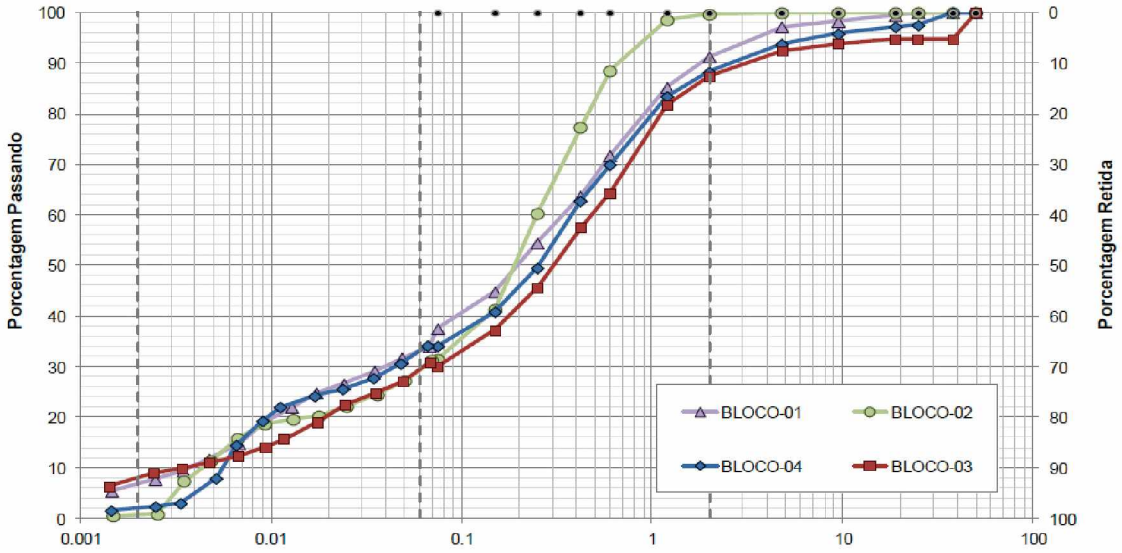
Lazarim (2012) realizou ensaios de cisalhamento para 4 níveis de tensão normal, 30, 60, 90 e 180 kPa., sendo que para a construção das envoltórias foram desconsiderados os resultados para 180kPa. As envoltórias são apresentadas na Figura 33.

O comportamento das amostras ao ensaio apresentou uma redução no volume, indicando uma característica de material de baixa compacidade, neste caso uma areia fofa.

A grande variação dos parâmetros obtidos pode ser um indicativo da grande heterogeneidade da camada coluvionar e ainda observada na grande variação de textura, cor e compacidade das amostras (Lazarim, 2012).

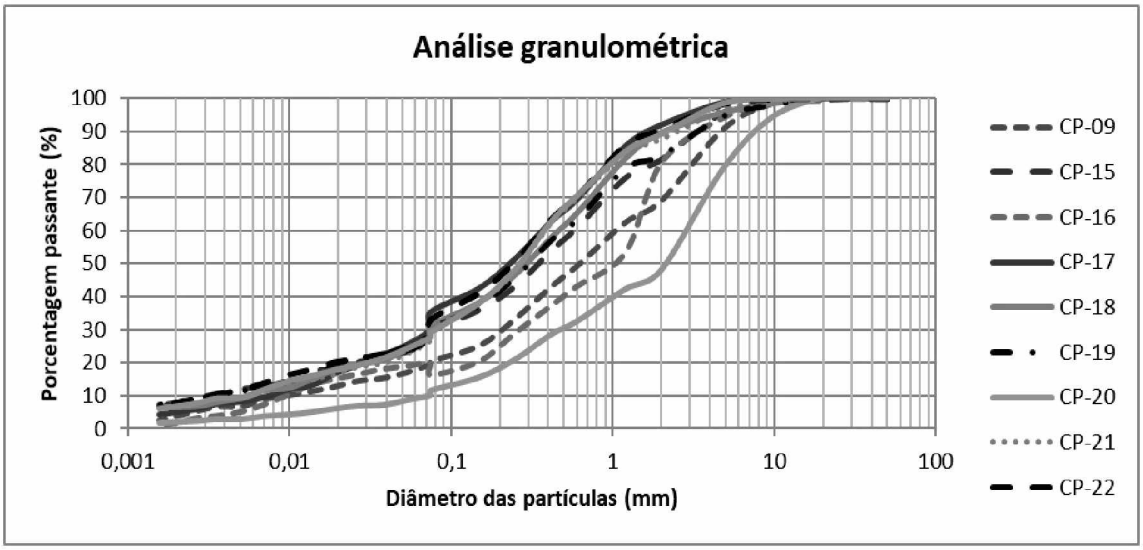
Na são apresentados os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por Lazarim (2012).

FIGURA 31 - CURVA GRANULOMÉTRICA



FONTE: Lazarim (2012)

FIGURA 32 - CURVA GRANULOMÉTRICA



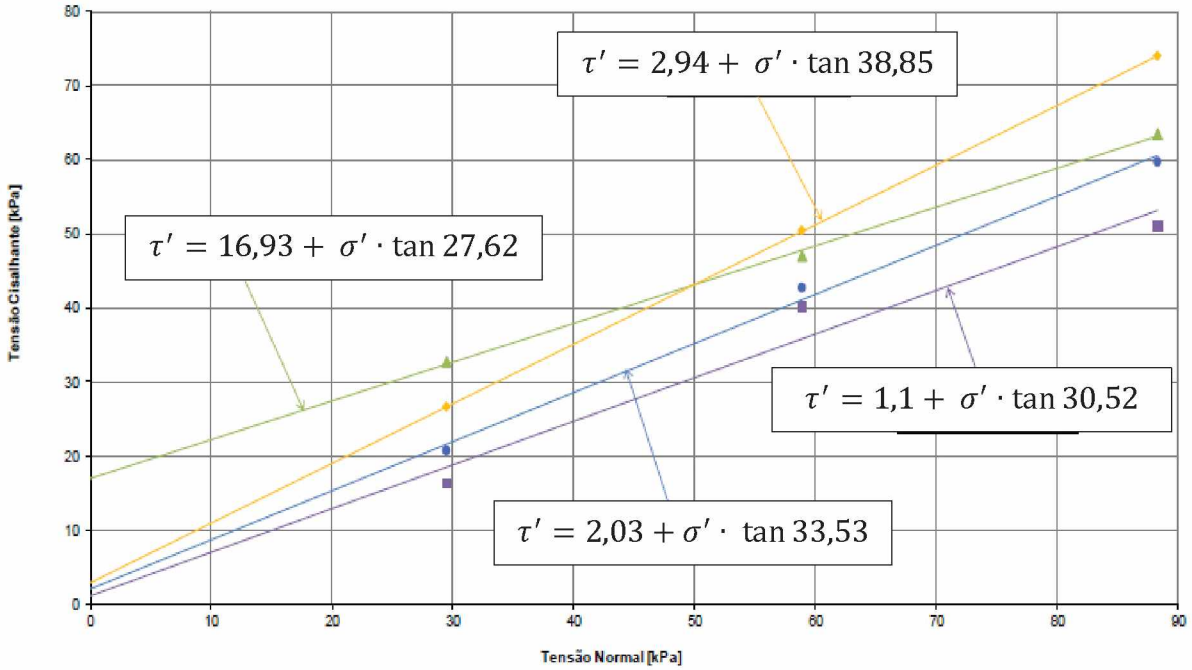
FONTE: Pretto et al. (2013)

TABELA 4 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Amostra	Intercepto Coesivo (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
Bloco 1	2,0	33,5
Bloco 2	16,9	27,6
Bloco 3	1,1	30,5
Bloco 4	2,9	38,8
Média	5,75	32,6

FONTE: Lazarim (2012)

FIGURA 33 - ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA



FONTE: Lazarim (2012)

Lazarim (2012) sugere através de uma retro-análise, que o valor do intercepto coesivo deva ser inferior à 2kPa e que o ângulo de atrito tenha valor entre 26° e 30°.

González et al. (2017) adotam na sua descrição da caracterização os valores médios de 2kPa para o intercepto coesivo e de 34° para o ângulo de atrito.

3.1.4 Curvas de retenção de água no solo (CRAS)

Como parte do programa de ensaios desenvolvidos por Pretto (2014), foram coletadas 10 amostras nos mesmos pontos das que foram usadas para a caracterização granulométrica. Foram realizados ensaios de papel filtro com o método de placa de sucção para sucções até 5 kPa e o método de placa de pressão para sucções de 5 a 100 kPa.

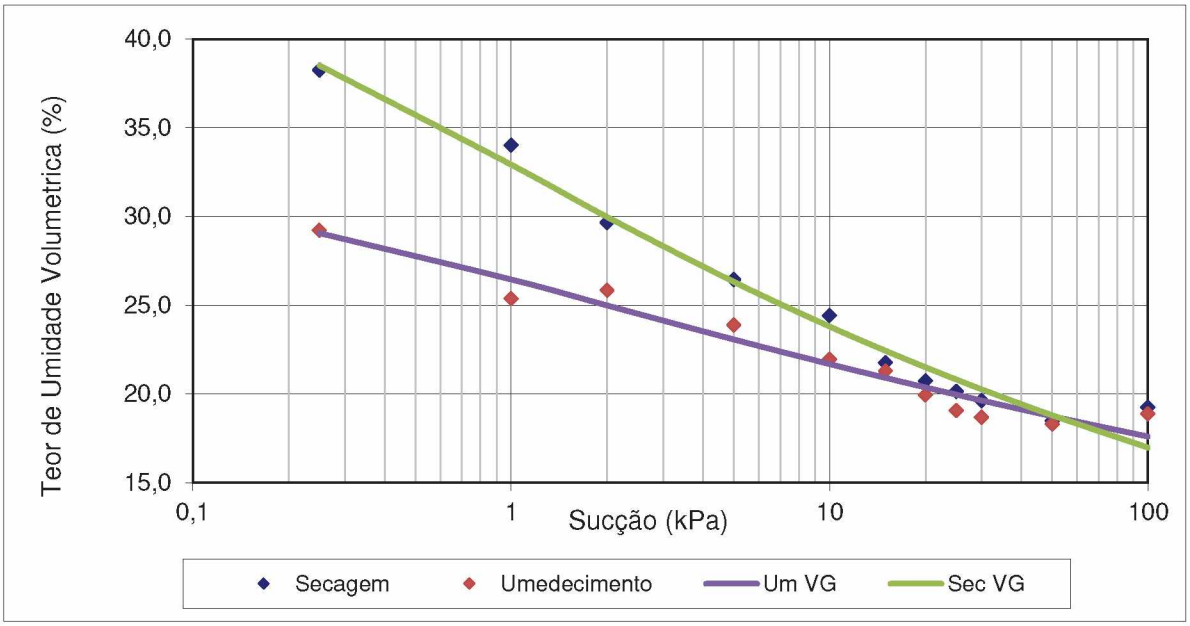
Foram traçadas curvas de retenção para trajetórias de umedecimento e secagem com ligeira histerese, como esperado e descrito na literatura. Na Figura 34 são mostrados os parâmetros de ajuste obtidos por Pretto (2014) e na Figura 35 a sobreposição dos dados dos ensaios e com a curva de Van Genutchen (1980) para uma das amostras:

FIGURA 34 - PARÂMETROS DE AJUSTE POR VAN GENUTCHEN (1980)

Corpo de prova	Ramo de Umedecimento				Ramo de Secagem			
	Θ_S	Θ_r	α (1/kPa)	n	Θ_S	Θ_r	α (1/kPa)	n
CP-09	0,322	0,000	13,673	1,075	0,402	0,000	2,705	1,133
CP-15	0,350	0,064	74,349	1,095	0,344	0,040	1,532	1,136
CP-16	0,350	0,000	986,345	1,031	0,461	0,000	95,839	1,068
CP-17	0,364	0,000	4,418	1,098	0,481	0,000	3,520	,160
CP-18	0,304	0,000	7,176	1,066	0,540	0,124	186,672	1,153
CP-19	0,313	0,000	5,561	1,091	0,435	0,000	5,993	1,147
CP-20	0,311	0,000	3,983	1,089	0,437	0,115	3,767	1,256
CP-21	0,531	0,207	91,385	1,466	0,478	0,000	12,420	1,130
CP-22	0,310	0,000	3,300	1,078	0,447	0,151	2,172	1,340
CP-23	0,283	0,000	2,448	1,087	0,402	0,108	1,725	1,294

FONTE: Pretto (2014)

FIGURA 35 - CRAS PARA O CP 19

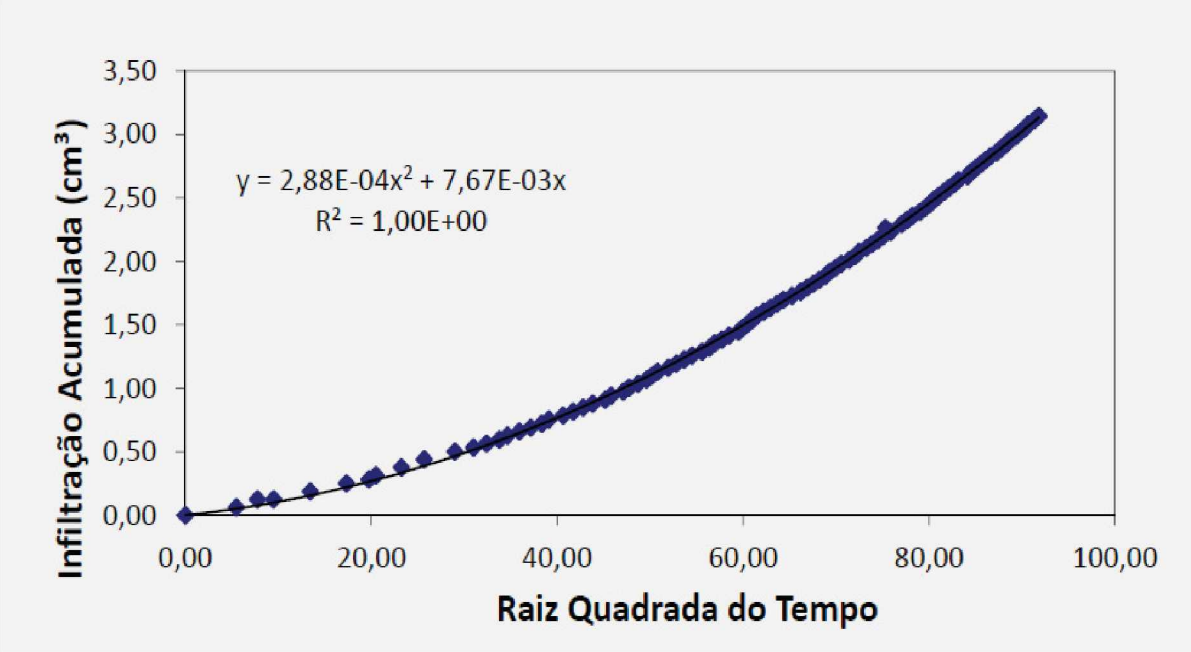


FONTE: O autor

3.1.5 Coeficiente de permeabilidade

Com a adoção da equação de Van Genutchen (1980) para o ajuste das curvas de retenção, Pretto (2012) obteve os parâmetros de ajuste usados nas equações de Zhang (1997) para obtenção da permeabilidade em conjunto com ensaio de permeabilidade in situ, cuja curva de infiltração é mostrada na FIGURA 36.

FIGURA 36 - CURVA DE INFILTRAÇÃO – DADOS DO ENSAIO DE INFILTRAÇÃO



FONTE: Pretto (2014)

Pretto (2014) descreve ensaios de permeabilidade *in situ* com o método do mini-disco, que foram realizadas nos mesmos pontos de coleta das amostras para determinação das curvas de retenção de água. Com os parâmetros de ajuste de Van Genutchen, Pretto (2014) obteve os valores de permeabilidade saturada.

Usando um tratamento estatístico, Pretto (2014) definiu um intervalo de confiança para os valores de permeabilidade das amostras obtidas conforme Quadro 3.

QUADRO 3 - INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA 95% DAS PERMEABILIDADES

Limite inferior	4,47 E-05 cm/s
Limite superior	1,71 E-04 cm/s

FONTE: Adaptado de Pretto (2014)

No QUADRO 4 apresenta-se um resumo dos dados de caracterização geotécnica obtidos até o momento para a camada coluvionar combinado resultados e dados dos trabalhos de Lazarim (2012), González (2013), Pretto (2014) e González et al. (2017).

QUADRO 4 - RESUMO DA CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Descrição	Valores	FONTE
Classificação (SUC)	Areia Siltosa	Lazarim (2012)
Densidade real dos grãos média (γ_s)	2,60 - 2,66g/cm³	Lazarim (2012); Pretto (2014)
Peso específico natural (γ)	1,53 a 1,77 kN/m³	Pretto (2014)
Limite de liquidez médio (LL)	31,9%	Lazarim (2012)
Limite de plasticidade Médio (LP)	26,9%	Lazarim (2012)
Índice de plasticidade Médio (IP)	5%	Lazarim (2012)
Intercepto Coesivo (c)	1,1 a 2 kPa	Lazarim (2012); González (2013); Preto (2014); González et al. (2017)
Ângulo de atrito interno (Φ)	26 a 34°	Lazarim (2012); González et al. (2017)
Condutividade Hidráulica (k_{sat})	4,47 x10^{-5} a 1,71x10^{-4} cm/s	Pretto (2014)

FONTE: O autor

3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

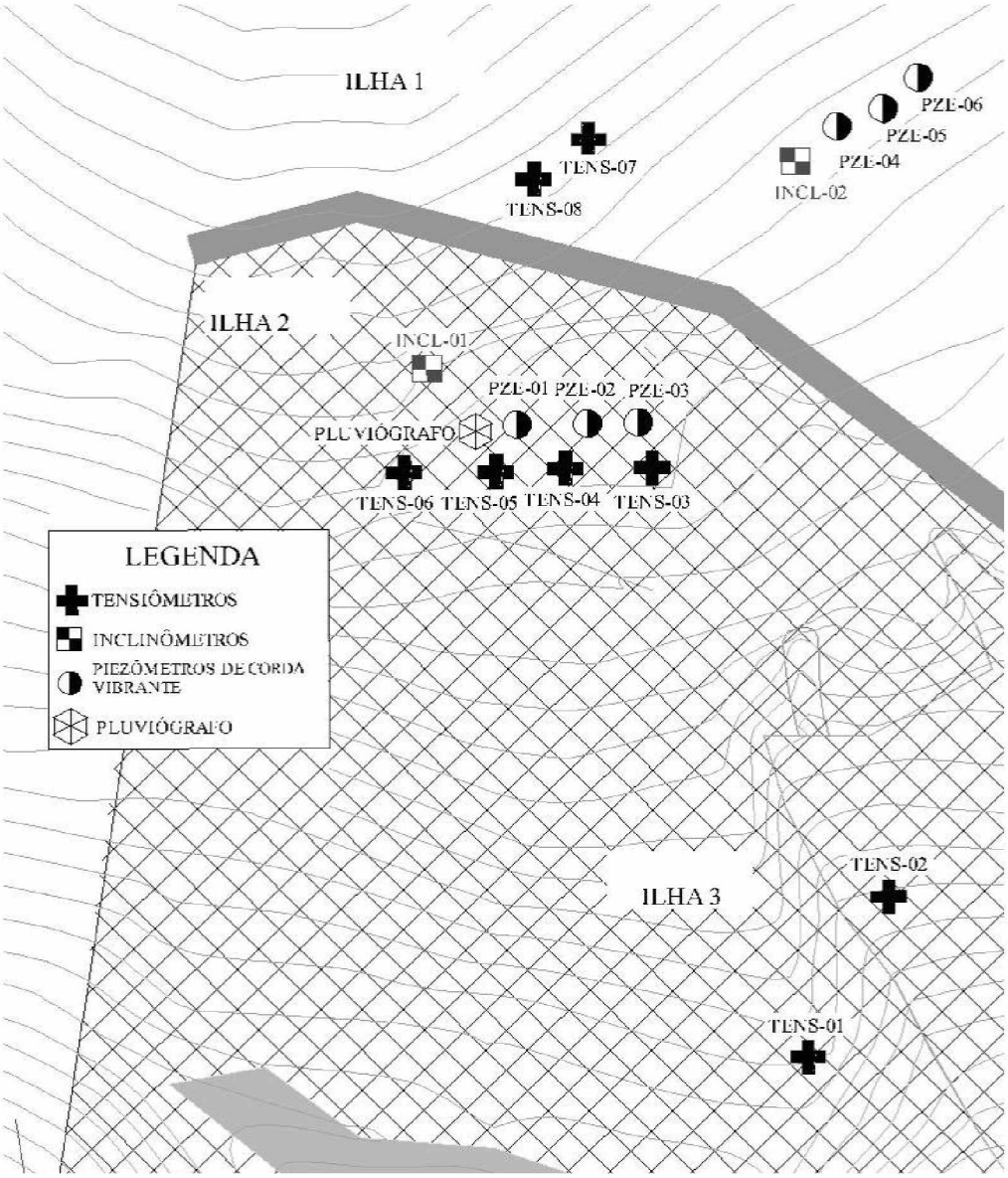
É apresentado nesta seção uma descrição suscinta dos instrumentos que compõem o sistema de monitoramento. São destacados apenas aqueles instrumentos, cujos dados serão analisados neste trabalho.

A Figura 37 apresenta a localização e descrição dos instrumentos instalados conforme a descrição de Sestrem (2012) e Sestrem et al. (2015).

Os instrumentos foram divididos em 3 ilhas de instrumentação, sendo a primeira na parte superior do talude, fora da área estabilizada, a segunda no topo da área estabilizada e a terceira na parte inferior.

Compõem o sistema de monitoramento, 6 piezômetros de corda vibrante separados em dois grupos de 3 equipamentos, sendo um grupo na ilha 2, dentro da área estabilizada e o outro na ilha 3, fora da área estabilizada. As profundidades, definidas de acordo com o perfil geológico-geotécnico são informadas no Quadro 5.

FIGURA 37 - CROQUI DE LOCALIZAÇÃO INSTRUMENTOS



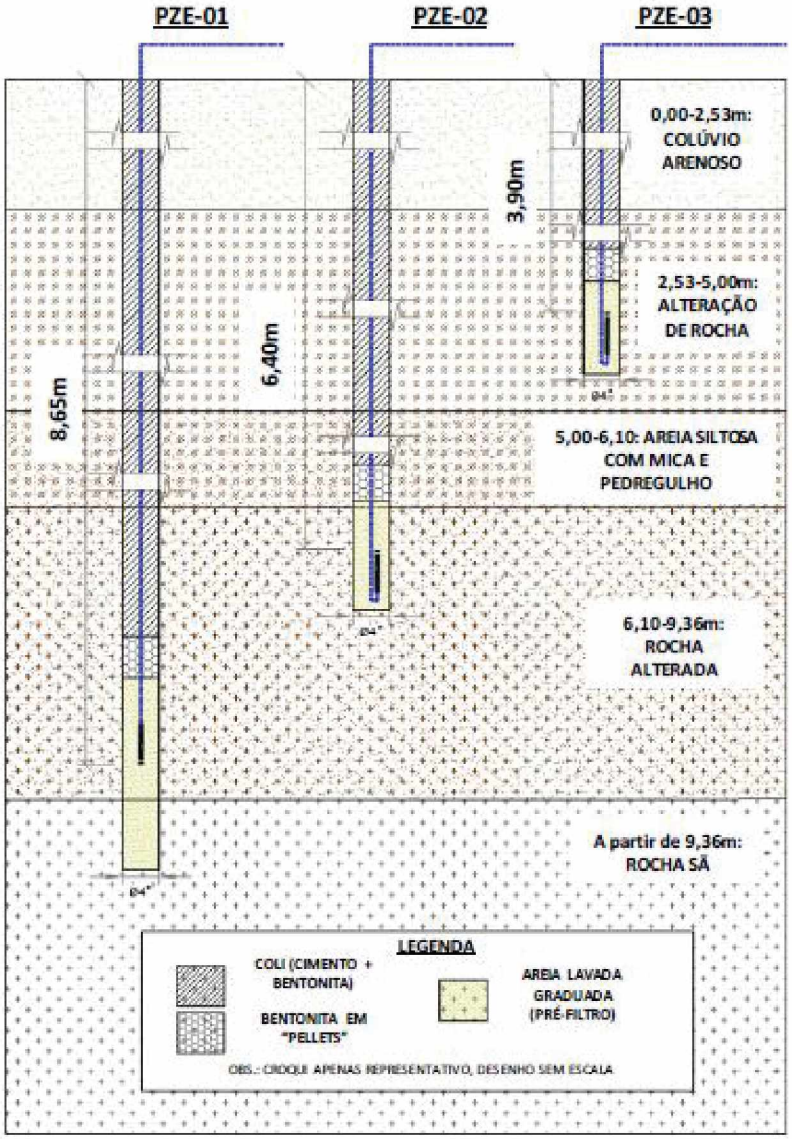
FONTE: Adaptado de Sestrem et al. (2015)

A Figuras 38 e 39 apresentam a posição dos piezômetros em relação ao perfil geológico-geotécnico do sítio.

Além dos piezômetros há um pluviógrafo na ilha 2 e 8 tensiômetros, sendo dois na ilha 1, quatro na ilha 2 e dois na ilha 3. O QUADRO 6 detalha a posição e os comprimentos dos tensiômetros instalados.

Para as medidas de deslocamentos sub-horizontais existem dois inclinômetros instalados na encosta, sendo o Inclinômetro 1 (INCL-01) na ilha 2, dentro da área estabilizada e o inclinômetro 2 (INCL-02) na ilha 1, fora da área estabilizada.

FIGURA 38 - POSIÇÃO DOS PIEZÔMETROS DA ILHA 2 NO PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO



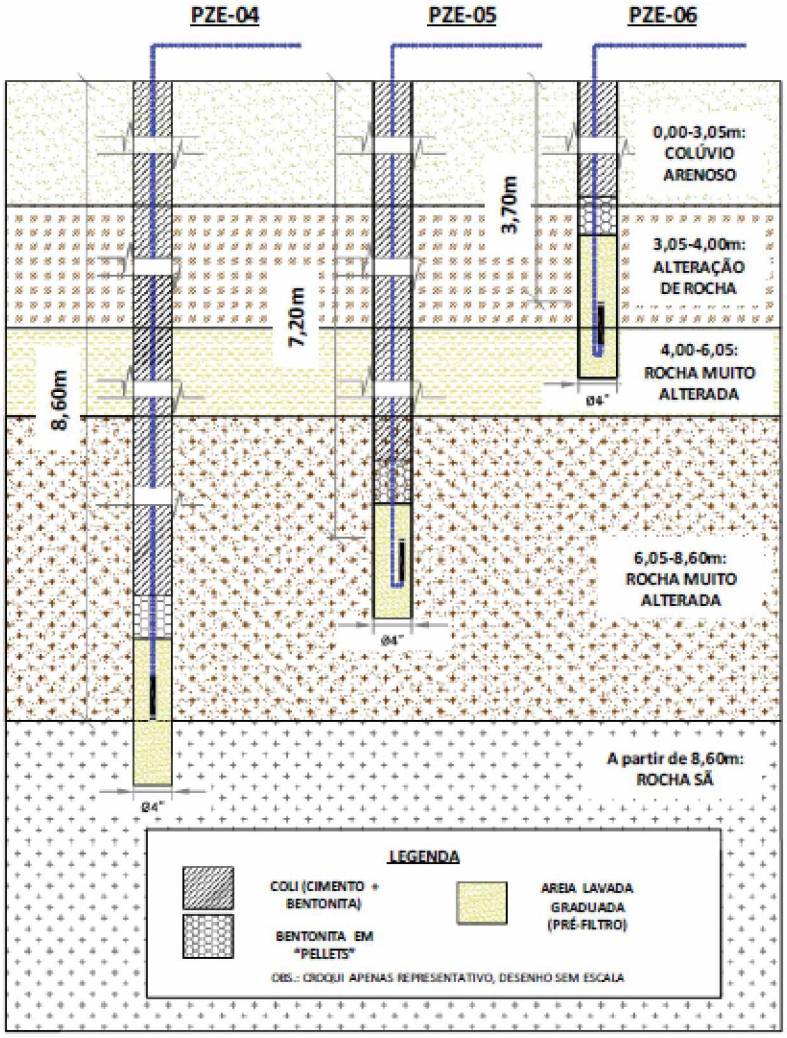
FONTE: Sestrem (2012)

QUADRO 5 - PIEZÔMETROS DE CORDA VIBRANTE INSTALADOS

Posição	Instrumento	Profundidade
Ilha 2 – Dentro da área estabilizada	Piezômetro 1	8,65m
	Piezômetro 2	6,40m
	Piezômetro 3	3,90m
Ilha 1 – Fora da área estabilizada	Piezômetro 4	8,60m
	Piezômetro 5	7,20m
	Piezômetro 6	3,70m

FONTE: Adaptado de Sestrem (2012)

FIGURA 39 - POSIÇÃO DOS PIEZÔMETROS DA ILHA 1 NO PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO



FONTE: Sestrem (2012)

QUADRO 6 - DISTRIBUIÇÃO DOS TENSIÔMETROS

Posição	Instrumento	Comprimento
Ilha 1 – Fora da área estabilizada	Tensiômetro 1	1,00m
	Tensiômetro 2	2,00m
Ilha 2 – Dentro da área estabilizada	Tensiômetro 3	0,50m
	Tensiômetro 4	3,00m
	Tensiômetro 5	1,00m
	Tensiômetro 6	2,00m
Ilha 3 – Dentro da área estabilizada	Tensiômetro 7	1,00m
	Tensiômetro 8	2,00m

FONTE: Adaptado de Joly (2018)

Os inclinômetros foram instalados em furos de sondagens de forma que o eixo "A" ficasse perpendicular as curvas de nível, ou seja no sentido de um possível movimento de massa, e o eixo "B" paralelo as curvas de nível. Tiveram seus comprimentos definidos de forma que ficassem engastados ao menos 3m no perfil de rocha sã (Recuperação>95%). O INCL-01 foi instalado a uma profundidade de 12,38m e o INCL-02 a uma profundidade de 12,75m. Ambos instrumentos têm 13m de comprimento total (SESTREM, 2012).

3.3 METODOLOGIA

Neste trabalho são analisadas séries temporais das leituras do pluviógrafo, dos tensiômetros, dos piezômetros e dos inclinômetros. O período analisado é de 07/05/2012 a 27/02/2019. Para poro-pressões e precipitação os dados diários são obtidos de forma automática e as leituras de deslocamento foram feitas manualmente uma vez por mês, conforme descrito por Sestrem (2012), González (2013) e Joly (2018).

Apesar da análise de series temporais ser definida como uma técnica para observação de tendência, sazonalidade e predição de valores de séries históricas, neste trabalho é feita uma análise qualitativa da tendência e sazonalidade e não se busca a predição de valores futuros.

A análise dos dados é dividida em 4 grupos: Precipitação, poro-pressões positivas, sucção e deslocamentos.

3.3.1 Precipitação

Na análise da precipitação é feita uma caracterização das chuvas de acordo com seus acumulados diários e dado tratamento estatístico para melhor entendimento das chuvas no período analisado. É observado a falta de dados e feita uma correlação linear com estações próximas para avaliar a possibilidade de preenchimento dos dados.

Os dados são preenchidos por regressão linear simples preferindo-se a estação com melhor correlação linear.

É feita análise das médias mensais para identificação de sazonalidade das chuvas e análise da distribuição das chuvas por acumulado diário, além da distribuição de acordo com a classificação CIRAM (2016).

3.3.2 Poro pressão

Assim como acontece com os dados de precipitação há ausência de dados em certos períodos também para poro pressão positiva. Onde há ausência de dados de todos os instrumentos, esses dados são ignorados e quando é apenas um instrumento, faz-se o preenchimento do dado através de regressão linear simples com dados do instrumento com maior correlação linear.

3.3.2.1 Análise da relação da variação do nível d'água (NA) com as leituras de poro pressão

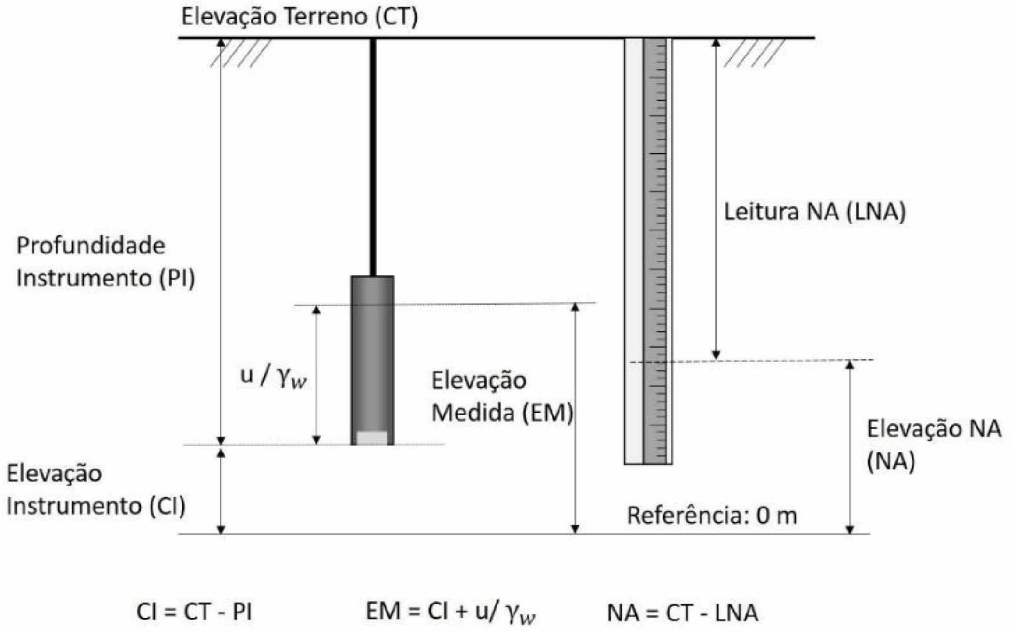
Para comparação entre as leituras dos piezômetros e as leituras manuais do NA, transformou-se ambas em valores de potencial total. Para a elevação do NA, subtraiu-se o valor medido, da cota da boca do furo onde são feitas as medidas de NA. Para obter os valores de potencial medido, ou elevação medida, nos piezômetros (EM), soma se o valor da elevação do instrumento (CI) à razão entre o valor de poro pressão medido (u) e o peso específico da água (γ_w). A elevação do instrumento (CI) é a subtração da profundidade do piezômetro (PI), da cota do terreno onde o instrumento está posicionado (CT). Urciuoli et al. (2016) usa abordagem semelhante, porém adota a profundidade medida ao invés de potencial total. O Quadro 7 apresenta os valores de elevação dos instrumentos e dos poços de leitura de nível d'água e a Figura 40 apresenta um esquema da metodologia adotada.

QUADRO 7 - ELEVAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

	PZE-01	PZE-02	PZE-03	SM-04	PZE-04	PZE-05	PZE-06	INCL-02
PI (m)	8,65	6,40	3,90	-	8,60	7,20	3,70	-
CT (m)	92,40	92,40	92,40	92,40	102,50	102,50	102,50	102,50
CI (m)	83,75	86,00	88,50	-	92,90	94,30	97,80	-

FONTE: O autor

FIGURA 40 - ESQUEMA PARA TRANSFORMAÇÃO DA LEITURAS DE NA E DE PORO PRESSÃO EM VALORES DE ELEVAÇÃO EM METROS OU POTENCIAIS TOTAIS.



FONTE: O autor

3.3.2.2 Correlação linear entre leituras de poro pressão e registros de precipitação

Fez-se uma análise de correlação linear entre os valores de precipitação e de poro pressão, onde foram testados acumulados diários de 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 21, 30 e 45 dias e atrasos nas leituras de 2, 3, 4, 5 e 7 dias.

Os dados foram organizados de forma que se pudesse obter acumulados de precipitação nos períodos analisados e se impor os atrasos nas leituras conforme sugerido por Buzzi (2007 *apud* GONZALES, 2013).

3.3.2.3 Análise qualitativa dos acréscimos de poro pressão.

Analisou-se intervalos de tempo onde foram escolhidas as datas dos registros de maior precipitação diária e a data do registro de maior valor de poro pressão. Essas datas foram chamadas de “eventos”. Definiu-se o intervalo de análise como sendo aquele onde é possível observar uma variação significativa nos valores de poro pressão, partindo de zero ou valor mínimo até um pico e retornando ao valor inicial, o que representaria a duração de um evento pluviométrico. O Quadro 8 apresenta os eventos escolhidos. O evento 3 representa a data com o maior registro de poro pressão e os demais representam os eventos com acumulados diários de chuva

superiores a 100 mm. Os eventos 7 e 8 foram desdobrados em 7 e 7A e em 8 e 8A em função da baixa variação na leitura de alguns instrumentos no evento principal.

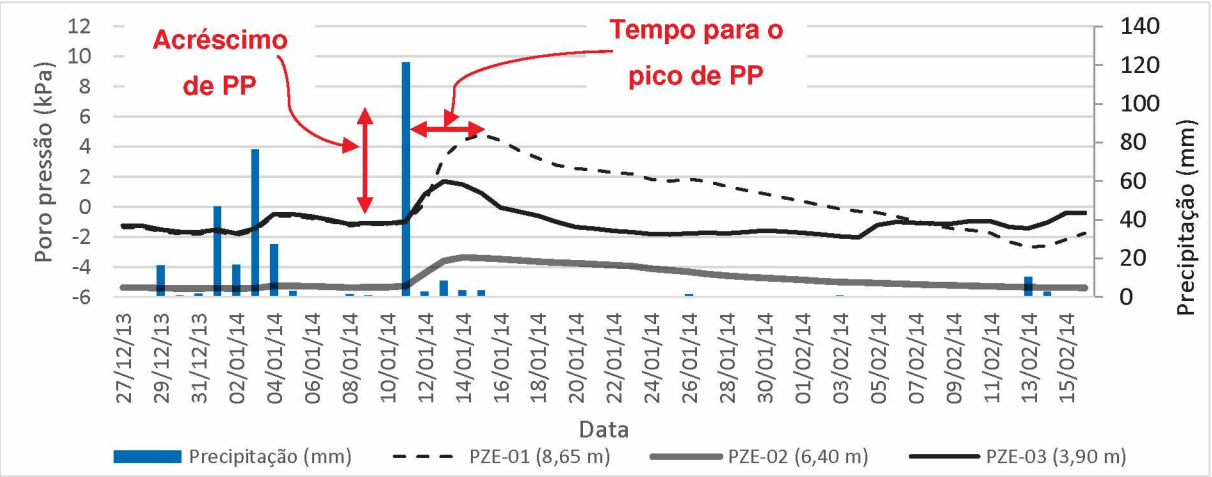
QUADRO 8 - INTERVALO DOS EVENTOS ESCOLHIDOS PARA ANÁLISE QUALITATIVA

Evento	Data do Evento	Precipitação no Dia (mm)	Intervalos analisados	
			Início	Fim
1	03/04/2013	155,20	23/03/2013	09/05/2013
2	11/01/2014	121,40	27/12/2013	16/02/2014
3	04/11/2015	96,00	29/08/2015	06/12/2015
4	25/03/2016	238,60	20/03/2016	02/05/2016
5	13/04/2016	189,20	20/03/2016	02/05/2016
6	25/10/2016	123,00	20/10/2016	13/11/2016
7	31/05/2017	119,80	18/05/2017	02/07/2017
7 A	05/06/2017	67,40	18/05/2017	02/07/2017
8	10/01/2018	106,20	04/01/2018	12/02/2018
8 A	15/01/2018	18,20	04/01/2018	12/02/2018

FONTE: O autor

Conforme pode ser observado na Figura 41, comparando-se a data do evento com a data do maior registro de poro pressão (PP), obtém-se o tempo para atingir o pico de PP no intervalo e comparando-se a leitura de PP no dia anterior ao evento com a leitura de pico do intervalo, obtém-se o acréscimo de poro pressão gerado após o evento.

FIGURA 41 - EVENTO 2 - PICO DE PP E TEMPO PARA ATINGIR O PICO DE PP

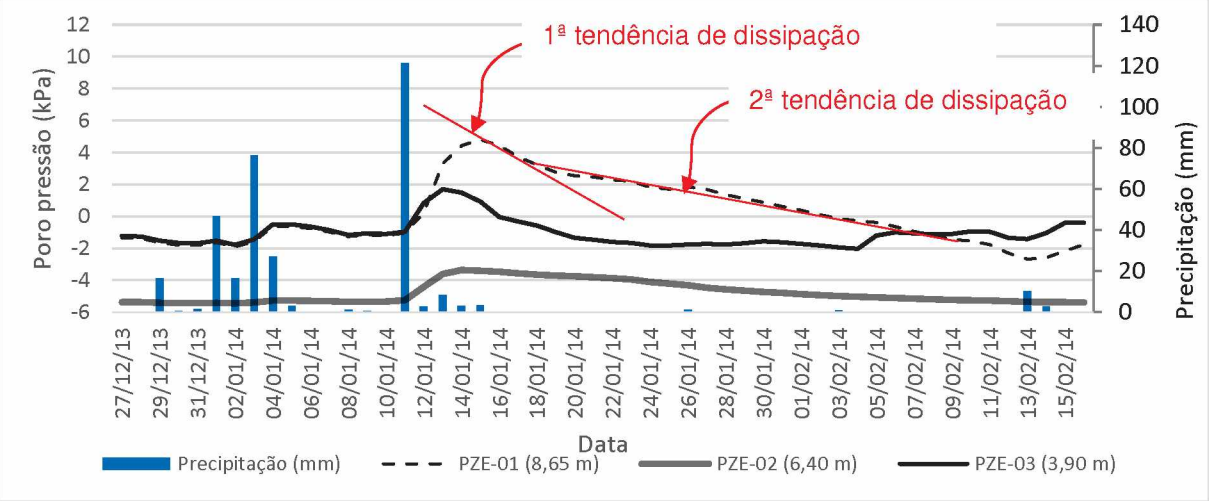


FONTE: O autor

Para se estimar o tempo necessário para dissipação do acréscimo de poro pressão, analisa-se a melhor tendência de redução após o atingimento do pico de PP no período, conforme pode ser observado na Figura 42. Para tal, escolhe-se a primeira

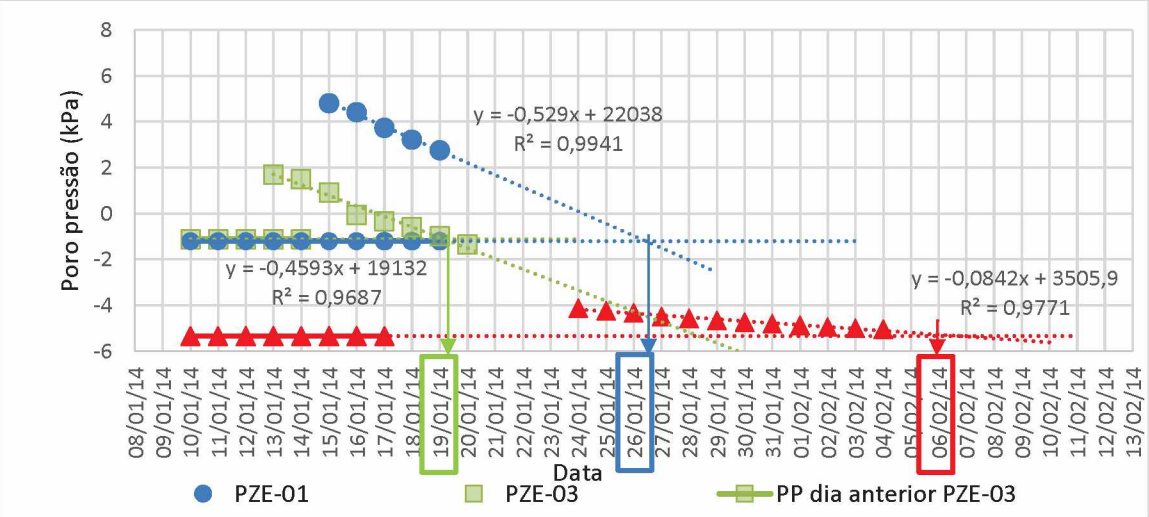
tendência após o pico e prolonga-se essa mesma tendência até que sua projeção atinja o patamar de PP do dia anterior ao evento. A Figura 43 ilustra esse critério.

FIGURA 42 - EVENTO 2 - TENDÊNCIAS DE DISSIPAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE PP



FONTE: O autor

FIGURA 43 - EVENTO 2 - TENDÊNCIAS DE DISSIPAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE PP



FONTE: O autor

Esse critério foi adotado, pois há uma clara mudança na tendência e velocidade de dissipação e que possivelmente é causada pelas chuvas posteriores. Portanto, para desprezar o possível efeito dessas chuvas posteriores, desconsiderou-se a segunda tendência de dissipação. O cruzamento entre as tendências de dissipação e o patamar de PP no dia anterior podem ocorrer entre duas datas. Portanto, adotou-se como critério, escolher a data mais próxima, e na dúvida, a menor data.

3.3.3 Sucção

Analisou-se o desenvolvimento da sucção na forma dos diagramas de frequência e compara-se com dados de precipitação diária. Aplica-se um tratamento estatístico e define-se valores máximos, médios e mínimos e compara-se com os limites práticos dos instrumentos.

Buscou-se identificar possível correlação linear entre as leituras de sucção e os registros de precipitação. Da mesma forma utilizou-se acumulados diários de 2, 3, 5, 7, 10, 15, 21 e 45 dias e impôs-se atrasos de 1,2,3,4,5, 6 e 7 dias. Agrupou-se os dados em matrizes excluindo os dados ausentes e organizando-os de forma a obter os acumulados e os atrasos conforme sugerido por Buzzi (2007 *apud* GONZALES, 2013).

3.3.3.1 Análise qualitativa do desenvolvimento da sucção.

Fez-se uma análise superficial das medidas de sucção para a identificação de padrões de comportamento nas leituras dos instrumentos. Para tal, escolheu-se os intervalos de tempo com as variações de sucção mais visíveis.

Foram analisados 23 intervalos, sendo 8 para a ilha 3 e ilha 2 e 7 para a ilha 1. Esses intervalos não são necessariamente os mesmos para as 3 ilhas, uma vez que o desenvolvimento dos valores de sução varia entre as ilhas.

3.3.4 Deslocamentos

São analisados os deslocamentos medidos pelos dois inclinômetros. São analisadas as magnitudes dos deslocamentos e comparado com a acurácia do equipamento utilizado. É analisada a tendência e velocidade dos deslocamentos, bem como a existência de retração ou recuperação das deformações. Pela análise gráfica, é avaliada a existência de superfície preferencial de deslizamento. Os deslocamentos são comparados com as medidas de poro pressão e sucção.

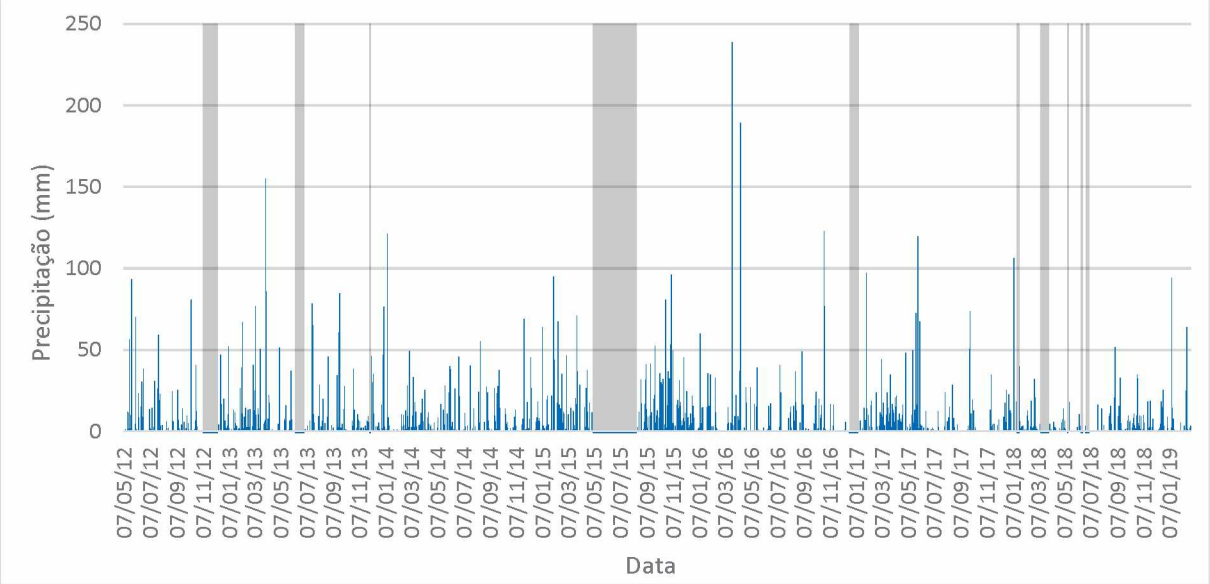
Utilizando o método do talude infinito para a profundidade identificada nos inclinômetros é avaliada a variação do fator de segurança.

4 RESULTADOS

4.1 PRECIPITAÇÃO

A Figura 44 apresenta a precipitação diária acumulada medida no período analisado. Os trechos destacados representam a ausência de dados.

FIGURA 44 - PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA

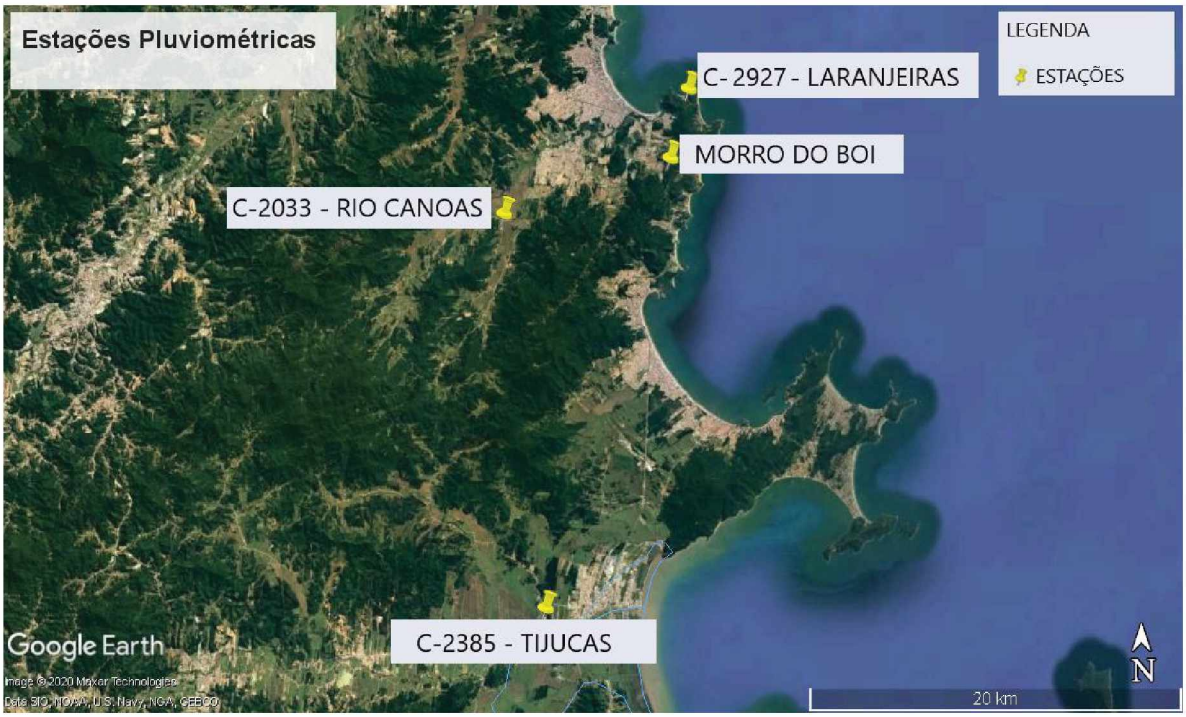


FONTE: O autor

Para melhor análise dos dados fez-se correlações com outras 3 estações pluviométricas e avaliou-se a possibilidade de preenchimento dos dados faltantes. Existem 3 estações da rede do CIRAM – Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina, cujos dados foram cedidos para este trabalho. São as estações C-2927 - Laranjeiras, C-2033 – Rio Canoas e C-2385 – Tijucas, distantes aproximadamente 4 km, 10 km e 25 km e localizadas nas cidades de Balneário Camboriú, Camboriú e Tijucas, respectivamente conforme Figura 45.

Os dados dessas 3 estações próximas também não estão completos e não compreendem todo o período analisado. Fez-se a correlação entre os dados do Morro do Boi e de cada uma das estações para o período com datas equivalentes, conforme QUADRO 9.

FIGURA 45 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES PRÓXIMAS



FONTE: O autor

QUADRO 9 - PERÍODOS PARA CADA CORRELAÇÃO COM ESTAÇÕES VIZINHAS

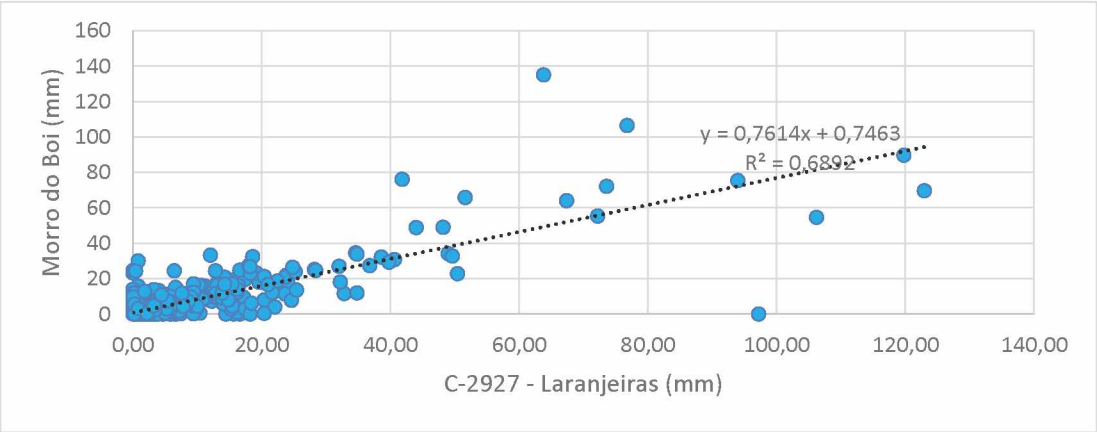
Correlação	Estação	Período	Número de dados
1	C-2927 – Laranjeiras	30/05/16 a 27/02/19	903
2	C-2385 – Tijucas	07/09/12 a 27/02/19	1823
3	C-2033 – Rio Canoas	25/08/12 a 27/02/19	1999

FONTE: O autor

As Figuras 46 a 48 apresentam os gráficos de dispersão entre os dados do Morro do Boi e as três estações vizinhas.

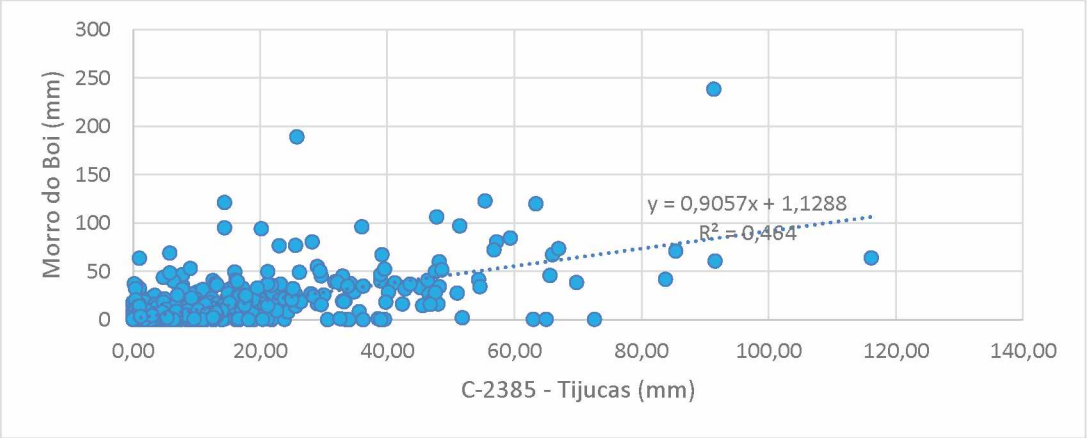
Os dados de precipitação faltantes no monitoramento, foram preenchidos através de regressão linear simples com os dados das 3 estações próximas. Escolheu-se a estação de acordo com a existência do dado e com a correlação obtida com os dados do Morro do Boi. Preferencialmente usou-se os dados da estação C-2927 – Laranjeiras, e na ausência de registro nesta estação usou-se a C-2385 – Tijucas e na ausência de dados desta, a C-2033 – Rio Canoas.

FIGURA 46 - GRÁFICO DISPERSÃO COM ESTAÇÃO C-2927 - LARANJEIRAS



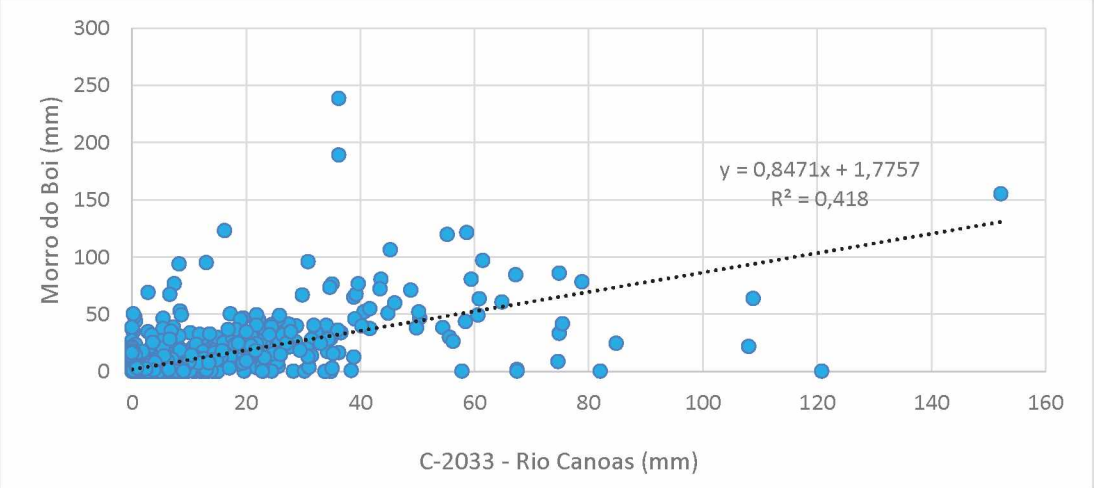
FONTE: O autor

FIGURA 47 - GRÁFICO DISPERSÃO COM ESTAÇÃO C-2385 - TIJUCAS



FONTE: O autor

FIGURA 48 - GRÁFICO DISPERSÃO COM ESTAÇÃO C-2033 – RIO CANOAS



FONTE: O autor

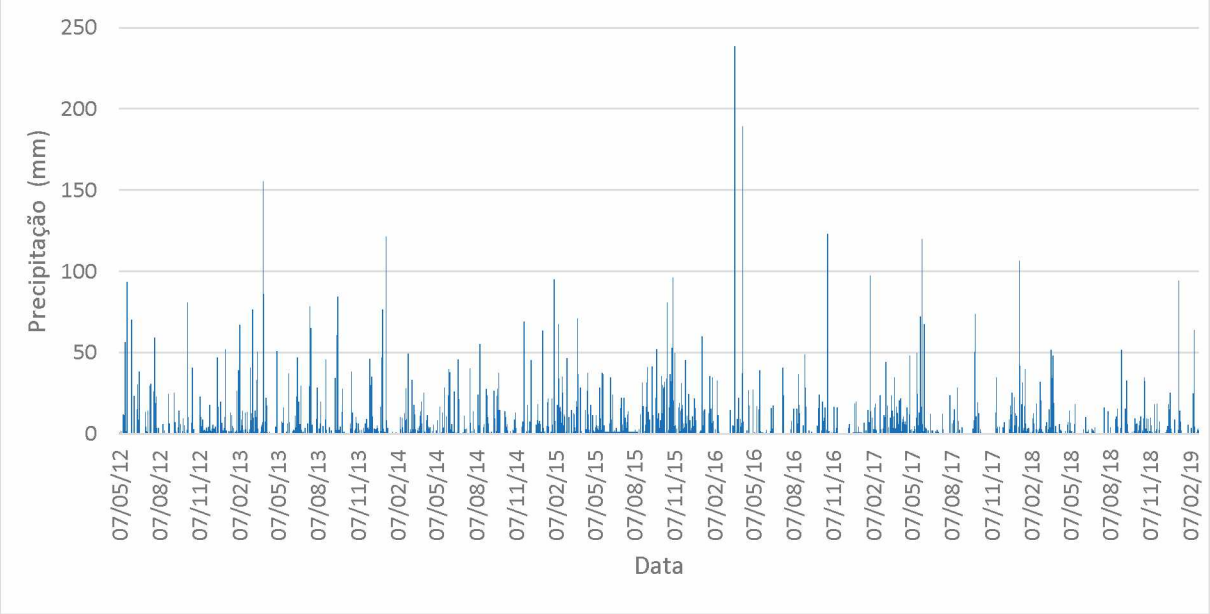
No quadro 8 são apresentadas a correlações lineares obtidas e na Figura 49 é apresentado o registro de acumulado diário com dados preenchidos através da regressão linear simples.

QUADRO 10 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE AS ESTAÇÕES VIZINHAS E O PLUVIÓGRAFO DO MORRO DO BOI.

Estação	Correlação Linear (r)
C-2927 – Laranjeiras	0,83
C-2385 – Tijucas	0,68
C-2033 – Rio Canoas	0,65

FONTE: O autor

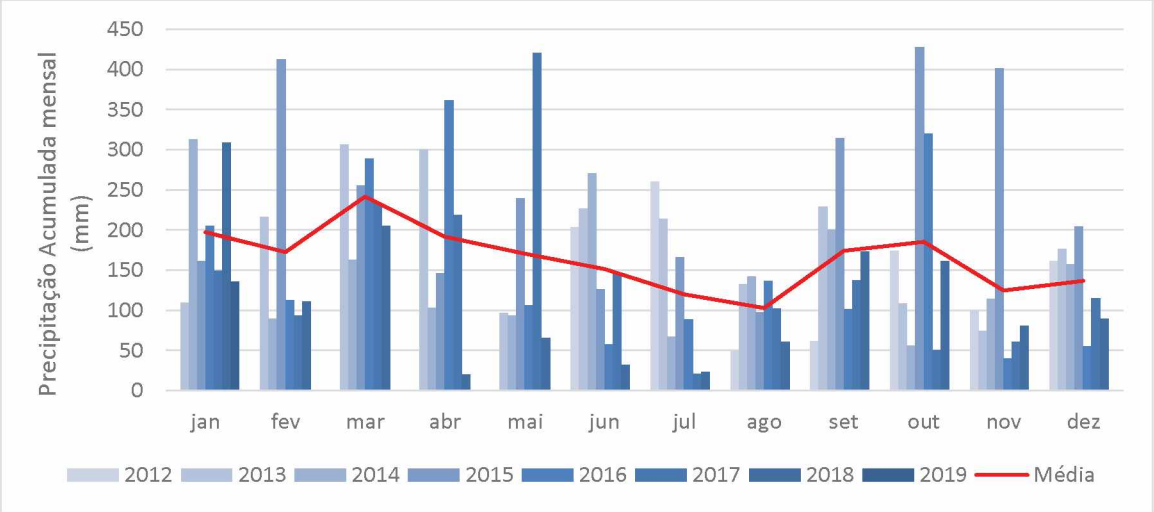
FIGURA 49 - PRECIPITAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA COM DADOS PREENCHIDOS



FONTE: O autor

Na Figura 50 são apresentados os dados de precipitação resumidos em acumulados mensais. Apesar da variação ao longo dos anos, é possível observar que os períodos mais chuvosos são de janeiro a abril e entre setembro e outubro. A estação mais chuvosa é o outono e a menos chuvosa é o inverno, mas com pequenas diferenças em relação às outras estações.

FIGURA 50 - CHUVAS MENSAIS

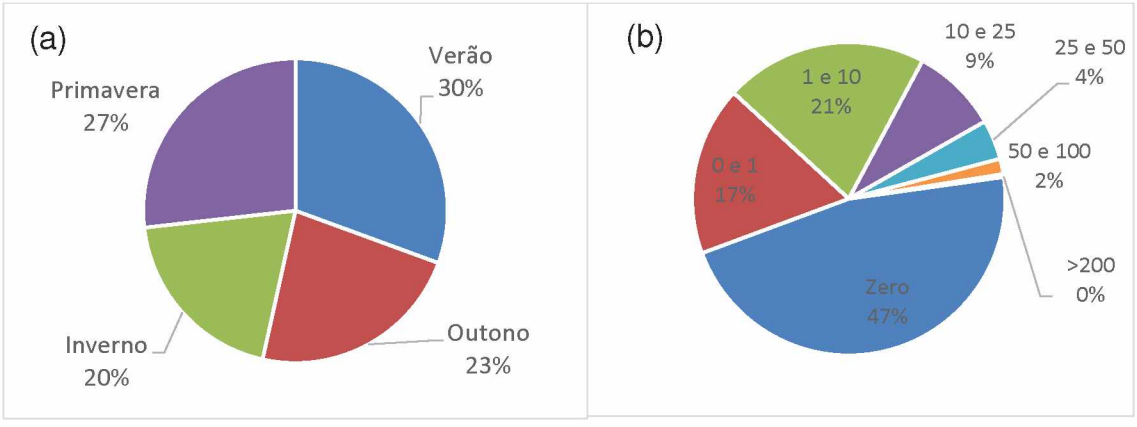


FONTE: O autor

O maior número de ocorrências de chuvas foi registrado no verão, e os maiores registros de acumulado diário ocorreram no outono. A Figura 51 apresenta a distribuição das chuvas no período analisado sem os dados preenchidos, onde em (a) mostra a distribuição de dias com registro de chuvas pelas estações do ano e em (b) a distribuição por acumulado diário.

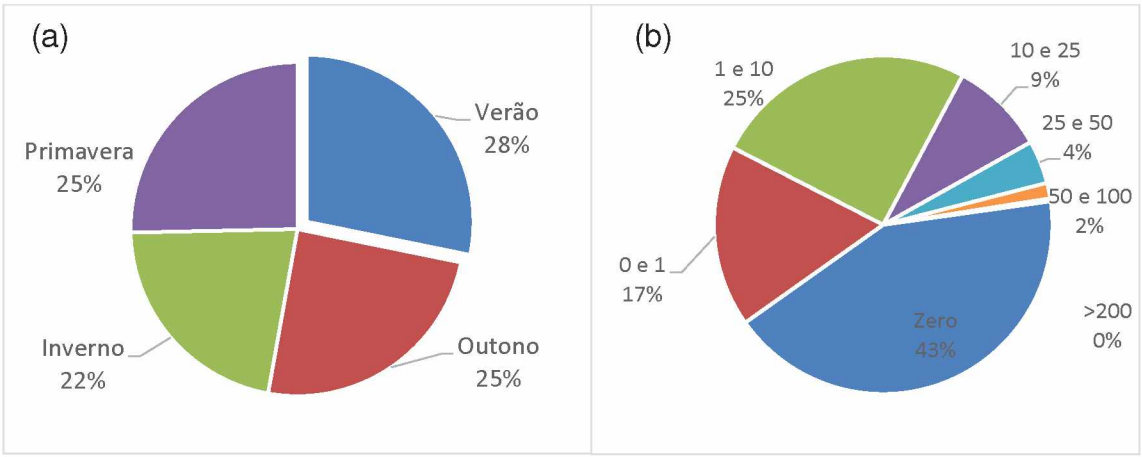
Observa-se que cerca de 84% das ocorrências de chuva tiveram acumulados diários menores do que 10 mm. A Figura 52 apresenta a mesma análise com os dados faltantes preenchidos. Não se percebe mudança significativa na distribuição das chuvas com o preenchimento dos dados faltantes.

FIGURA 51 - DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS (SEM DADOS PREENCHIDOS) – DIAS CHUVOSOS POR ESTAÇÃO DO ANO (A) E POR ACUMULADO EM MM/DIA (B)



FONTE: O autor

FIGURA 52 - DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS (COM DADOS PREENCHIDOS) – DIAS CHUVOSOS POR ESTAÇÃO DO ANO (A) E POR ACUMULADO EM MM/DIA (B)



FONTE: O autor

Com os dados preenchidos, observa-se uma redução em 4 pontos percentuais na proporção de dias sem chuva. Isso acontece pois existe um coeficiente linear na equação da regressão e, portanto, mesmo em dias sem chuva nas estações correlacionadas, a regressão indicará um valor maior que zero para preenchimento do dado.

Na Figura 53 observa-se que para acumulados diários menores que 100 mm, há uma distribuição proporcional em todas as estações. No inverno ocorreram os menores acumulados e no outono os maiores.

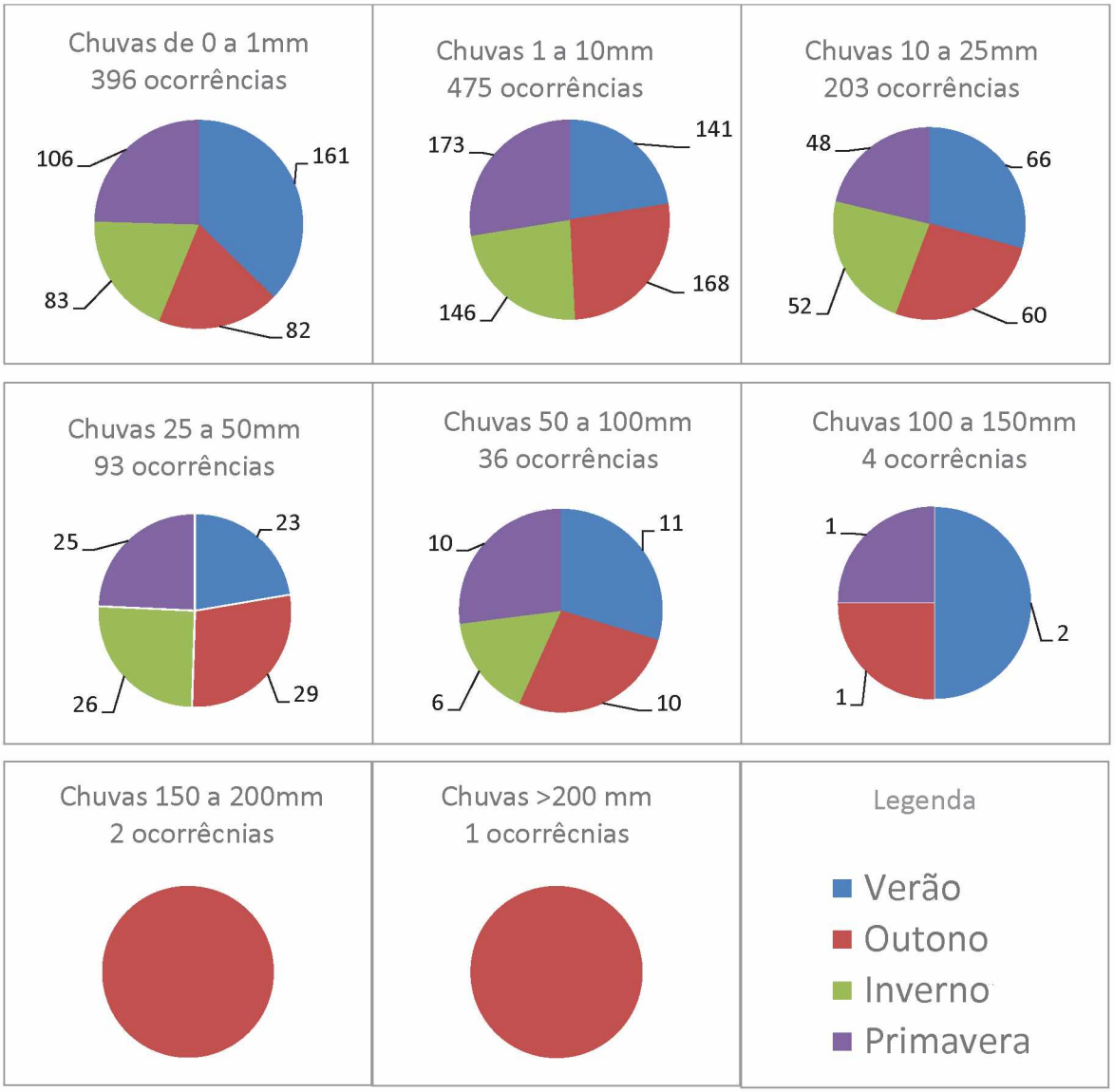
Seguindo a classificação de CIRAM (2016 *apud* GONZÁLEZ et al. 2017), o período analisado pode ser dividido conforme mostrado no QUADRO 11.

QUADRO 11 - CLASSIFICAÇÃO CONFORME CIRAM (2016)

Classificação	Faixa de Precipitação (mm/dia)	Eventos (dias)	Eventos (%)
Dia Seco (Ds)	P<0,2	1055	42,40
Chuvisco (CmFra)	0,20<P<0,60	284,00	11,41
Chuva leve (Cfra)	0,60<P<3,20	476,00	19,13
Chuva Moderada (Cmod)	3,20<P<13,0	367,00	14,75
Chuva Pesada (Cfo)	13,0<P<45,6	249,00	10,01
Chuva Violenta (CmFo)	P>45,6	57	2,29

FONTE: O autor

FIGURA 53 - DISTRIBUIÇÃO SAZONAL POR INTERVALOS DE ACUMULADOS DIÁRIOS (DADOS PREENCHIDOS).



FONTE: O autor

4.2 PORO PRESSÃO POSITIVA

Avaliando-se os valores de poro pressão medidos através dos 6 piezômetros, observa-se que a magnitude das leituras é pequena, com valores máximos que não chegam a 10 kPa e médias próximas de zero. Tal observação é condizente com a capacidade drenante do perfil geotécnico, seja pelo tipo de solo e sua permeabilidade ou pela presença de fraturas nas camadas de alteração de rocha e de rocha.

O Quadro 10 apresenta os valores máximos, mínimos, média e desvio padrão para os valores medidos nos 6 piezômetros.

QUADRO 12 - VALORES MEDIDOS MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE PORO PRESSÃO POSITIVA

u (kPa)	PZE-01 (8,65 m)	PZE-02 (6,40 m)	PZE-03 (3,90 m)	PZE-04 (8,60 m)	PZE-05 (7,20 m)	PZE-06 (3,70 m)
Max	9,30	-2,31	4,64	6,56	3,40	2,30
Min	-3,91	-5,75	-3,05	-4,07	-3,40	-2,27
Média	0,01	-5,07	-0,83	-0,69	-0,92	-0,61
DP	2,21	0,66	0,87	2,12	0,76	0,59

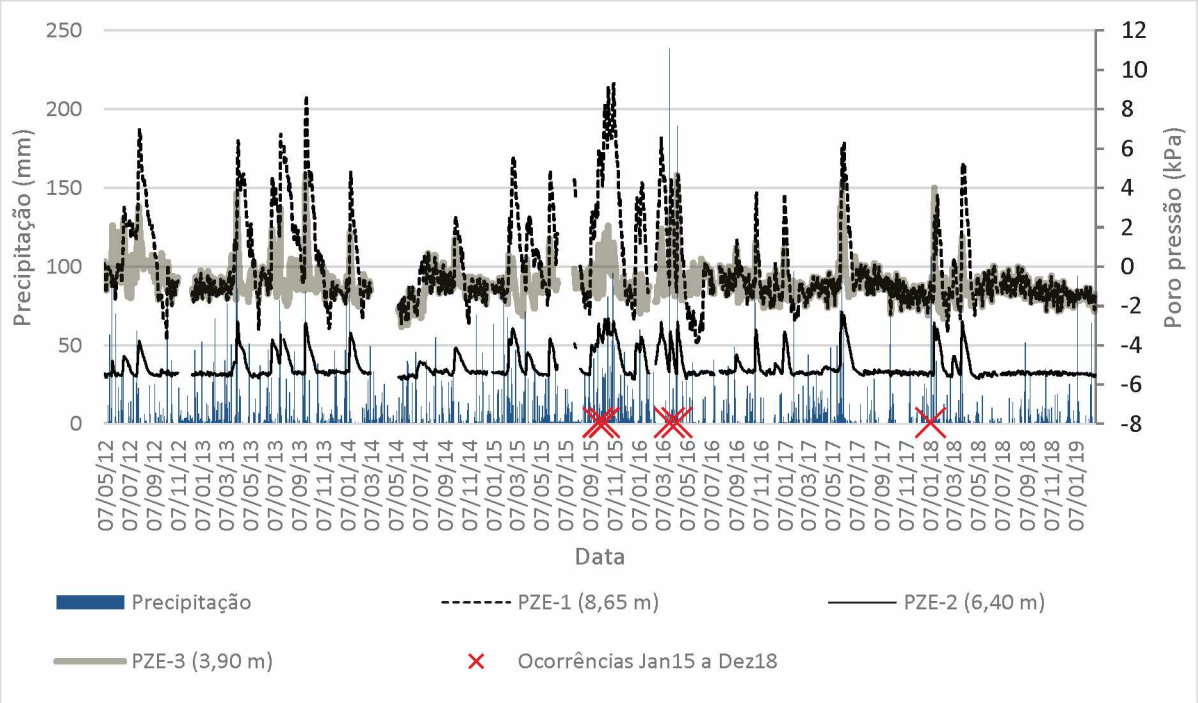
FONTE: O autor

A Figura 54FIGURA 54 e a Figura 55 apresentam os diagramas de frequência para os valores de poro pressão e precipitação diária, com os piezômetros agrupados por ilha de instrumentação.

Salah et al. (2019) apresenta uma proposta de limiares pluviométricos para o Morro do Boi e usa dados de registros de ocorrência de escorregamentos na região, de janeiro de 2015 a dezembro de 2018. Estas datas também são indicadas nos diagramas de frequência.

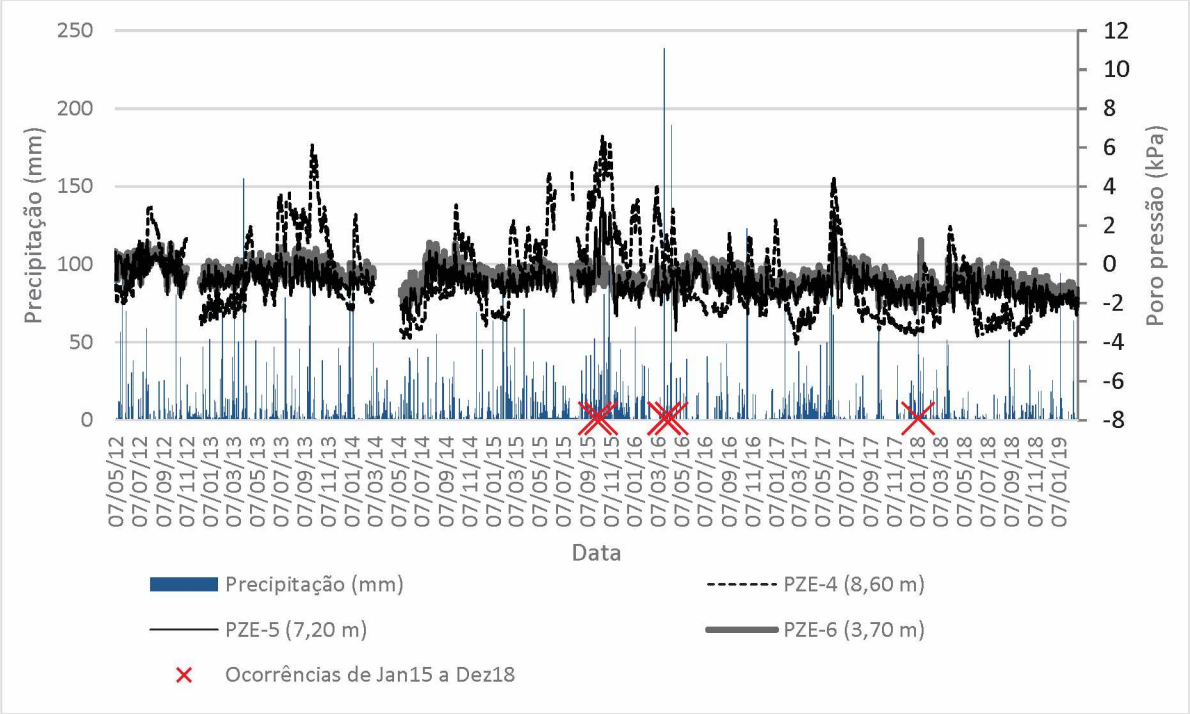
Apesar da magnitude baixa registrada, observa-se o desenvolvimento de poro-pressões positivas em todos os instrumentos, com exceção do piezômetro 2 (PZE-02). As médias de todos os instrumentos ficam próximas de 0 kPa, exceto o PZE-02 que fica próximo aos -5 kPa.

FIGURA 54 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PIEZÔMETROS ILHA 2



FONTE: O autor

FIGURA 55 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PIEZÔMETROS ILHA 1



FONTE: O autor

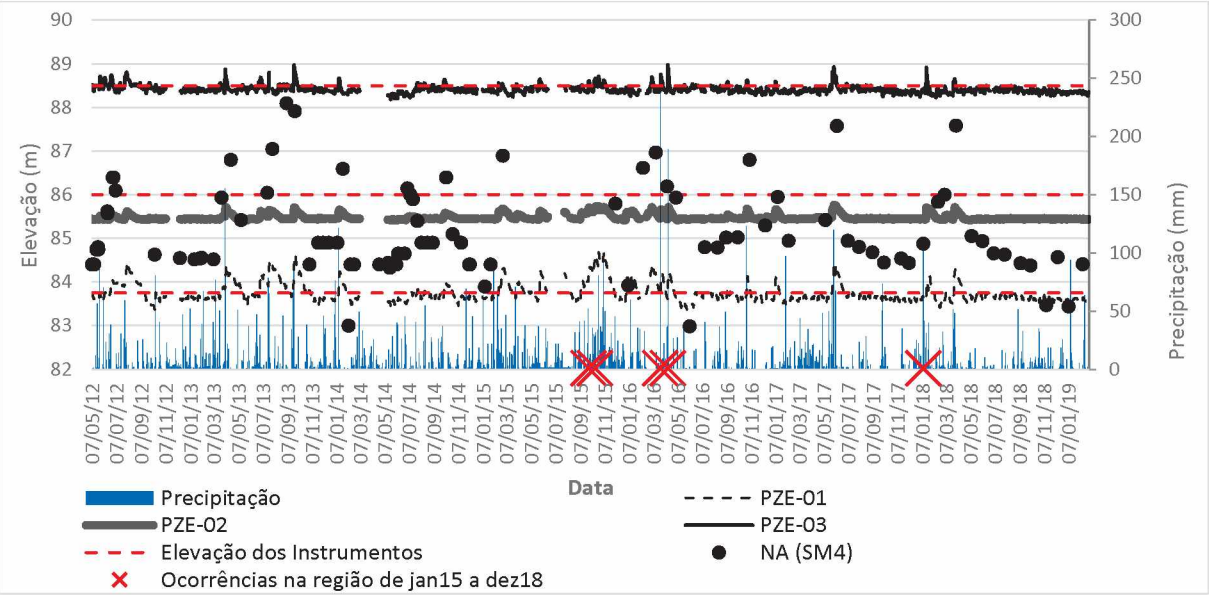
Observa-se que o diagrama de frequência para o PZE-02, embora possua variações coerentes com a precipitação e com os demais instrumentos, se encontra em um nível de poro pressão diferenciado, apresentando uma média de valores na casa dos -5 kPa. Uma possível justificativa seria a possibilidade deste instrumento não sofrer influência da elevação do nível d'água (NA) ou da frente de umedecimento.

4.2.1 Variação da poro pressão com o nível d'água.

A Figura 56 e a Figura 58 apresentam os diagramas de frequência dos valores de poro pressão e das medidas de NA em termos de potencial total para as ilhas 2 e 1 respectivamente.

Na ilha 2, a variação de potencial total de acordo com as leituras de NA foi de 5,11 m enquanto a variação de potencial para os piezômetros foi de 1,35 m, 0,35 m e 0,78 m para os piezômetros PZE-01, PZE-02 e PZE-03 respectivamente. Observa-se que o NA ficou acima da cota do PZE-01 praticamente todo o período. Em relação ao PZE-02, o NA alterna registros de cota superior a este Instrumento com períodos com cotas inferiores. Para o PZE-03, as medidas de profundidade de NA indicam que este ficou sempre abaixo da cota do instrumento.

FIGURA 56 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E MEDIDAS DE NA EM TERMOS DE ELEVAÇÃO PARA A ILHA 2.



FONTE: O autor

Com base nessas observações é possível argumentar que o PZE-02 possa ter algum erro nas suas leituras ou que esteja posicionado em alguma lente de material menos permeável à ponto de impor essa condição de poro pressão diferenciada em relação aos demais instrumentos. Observando-se a Figura 38, constata-se que este instrumento está instalado na interface entre uma camada de rocha alterada e uma fina camada de 1,1 m de areia siltosa com mica e pedregulhos.

Observa-se também que há uma relação entre a pluviometria e as variações das leituras nos piezômetros e no nível d'água. Na Figura 57 observa-se a relação entre a pluviometria, poro pressão e NA em termos de potencial total para o período entre 20/02/2013 e 09/06/2013, onde é visível a variação destas leituras.

Os valores de potenciais das leituras de NA e dos piezômetros PZE-01 e PZE-02 apresentaram boa correlação linear, enquanto a correlação entre o NA e o PZE-03 foi menor. O apresenta os valores de correlação linear obtidos.

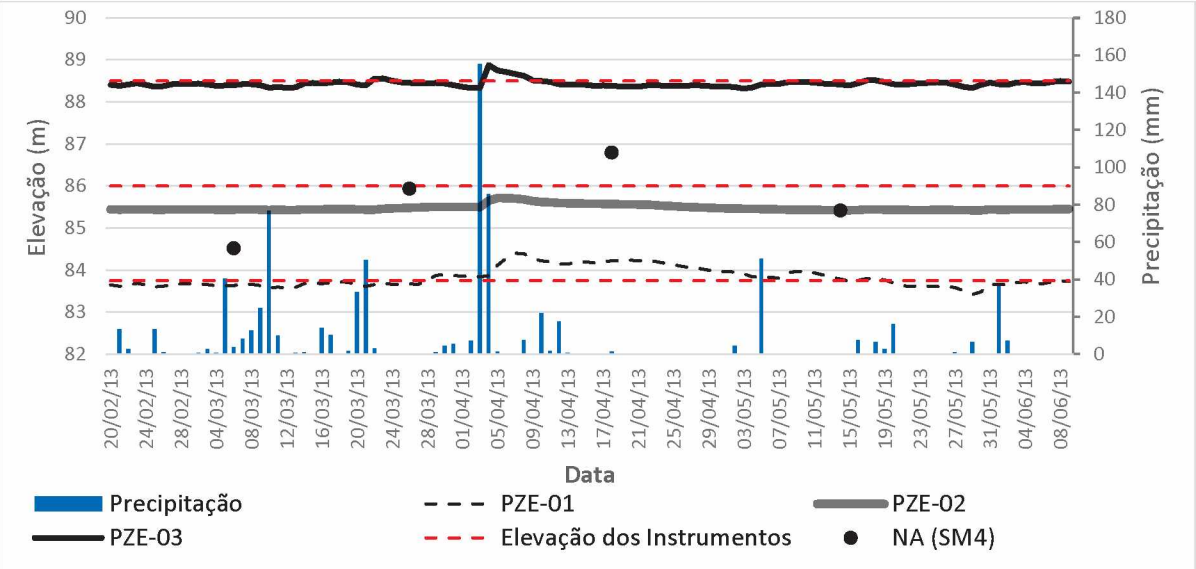
QUADRO 13 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE OS VALORES DE POTENCIAL TOTAL MEDIDO NOS PIEZÔMETROS E NAS LEITURAS DE NA.

	PZE-01	*PZE-02*	*PZE-03*
NA (SM4)	0,72	0,70	0,36

Valores diferentes de 0 com nível de significância, alfa = 0,05

FONTE: O autor

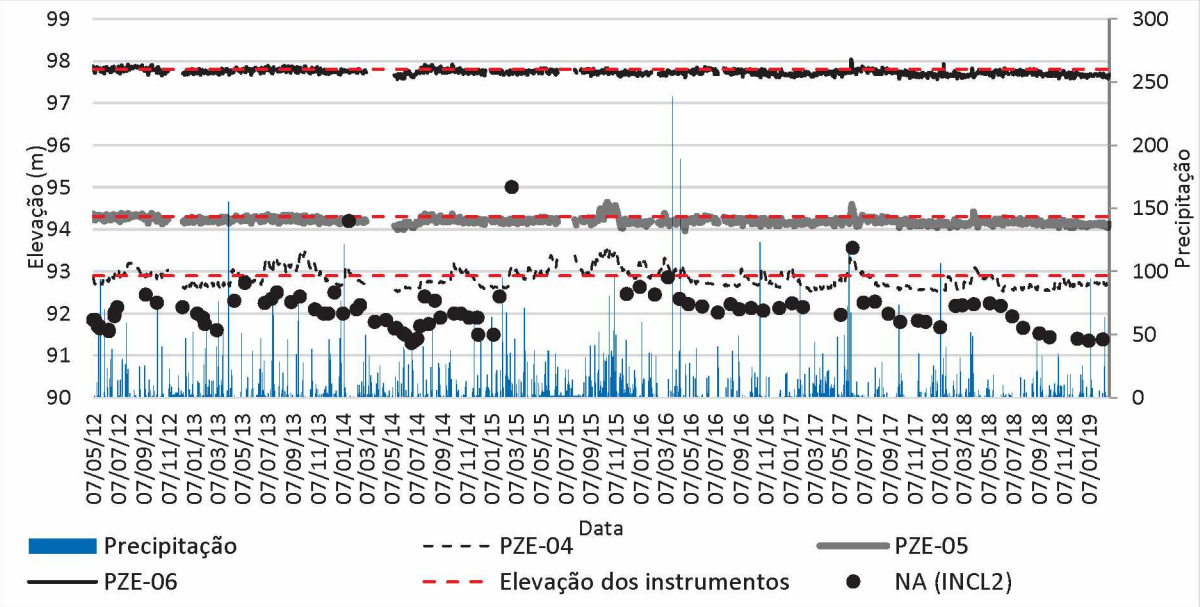
FIGURA 57 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E MEDIDAS DE NA EM TERMOS DE POTENCIAL TOTAL PARA A ILHA 2, NO PERÍODO ENTRE 20/02/2013 E 09/06/2013



FONTE: O autor

Na ilha 1, cujo diagrama de frequência é apresentado pela Figura 58, observa-se uma menor variação nos valores de potenciais medidos nos instrumentos PZE-05 e PZE-06. A variação de potencial medido nas leituras de NA foi de 3,7 m enquanto que para as leituras dos piezômetros foi de 1,08 m, 0,69 m e 0, 47 m para PZE-04, PZE-05 e PZE-06 respectivamente.

FIGURA 58 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E MEDIDAS DE NA EM TERMOS DE ELEVAÇÃO PARA A ILHA 1



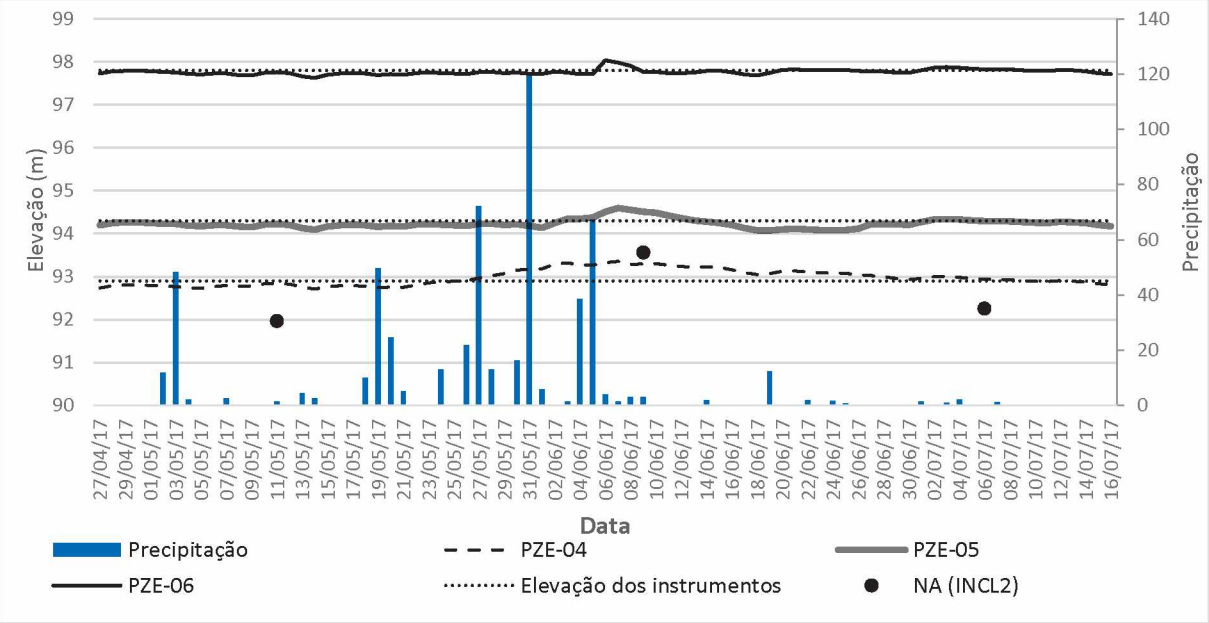
FONTE: O autor

Os registros de NA ficaram quase todo o período abaixo da cota de instalação dos instrumentos, exceto em 3 datas onde superaram essas cotas, indicando que na ilha 1, mesmo o instrumento mais profundo raramente fica submerso.

A apresenta o período de 27/04/2017 a 16/07/2017, quando há registro de NA acima da cota do PZE-04 e quando há picos de potencial em todos os piezômetros. As leituras variam com o registro de chuva no dia 31/05/2017 e parece haver correlação entre elas.

O Quadro 13 presenta os coeficientes de correlação linear entre os valores de potencial medido nos piezômetros e os valores de NA. Percebe-se uma menor correlação em relação à da ilha 2 e que o PZE-04 tem melhor correlação com o NA que os piezômetros PZE-05 e PZE-06.

FIGURA 59 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E MEDIDAS DE NA EM TERMOS DE POTENCIAL TOTAL PARA A ILHA 1, NO PERÍODO ENTRE 27/04/2017 E 16/07/2017



FONTE: O autor

QUADRO 14 - CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE OS VALORES DE POTENCIAL TOTAL MEDIDO NOS PIEZÔMETROS E NAS LEITURAS DE NA.

	PZE-04	PZE-05	PZE-06
NA (INCL2)	0,65	0,40	0,30

Valores diferentes de 0 com nível de significância, alfa = 0,05

FONTE: O autor

4.2.2 Correlação dos valores de poro pressão com a precipitação

Os valores de correlação linear obtidos foram relativamente baixos, variando de 0,10 a 0,61. A TABELA 5 apresenta os melhores valores obtidos de correlação linear combinando variações de acumulado diário e atraso nas leituras.

Para os piezômetros da ilha 1 (PZE-04 a PZE-06) os valores de correlação foram maiores para acumulados de 45 dias. Para os piezômetros da ilha 2 as melhores correlações foram para acumulados diários de 30, 21 e 7 dias para os instrumentos PZE-01, PZE-02 e PZE-03 respectivamente. Impondo atrasos nas leituras, obteve-se pequenas melhoras nos valores do coeficiente de correlação linear. Do ponto de vista da análise estatística, esses valores são baixos e do ponto de vista do fenômeno envolvido, muitos dias de acumulados diários ou de atraso parecem não fazer muito sentido pois, em função do regime pluviométrico da região, períodos longos posteriores ou anteriores são afetados por outros eventos. Portanto, assume-se que há baixa correlação entre os valores das leituras dos piezômetros e os registros de precipitação.

TABELA 5 - MELHORES CORRELAÇÕES OBTIDAS ENTRE AS LEITURAS DOS PIEZÔMETROS E A PRECIPITAÇÃO

Instrumentos		**Com atraso**			**Sem atraso**		**Melhora Correlação com o atraso**
PZE	Profundidade	Atraso (dias)	Acumulado (dias)	r	Acumulado (dias)	r	
1	8.65m	1	30	0,55	30	0,55	0,64%
2	6.40m	1	21	0,61	21	0,60	1,61%
3	3.90m	1	7	0,39	7	0,38	4,46%
4	8.60m	2	45	0,47	45	0,46	2,34%
5	7.20m	1	45	0,23	45	0,22	2,09%
6	3.70m	7	45	0,13	45	0,10	31,23%

Valores diferentes de 0 com nível de significância, alfa = 0,05

FONTE: O autor

Essa ausência de uma boa correlação, é esperada uma vez que não é toda a precipitação que infiltra. Uma parte da chuva é interceptada pela vegetação, outra escoa superficialmente, outra evapora através das plantas (evapotranspiração) e outra infiltra (URCIUOLI et al., 2016).

Outro fator, é que a relação entre a infiltração e a chuva não é linear, uma vez que depende da condição de umidade do solo anterior à chuva, da intensidade e

duração da chuva e da inclinação do talude (TSAPARAS et al., 2003; RAHARDJO et al., 2005; CUOMO e DELLA SALA, 2016). Rahardjo et al. (2004 *apud* CUOMO E DELLA SALA, 2016) relata uma relação entre a infiltração e a precipitação de 40% a 74%, Rahardjo et al. (2005) chegaram a taxas de infiltração variando de 40% a 100% da precipitação e Li et al. (2005) sugere uma relação de 59% a 75%, porém, essa proporção é variável podendo ser 100% para pequenos acumulados e no início de um evento, até que se inicia o *runoff* e a relação começa a cair. Além disso, em solos arenosos a capacidade de absorção de umidade é alta quando o solo é seco (RIDLEY et al., 2003b), porém sua permeabilidade nesta condição é baixíssima, nos patamares de um solo fino (URCIUOLI et al., 2016).

Entretanto, é possível analisar e identificar a relação entre a precipitação e o desenvolvimento das poro-pressões de forma qualitativa.

4.2.3 Análise qualitativa do desenvolvimento das poro-pressões.

A Tabela 6 apresenta os eventos escolhidos, que são as datas com registros de chuva maiores do que 100 mm e a data com maio registro de poro pressão da série. Além dos valores de precipitação de cada evento (registro diário) são apresentados os maiores valores de poro pressão medidos após o evento (pico de poro pressão).

TABELA 6 - EVENTOS ESCOLHIDOS PARA ANÁLISE QUALITATIVA

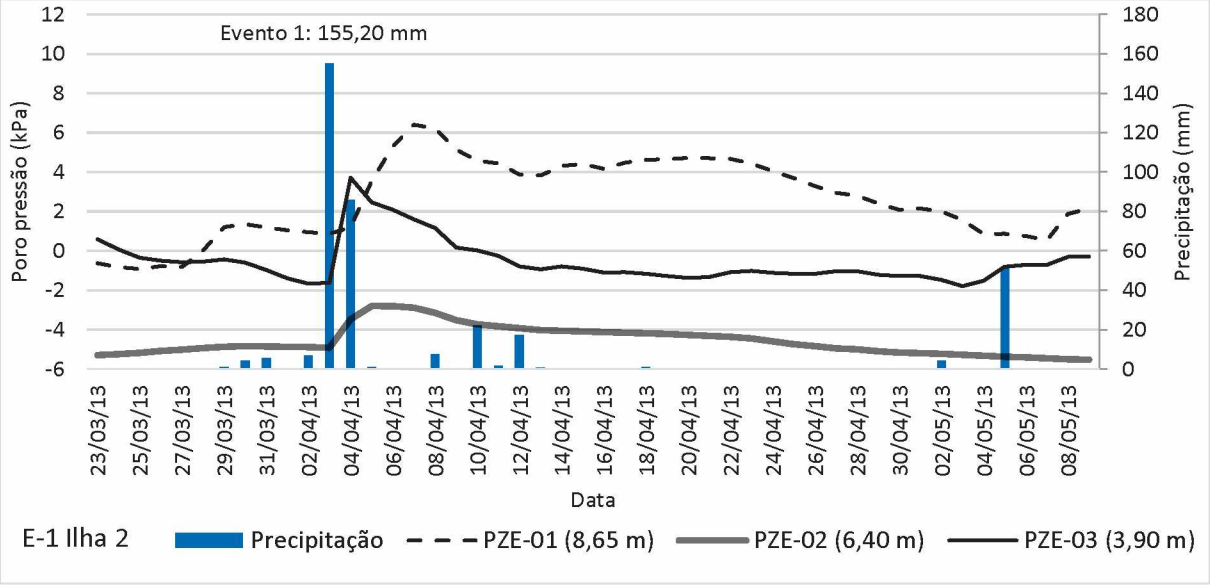
Evento	Data	Chuva (mm)	Maior valor de poro pressão do intervalo (kPa)					
			PZE-01	PZE-02	PZE-03	PZE-04	PZE-05	PZE-06
1	03/04/2013	155,20	6,40	-2,80	3,71	1,05	-0,43	-0,17
2	11/01/2014	121,40	4,81	-3,36	1,70	2,56	-0,55	-0,09
3	04/11/2015	96,00	9,30	-2,79	1,21	6,16	2,66	-0,22
4	25/03/2016	238,60	4,41	-3,31	2,51	1,52	-0,71	-0,45
5	13/04/2016	189,20	4,66	-2,81	4,64	2,81	-0,34	-0,15
6	25/10/2016	123,00	3,75	-3,21	1,24	1,37	-0,28	0,06
7	31/05/2017	119,80	6,03	-2,31	4,22	4,13	0,48	-0,25
7ª	05/06/2017	67,40	6,37	-2,49	2,18	4,48	2,90	2,30
8	10/01/2018	106,20	-0,78	-5,33	-0,51	-2,88	-0,88	-0,59
8ª	15/01/2018	18,20	2,59	-2,86	4,01	-3,29	-1,24	1,23

FONTE: O autor

É apresentado a seguir algumas observações sobre as análises realizadas e os resultados obtidos.

A Figura 60 representa o evento 1 do dia 03/04/2013 para a ilha 2 de instrumentação. Neste evento, a chuva do dia 03/04/2013 com acumulado diário de 155,2 mm é sucedida por uma chuva no dia seguinte com acumulado diário de 85,80 mm. Na verdade são o mesmo evento de chuva, pois os registros horários indicam início da chuva foi no dia 03/04/2013 entre 13:01 e 14:00 e seu término foi no dia 04/04/2013 entre 5:01 e 6:00.

FIGURA 60 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E PRECIPITAÇÃO NO EVENTO 1 NA ILHA 2 – PERÍODO DE 23/03/2013 A 28/05/2013



FONTE: O autor

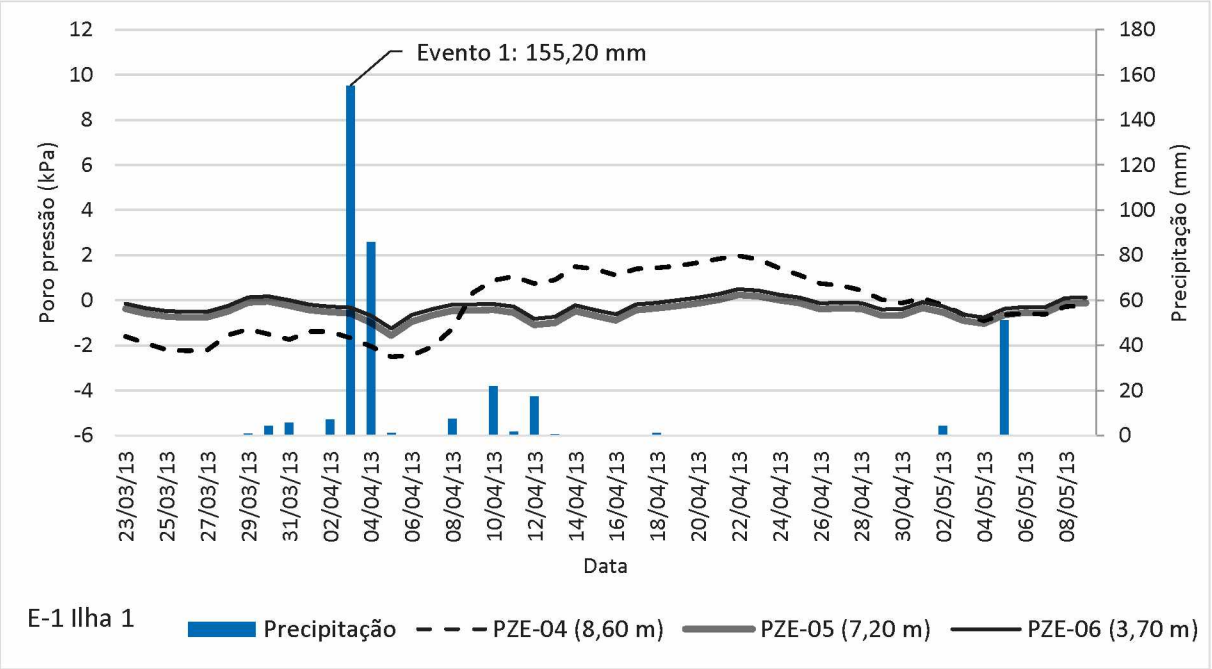
A Figura 61 mostra o evento 1 para a ilha 1 de instrumentação, onde percebe-se que além das magnitudes de poro pressão serem menores do que o registrado na ilha 2, os instrumentos PZE-05 e PZE-06 praticamente não sofreram influência dessas chuvas e registraram acréscimos de poro pressão de 0,10 kPa e 0,12 kPa respectivamente, valores menores que a precisão do instrumento que é de 0,35 kPa (SESTREM, 2012). Portanto para este evento foi feita análise apenas para o PZE-04.

No evento 3, no dia 04/11/2015, com um acumulado diário de 96 mm, houve o maior registro de poro pressão que foi de 9,30 kPa no PZE-01. A Figura 62 apresenta o diagrama de frequência para a ilha 2.

Observa-se a sequência de incrementos nos valores de poro pressão gerado por chuvas de menor magnitude anteriores ao evento, porém com intervalos curtos

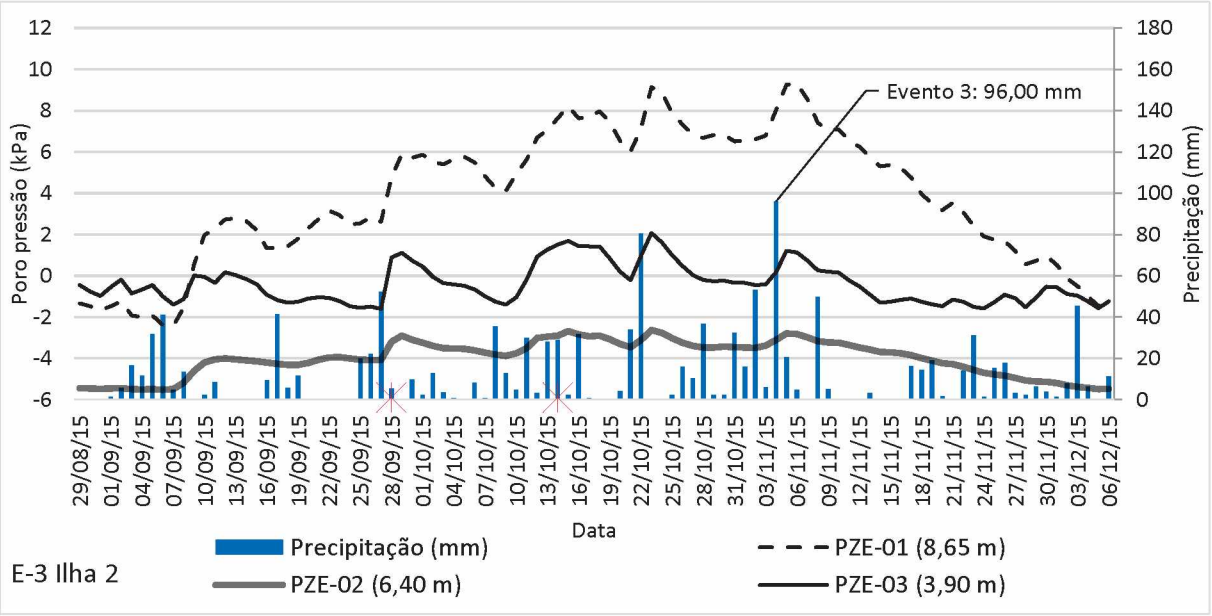
entre uma e outra. São marcadas as datas onde há registro de escorregamentos na região no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2018, segundo Salah et al. (2019).

FIGURA 61 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS PORO-PRESSÕES E PRECIPITAÇÃO NO EVENTO 1 NA ILHA 1 – PERÍODO DE 23/03/2013 A 28/05/2013



FONTE: O autor

FIGURA 62 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA EVENTO 3 NA ILHA 2

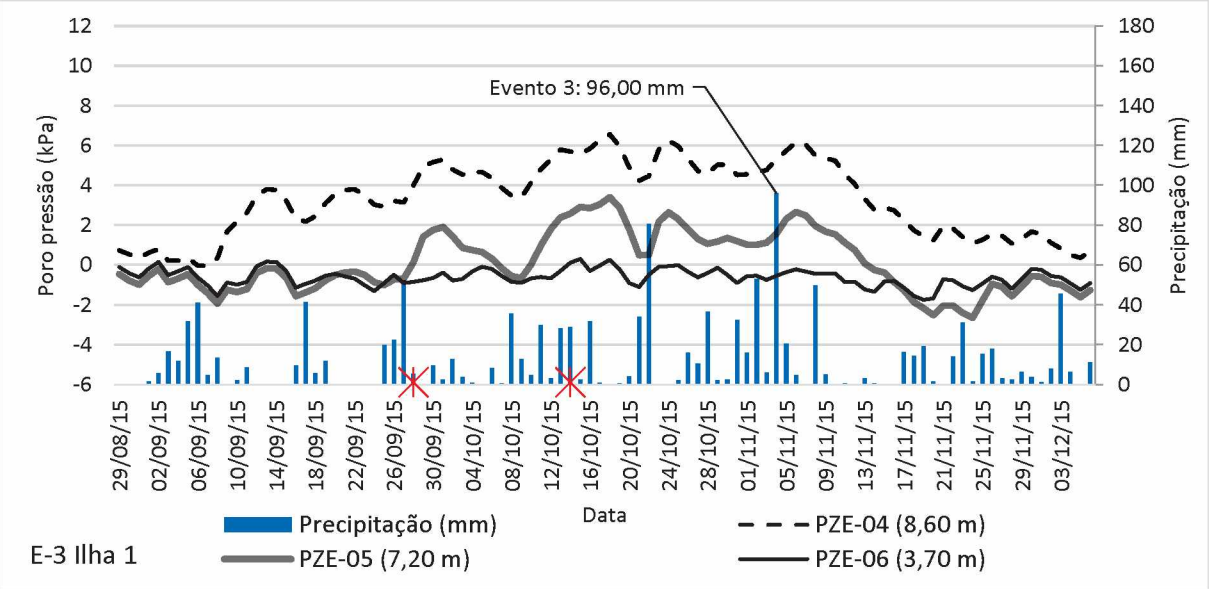


FONTE: O autor

Os dias nos quais ocorreram registros de escorregamentos na região, neste intervalo, não coincidem com dias de maior precipitação ou maior valor de poro pressão.

O diagrama de frequência do mesmo período relativo ao evento 3 para a ilha 1, é apresentado na Figura 63. Para o piezômetro PZE-04, o desenvolvimento das poro-pressões é similar ao registrado no PZE-01 na ilha 2, porém com pico de poro pressão menor. Observa-se que o PZE-05 é menos influenciado pelas chuvas desse período e que o PZE-06 praticamente não é influenciado por estas chuvas. O pico de poro pressão do período analisado ocorreu no dia 18/10/2015, antes do evento 3, no dia 04/11/2015.

FIGURA 63 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DO EVENTO 2 NA ILHA 1.



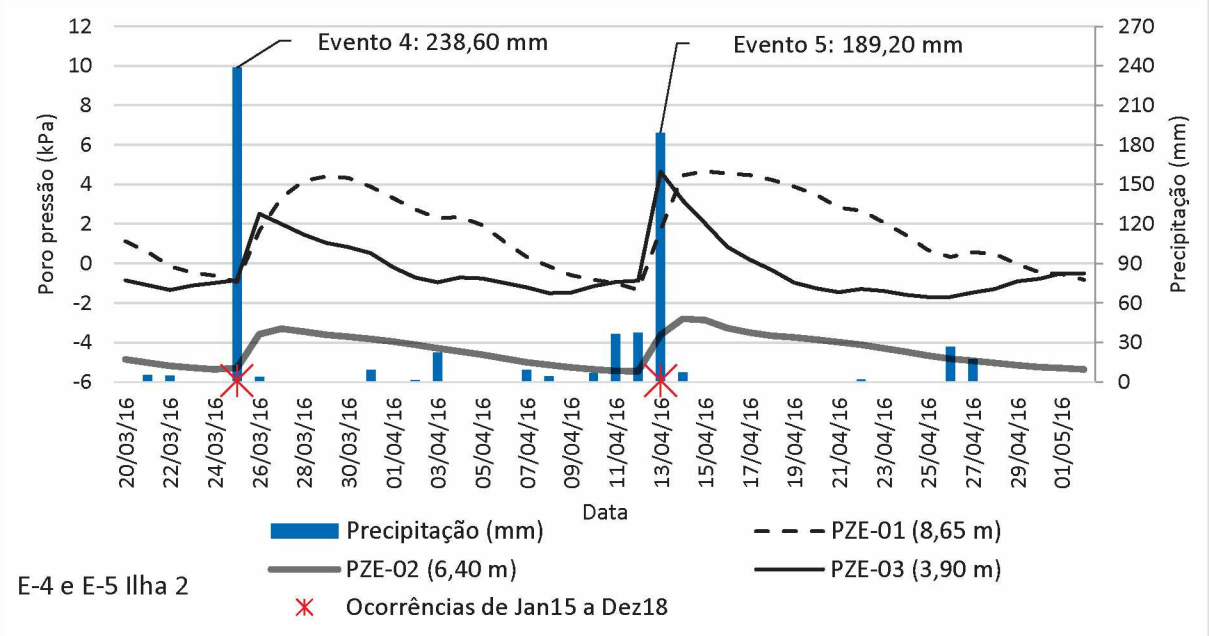
FONTE: O autor

O evento 4 no dia 25/03/2016 e o evento 5 no dia 13/04/2016 para a ilha 2 são apresentados na Figura 64. Assim como nos eventos apresentados anteriormente há picos de poro pressão nitidamente relacionados aos eventos, e tendências de queda após os eventos. Nessas duas datas também ocorreram registros de escorregamentos na região e não coincidem com as datas de registro dos picos de poro pressão.

A Figura 65 apresenta o diagrama de frequência para o período que compreende os eventos 4 e 5, referente aos piezômetros da ilha 1. Observa-se que as magnitudes dos acréscimos e dos picos de poro pressão é relativamente pequena,

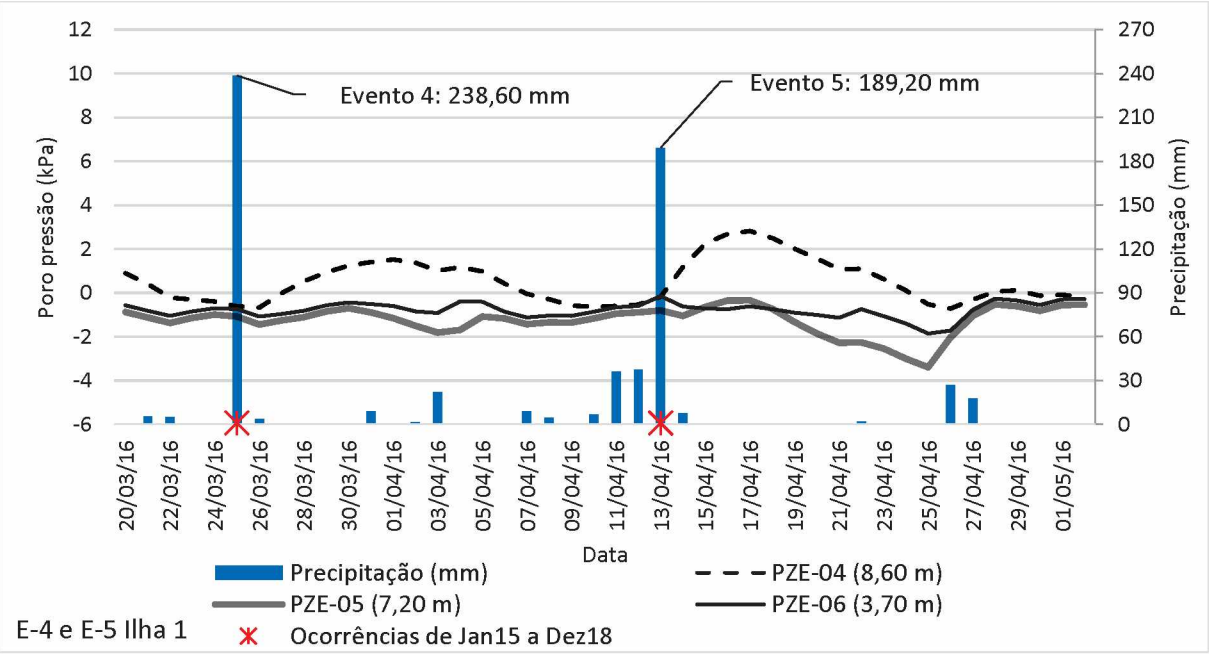
mesmo para os dois maiores registros de acumulados diários de chuva em todo o período analisado.

FIGURA 64 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DA ILHA 2 PARA OS EVENTOS 4 E 5



FONTE: O autor

FIGURA 65 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PIEZÔMETROS DA ILHA 1 NOS EVENTOS 4 E 5



FONTE: O autor

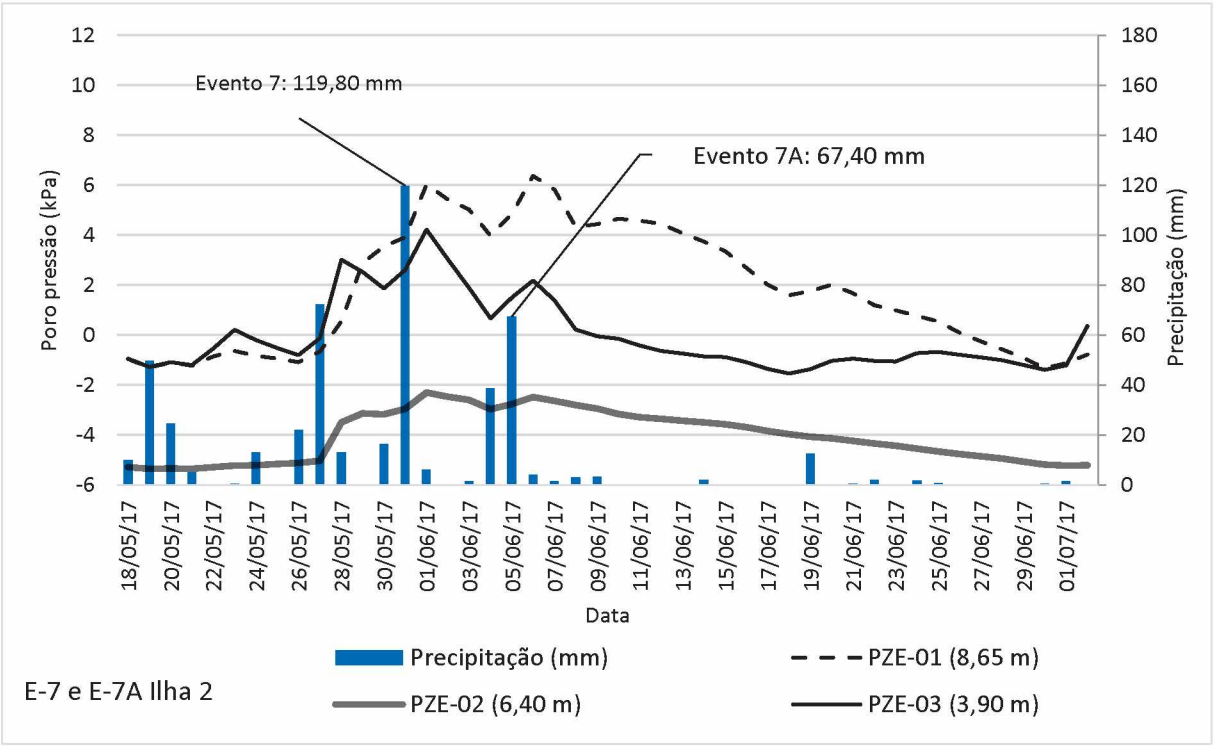
Os acréscimos de poro pressão dos piezômetros PZE-05 e PZE-06 foram de 0,29 kPa e 0,26 kPa, que são valores inferiores à precisão do instrumento, portanto, foram desconsiderados para esta análise.

Ferreira et al. (2018) analisaram as chuvas antecedentes aos eventos 4 e 5 e identificaram que a diferença de resposta dos instrumentos entre os eventos pode ser justificada pela diferença no acumulado de chuva nos dias anteriores. Enquanto no evento 4 o acumulado para os 7 dias anteriores foi de 40 mm para o evento 5 foi de 100 mm.

Os eventos 7 e 8 foram desdobrados em 7 e 7A e em 8 e 8A em função da pouca influência dos eventos 7 e 8 nos instrumentos.

No evento 7 para a ilha 2, houve influência nos instrumentos, porém o evento posterior chamado de evento 7A, apesar de ter menor precipitação, elevou o valor de poro pressão no PZE-01 além do pico gerado pelo evento 7. A Figura 66 apresenta o diagrama de frequência para esses eventos.

FIGURA 66 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS EVENTOS 7 E 7A NA ILHA 2.



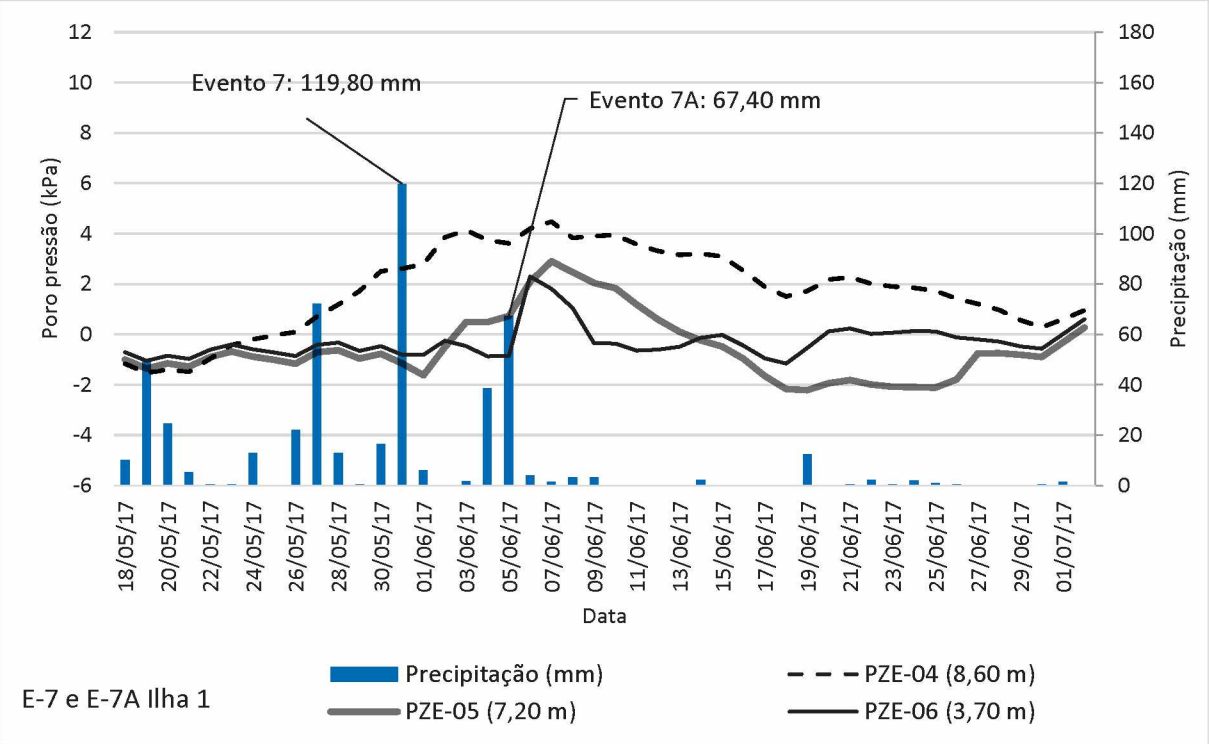
FONTE: O autor

Para os instrumentos da ilha 1, o evento 7 gerou um acréscimo de poro pressão de 1,62 kPa e 1,25 kPa e picos de 4,12 kPa e 0,48 kPa para os PZE-04 e

PZE-05, respectivamente. O acréscimo de poro pressão do PZE-06 foi menor que a precisão do instrumento e, portanto, foi desconsiderado.

A Figura 67 apresenta o diagrama de frequência para essas leituras da ilha 1.

FIGURA 67 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS EVENTOS 7 E 7A NA ILHA 1.

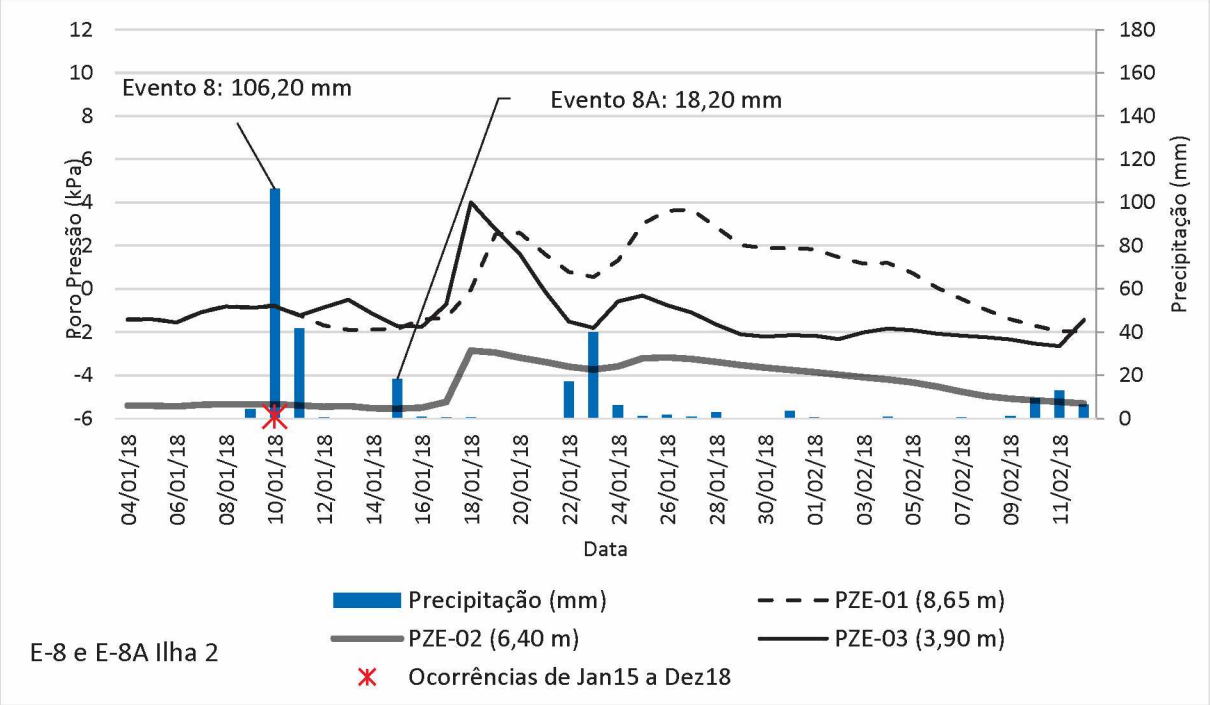


FONTE: O autor

A Figura 68 apresenta os eventos 8 e 8A para a ilha 2. O evento 8 do dia 10/01/2018, com 106,20 mm de precipitação, gerou acréscimos de poro pressão nos valores de 0,07 kPa, 0,01 kPa e 0,37 kPa nos PZE-01, PZE-02 e PZE-03, que são valores menores ou muito próximos da precisão dos instrumentos. Portanto, apesar de haver registro de escorregamentos na região neste dia, considera-se nesta análise que não houve efeitos sobre os piezômetros em função deste evento.

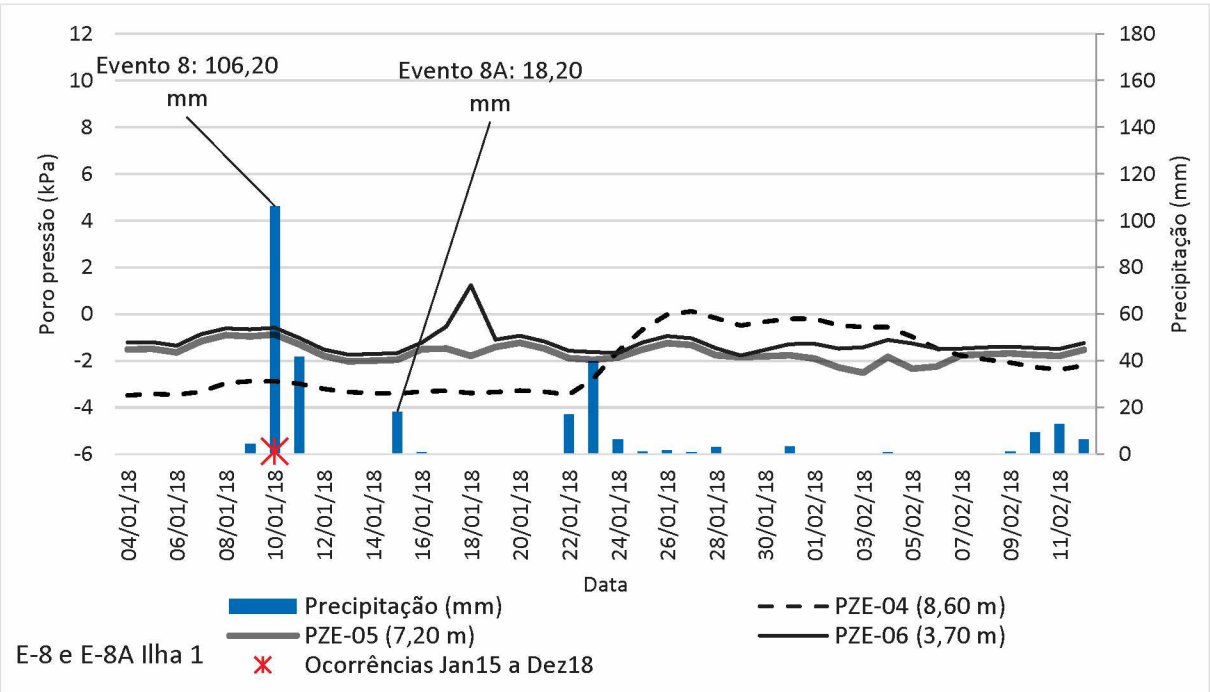
A Figura 69 apresenta os eventos 8 e 8A para a ilha1. Assim como na ilha 2, o evento 8 não influenciou os registros de poro pressão nos piezômetros e no evento 8A, apenas os PZE-05 e PZE6 sofreram acréscimos de poro pressão e de pequena magnitude.

FIGURA 68 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS EVENTOS 8 E 8A NA ILHA 2.



FONTE: O autor

FIGURA 69 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS EVENTOS 8 E 8A NA ILHA 1



FONTE: O autor

Analisando os eventos 7, 7A, 8 e 8A, identifica-se diferenças significativas. No dia 10/01/2018 (evento 8) houve um acumulado de 106,20 mm com registros de

chuvas em 22 horas e com uma intensidade média de 4,83 mm/h, enquanto no dia 15/01/18 (evento 8A) houve um acumulado de 18,20 mm em duas horas, com uma intensidade média de 9,10 mm. Por outro lado, o evento 7A, com intensidade de chuva semelhante ao do evento 8, gerou acréscimos de poro pressão. Além do acumulado diário ser diferente, o maior acumulado horário também é diferente. No evento 8A o maior acumulado horário é de 14,2 mm, enquanto no evento 8 é de 52,6 mm, o que poderia indicar que a distribuição da chuva ao longo do dia influenciaria o impacto no acréscimo de poro pressão. Entretanto no evento 5 do dia 13/04/2016, o maior acumulado horário foi de 51,0 mm e este foi um dos eventos com maior acréscimo de poro pressão.

A TABELA 8 e a TABELA 7 apresentam as medidas de acréscimo de poro pressão, tempo para atingir o pico de poro pressão após o evento e tempo estimado para dissipação do acréscimo de poro pressão. Observa-se uma grande dispersão dos dados e ausência de tendências claras uma vez que chuvas de grande acumulado não geram necessariamente os maiores acréscimos de poro pressão e tampouco é possível estabelecer uma relação clara com a intensidade ou duração da chuva

Os diagramas de frequência e os gráficos de dissipação das poro pressões para todos os eventos são apresentados integralmente nos anexos.

O apresenta um resumo para as observações de atraso para atingir os picos de poro pressão e tempo para dissipação do excesso de poro pressão

QUADRO 15 - RESUMO DOS TEMPOS PARA PICO E DISSIPAÇÃO DE PORO PRESSÃO.

Instrumento	Tempo para atingir pico de poro pressão (dias)		Tempo para dissipar acréscimo de poro pressão (dias)	
	Menor	Maior	Menor	Maior
PZE-01 (8,65 m)	1	5	2	14
PZE-02 (6,40 m)	1	3	3	23
PZE-03 (3,90 m)	1	3	1	10
PZE-04 (8,60 m)	2	8	1	16
PZE-05 (7,20 m)	1	4	1	5
PZE-06 (3,70 m)	0	4	1	5

FONTE: O autor

TABELA 7 - ACRÉSCIMOS DE PORO PRESSÃO, TEMPO PARA PICO DE PORO PRESSÃO E TEMPO ESTIMADO PARA DISSIPAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE PORRO-PRESSÃO PARA A ILHA 2

Piezômetros	Dados dos eventos	Eventos									
		1	2	3	4	5	6	7	7A	8	8A
	Data	03/04/2013	11/01/2014	04/11/2015	25/03/2016	13/04/2016	25/10/2016	31/05/2017	05/06/2017	10/01/2018	15/01/2018
	Precipitação no dia (mm)	155,20	121,40	96,00	238,60	189,20	123,00	119,80	67,40	106,20	18,20
	Horas com chuva (h)	17,00	9,00	24,00	18,00	11,00	20,00	21,00	14,00	22,00	2,00
	Intensidade média (mm/h)	9,13	13,49	4,00	13,26	17,20	6,15	5,70	4,81	4,83	9,10
PZE-01 (8,65 m)	PP dia anterior (kPa)	0,94	-1,20	6,79	-0,62	-1,34	-1,04	3,55	3,97	-0,85	-1,88
	PP máxima (kPa)	6,40	4,81	9,30	4,41	4,66	3,75	6,03	6,37	-0,78	2,59
	Acréscimo de PP (kPa)	5,46	6,01	2,51	5,02	6,01	4,78	2,48	2,40	0,07	4,47
	Tempo para o pico de PP (dias)	4	4	2	4	2	4	1	1		5
	Tempo para dissipação do Acréscimo de PP (dias)	8	11	3	10	14	5	4	2		4
PZE-02 (6,40 m)	PP dia anterior (kPa)	-4,88	-5,34	-3,39	-5,36	-5,46	-5,31	-3,18	-2,97	-5,34	-5,53
	PP máxima (kPa)	-2,80	-3,36	-2,79	-3,31	-2,81	-3,21	-2,31	-2,49	-5,33	-2,86
	Acréscimo de PP (kPa)	2,08	1,98	0,60	2,05	2,65	2,09	0,87	0,48	0,01	2,67
	Tempo para o pico de PP (dias)	2	3	1	2	1	2	1	1		3
	Tempo para dissipação do Acréscimo de PP (dias)	9	23	4	13	15	12	4	3		14
PZE-03 (3,90 m)	PP dia anterior (kPa)	-1,66	-1,11	-0,42	-0,98	-0,88	-0,93	1,85	0,67	-0,87	-1,15
	PP máxima (kPa)	3,71	1,70	1,21	2,51	4,64	1,24	4,22	2,18	-0,51	4,01
	Acréscimo de PP (kPa)	5,38	2,81	1,62	3,50	5,52	2,17	2,36	1,51	0,37	5,16
	Tempo para o pico de PP (dias)	1	2	1	1	0	2	1	1		3
	Tempo para dissipação do Acréscimo de PP (dias)	10	6	6	7	5	5	2	2		4

FONTE: O autor

TABELA 8 - ACRÉSCIMOS DE PORO PRESSÃO, TEMPO PARA PICO DE PORO PRESSÃO E TEMPO ESTIMADO PARA DISSIPAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE PORRO-PRESSÃO PARA A ILHA 1

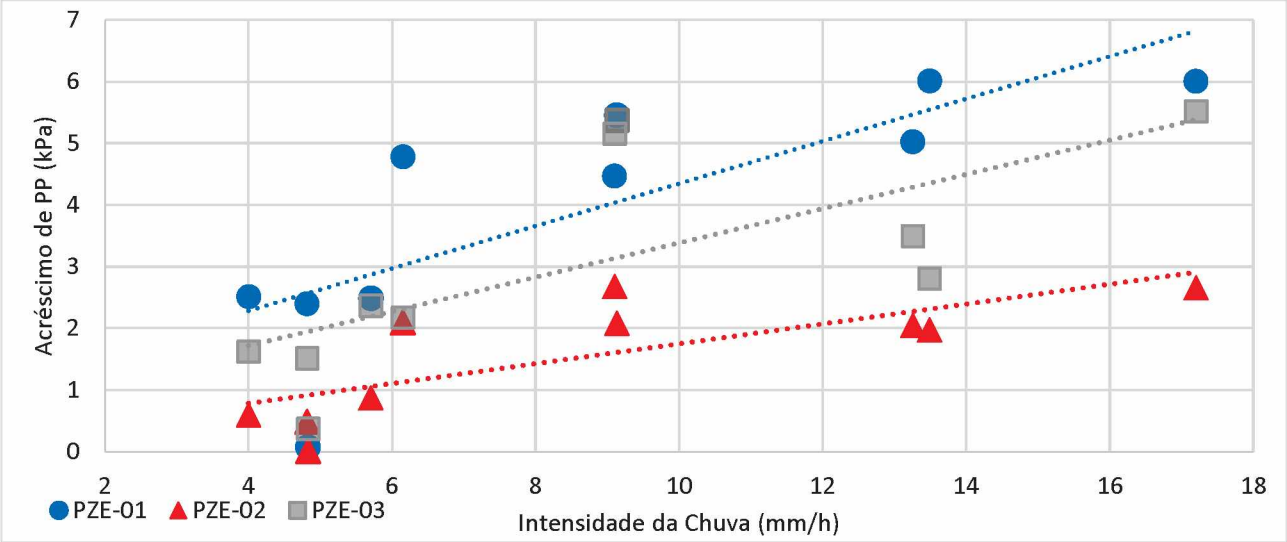
Piezômetros	Dados dos eventos	Eventos									
		1	2	3	4	5	6	7	7A	8	8A
	Data	03/04/2013	11/01/2014	04/11/2015	25/03/2016	13/04/2016	25/10/2016	31/05/2017	05/06/2017	10/01/2018	15/01/2018
	Precipitação no dia (mm)	155,20	121,40	96,00	238,60	189,20	123,00	119,80	67,40	106,20	18,20
	Horas com chuva (h)	17,00	9,00	24,00	18,00	11,00	20,00	21,00	14,00	22,00	2,00
	Intensidade média (mm/h)	9,13	13,49	4,00	13,26	17,20	6,15	5,70	4,81	4,83	9,10
PZE-04 (8,60 m)	PP dia anterior (kPa)	-1,40	-2,35	4,76	-0,39	-0,55	-2,14	2,51	3,75	-2,89	-3,39
	PP máxima (kPa)	1,05	2,56	6,16	1,52	2,81	1,37	4,13	4,48	-2,88	-3,41
	Acréscimo de PP (kPa)	2,45	4,91	1,40	1,92	3,36	3,51	1,62	0,73	0,00	0,00
	Tempo para o pico de PP (dias)	8	7	2	7	4	5	3	2	0	0
	Tempo para dissipação do Acréscimo de PP (dias)	8	16	4	8	8	12	6	1	0	0
PZE-05 (7,20 m)	PP dia anterior (kPa)	-0,53	-1,03	1,12	-1,00	-0,89	-1,07	-0,77	0,48	-0,95	-2,00
	PP máxima (kPa)	-0,43	-0,55	2,66	-0,71	-0,34	-0,28	0,48	2,90	-0,88	-1,24
	Acréscimo de PP (kPa)	0,10	0,47	1,54	0,29	0,55	0,79	1,25	2,41	0,07	0,77
	Tempo para o pico de PP (dias)		1	2		4	4	3	2		0
	Tempo para dissipação do Acréscimo de PP (dias)		3	5		1	2		5		
PZE-06 (3,70 m)	PP dia anterior (kPa)	-0,28	-0,57	-0,76	-0,70	-0,60	-0,71	-0,47	-0,88	-0,66	-1,71
	PP máxima (kPa)	-0,17	-0,09	-0,22	-0,45	-0,15	0,06	-0,25	2,30	-0,59	1,23
	Acréscimo de PP (kPa)	0,12	0,47	0,54	0,26	0,45	0,77	0,22	3,18	0,07	2,94
	Tempo para o pico de PP (dias)		1	2		0	4		1		3
	Tempo para dissipação do Acréscimo de PP (dias)		3	5		0	2		4		1

FONTE: O autor

A Figura 70 e a Figura 71 apresentam gráficos de dispersão comparando dados de acréscimo de poro pressão com a intensidade média diária das chuvas.

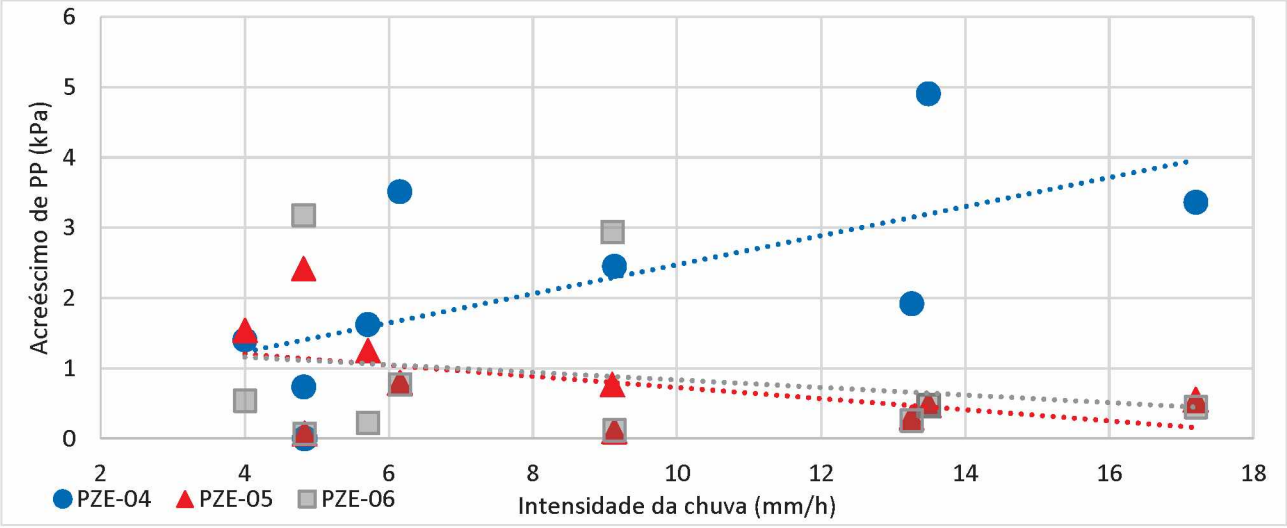
Para os instrumentos da ilha 2 percebe-se uma leve tendência de aumento dos acréscimos de poro pressão com a intensidade das chuvas e as relações são similares entre os piezômetros. Entretanto, na ilha 1 parece haver uma tendência similar para o PZE-04, mas para os PZE-05 e PZE-06 a tendência muda, e o acréscimo de poro pressão parece diminuir com o aumento na intensidade da chuva.

FIGURA 70 - ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À INTENSIDADE MÉDIA DAS CHUVAS PARA A ILHA 2



FONTE: O autor

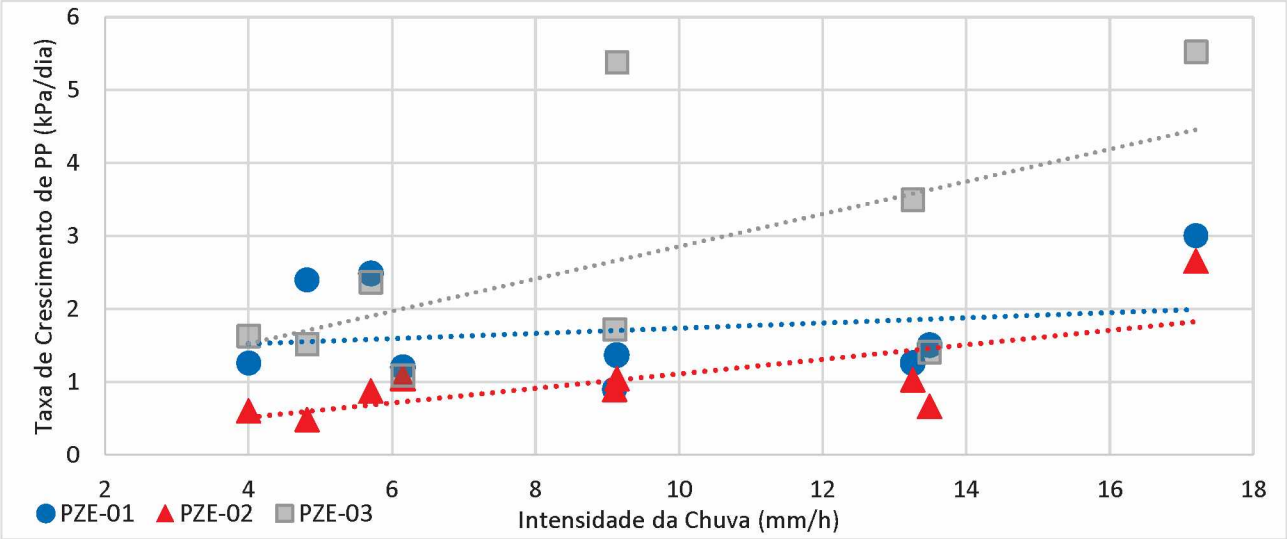
FIGURA 71 - ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À INTENSIDADE MÉDIA DAS CHUVAS PARA A ILHA 1



FONTE: O autor

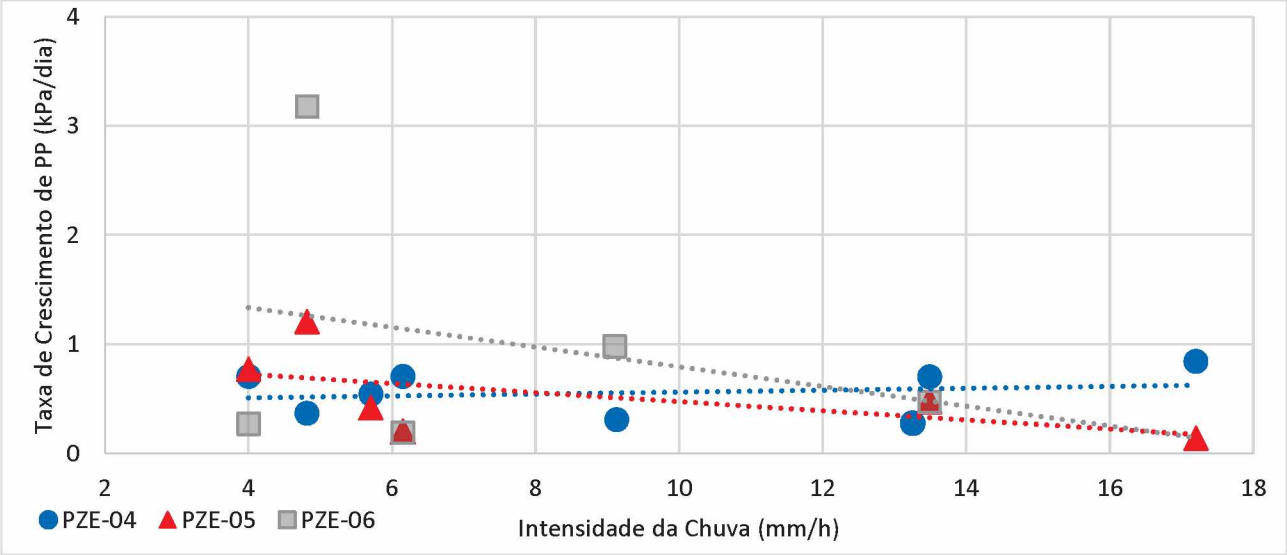
A Figura 72 e a Figura 73 apresentam análises similares para relação entre a taxa de acréscimo de poro pressão e a intensidade médias das chuvas. A taxa de acréscimo de poro pressão é a relação entre o valor de acréscimo de poro pressão e o número de dias para atingir o pico de poro pressão após o evento. Da mesma forma observa-se um aumento na taxa de acréscimo de poro pressão com a intensidade média de chuva para a ilha 2. Para ilha 1 essa tendência não é percebida.

FIGURA 72 - TAXA DE ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À INTENSIDADE MÉDIA DAS CHUVAS PARA A ILHA 2



FONTE: O autor

FIGURA 73 - TAXA DE ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À INTENSIDADE MÉDIA DAS CHUVAS PARA A ILHA 1



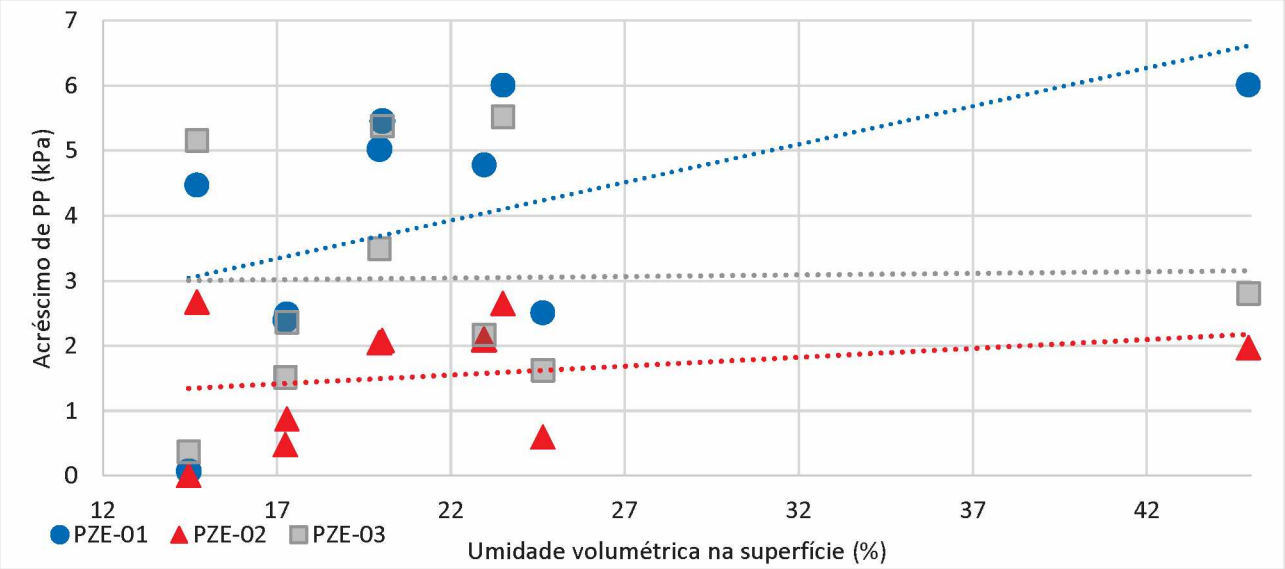
FONTE: O autor

Tendo em vista que os eventos escolhidos têm acumulados diários na casa dos 100 mm, esperava-se que essas tendências fossem diferentes, com o acréscimo de poro pressão aumentando com a redução da intensidade das chuvas. Uma vez que intensidades de chuva menores geram uma maior relação entre o que infiltra e o que flui superficialmente. (RAHARDJO et al., 2005; CUOMO e DELLA SALA, 2013).

Por outro lado, vários autores indicam que a condição de umidade anterior à chuva é determinante para a quantidade de chuva que infiltra (TSAPARAS et al., 2003; TAMI et al., 2004; RAHARDJO et al., 2005; LONDONO, 2006; CUOMO e DELLA SALA, 2013). Portanto, buscou-se relacionar os acréscimos de poro pressão com a condição de umidade no dia anterior a chuva na superfície.

Usando os parâmetros de ajuste para a CRAS apresentados por Pretto (2014) e conforme Figura 34, estimou-se os valores de umidade volumétrica em função das medidas de sucção realizadas nos instrumentos a 1m de profundidade, usando o modelo de Van Genutchen (1980). A Figura 74 e a Figura 75 apresentam essa relação para as ilhas 2 e 1 respectivamente.

FIGURA 74 - ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À UMIDADE NO DIA ANTERIOR NA ILHA 2

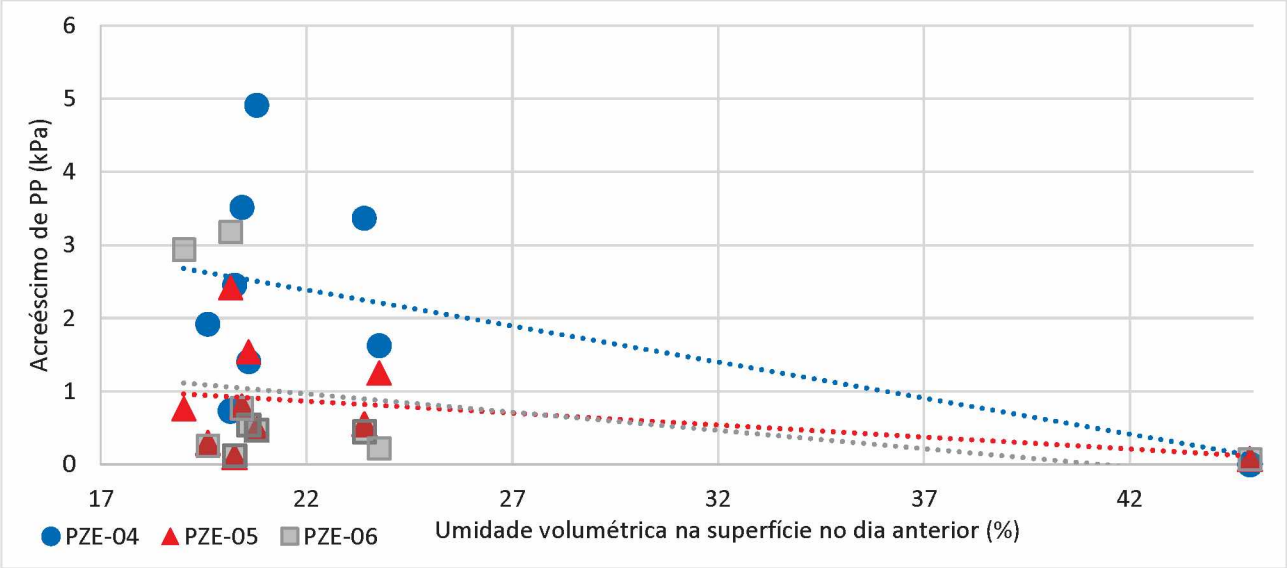


FONTE: O autor

Em relação a ilha 2, o acréscimo de poro pressão parece aumentar com o aumento na umidade do dia anterior e isso faria sentido, pois quanto maior a umidade, o coeficiente de permeabilidade não saturado fica mais próximo do coeficiente de permeabilidade saturado. Entretanto essa relação não é clara e a dispersão é muito grande. Ao analisar a

mesma relação para a ilha 1, observa-se que não há uma clara relação entre a umidade no dia anterior a 1m de profundidade e o acréscimo de poro pressão. Ou, ao menos por esta abordagem, não foi possível visualizar tal relação. Além disso, valores negativos de sucção levam a estimativas de umidade que distorcem a análise.

FIGURA 75 - ACRÉSCIMO DE PORO PRESSÃO EM RELAÇÃO À UMIDADE NO DIA ANTERIOR NA ILHA 1



FONTE: O autor

Uma possível explicação para tal observação é que os piezômetros estão instalados a grandes profundidades, entre 3,70 m e 8,65 m e, portanto, não seriam afetados diretamente pela infiltração.

Alguns autores relatam que as profundidades nas quais conseguiram relacionar medidas de poro pressão ou sucção com a infiltração foram de no máximo 3,5m (LI et al, 2005; ZHAN et al, 2007). Entretanto, Joly (2018) para determinado evento pluviométrico no Morro do Boi, sugere que a frente de umedecimento chegara a 6,40 m de profundidade e confirma essa possibilidade comparando as precipitações e intensidades médias registradas no evento com as necessárias para atingir tal profundidade segundo o modelo teórico de Pradel e Raad (1993).

Todavia, essa profundidade de 6,40 m é atrelada ao PZE-02, que não registra valores positivos de poro pressão e tem suas variações em concordância com as do PZE-01 que está a 8,65 m. Levando em consideração a não observância de tendências que possam correlacionar diretamente as variações de poro pressão com as condições relacionadas a infiltração (Intensidade da chuva, acumulado de chuva e umidade na

superfície), supõem-se que as variações nas leituras de poro pressão registradas nos piezômetros do Morro do Boi são afetadas pelas precipitações, porém não diretamente pela infiltração e sim por fluxos subsuperficiais, uma vez trata-se de uma encosta com razoável inclinação e com solos altamente drenantes, além da presença de fraturas e descontuidades.

Ao analisar a posição dos instrumentos nas Figuras 38 e 39, observa-se que os PZE-01, PZE-02, PZE-04 e PZE-06 estão localizados em interfaces entre camadas e especialmente os piezômetros mais profundos estão na interface com a rocha sã. Inclusive, Gerscovich et al. (2006) apontam o desenvolvimento de poro-pressões positivas, geradas por fluxos na interface entre rocha e solo residual, como a possível causa para um escorregamento no Rio de Janeiro em 1988. No mesmo sentido, Zhan et al. (2011) aponta que quando há interface entre camadas granulares, pode haver uma infiltração preferencial nessa interface e a geração de um nível freático em cotas elevadas.

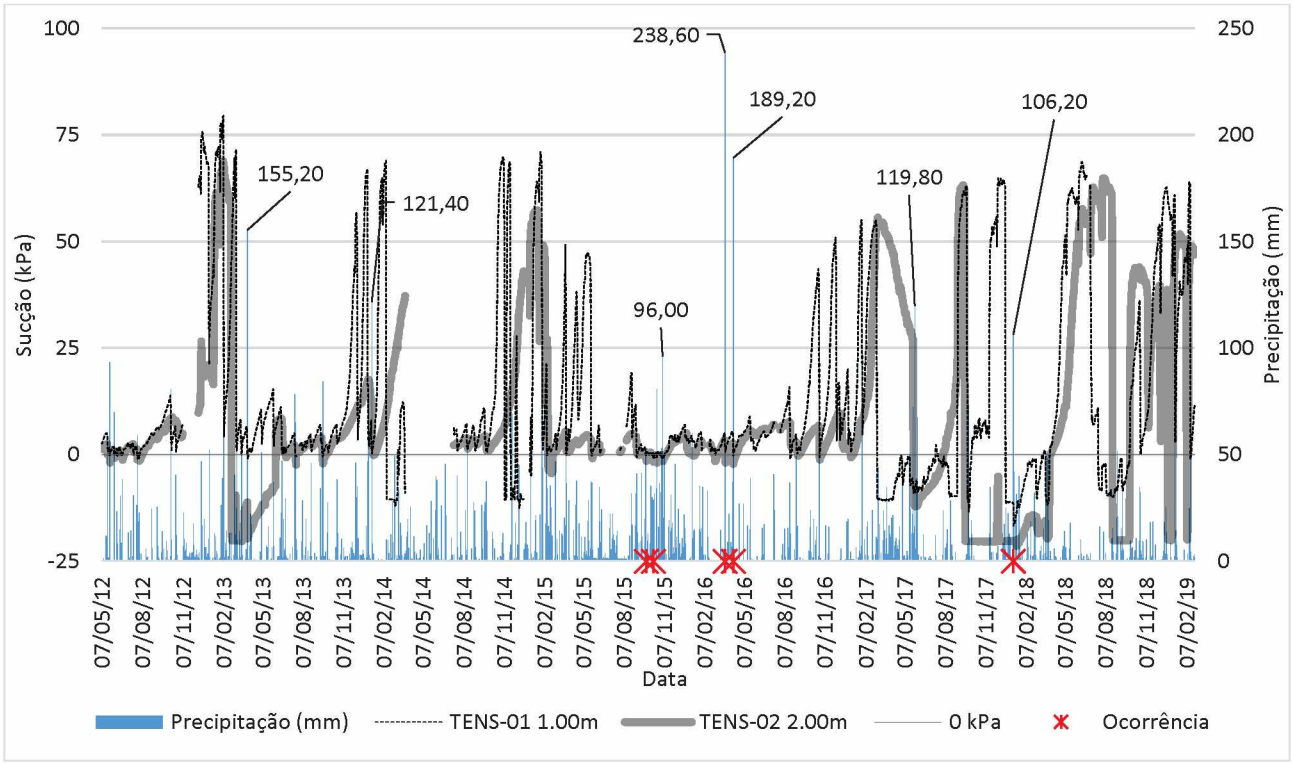
Essa abordagem também ajuda a explicar o atraso de alguns dias para atingir os picos de poro pressão e a diferença de acréscimos de poro pressão entre a ilha 1 (superior) e a ilha 2 (inferior).

4.3 MEDIDAS DE SUCÇÃO

Nesta seção é analisada a série histórica das medidas de sucção para o período compreendido entre os dias 07/05/2012 e 27/05/19. As medidas foram realizadas através das leituras dos 8 tensiômetros instalados no Morro do Boi. Estes tensiômetros estão divididos em 3 ilhas de instrumentação, conforme a Figura 37 e o QUADRO 6.

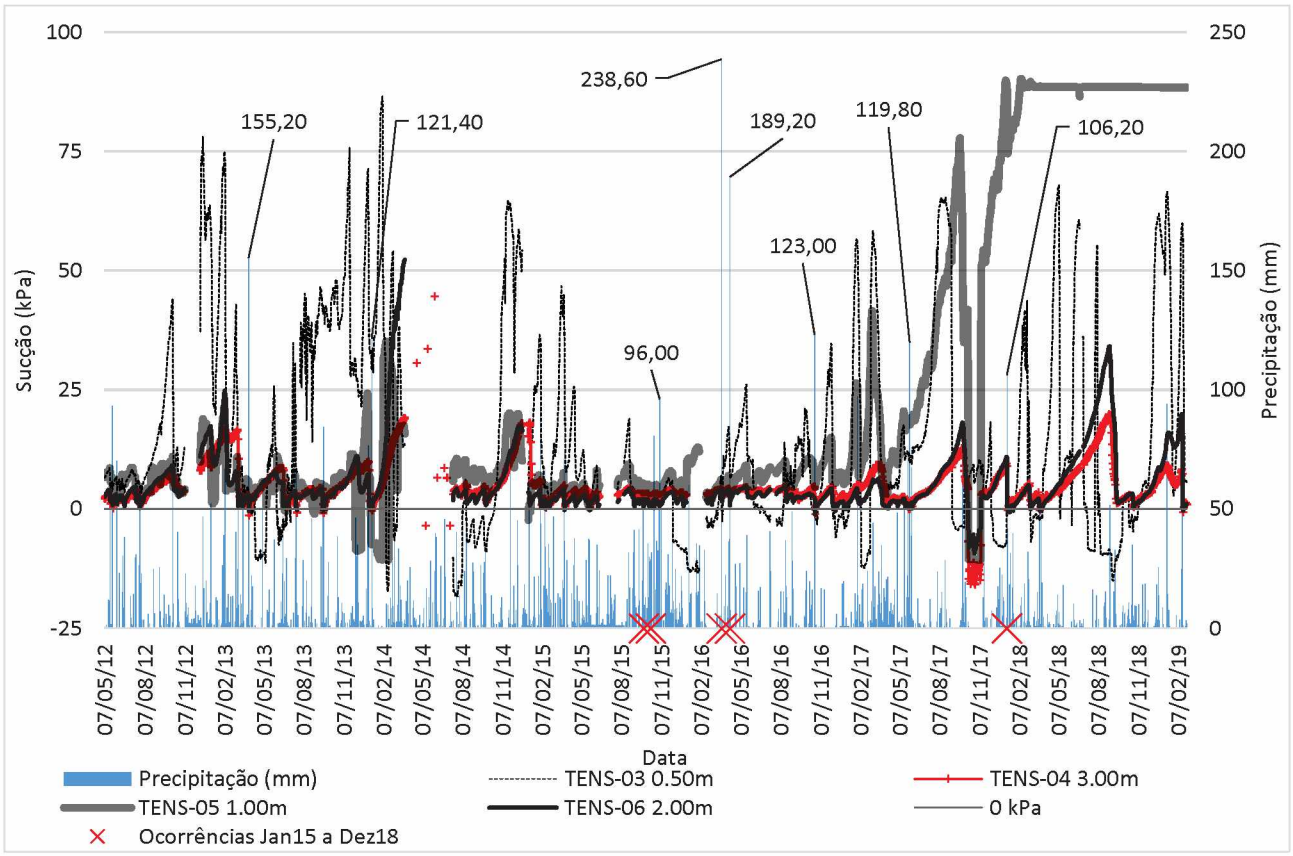
Para as análises, os diagramas de frequência das leituras foram agrupados por ilha de instrumentação. As Figuras 76 a 78 apresentam os diagramas de frequência para as 3 ilhas de instrumentação e para todo o período analisado. Nesses diagramas são destacados os eventos analisados na seção anterior através da indicação do valor de acumulado diário de chuva para cada evento e são destacados os registros de escorregamentos na região indicados por Salah et al. (2019). É inserida uma linha horizontal que indica a condição de 0 kPa.

FIGURA 76 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 3



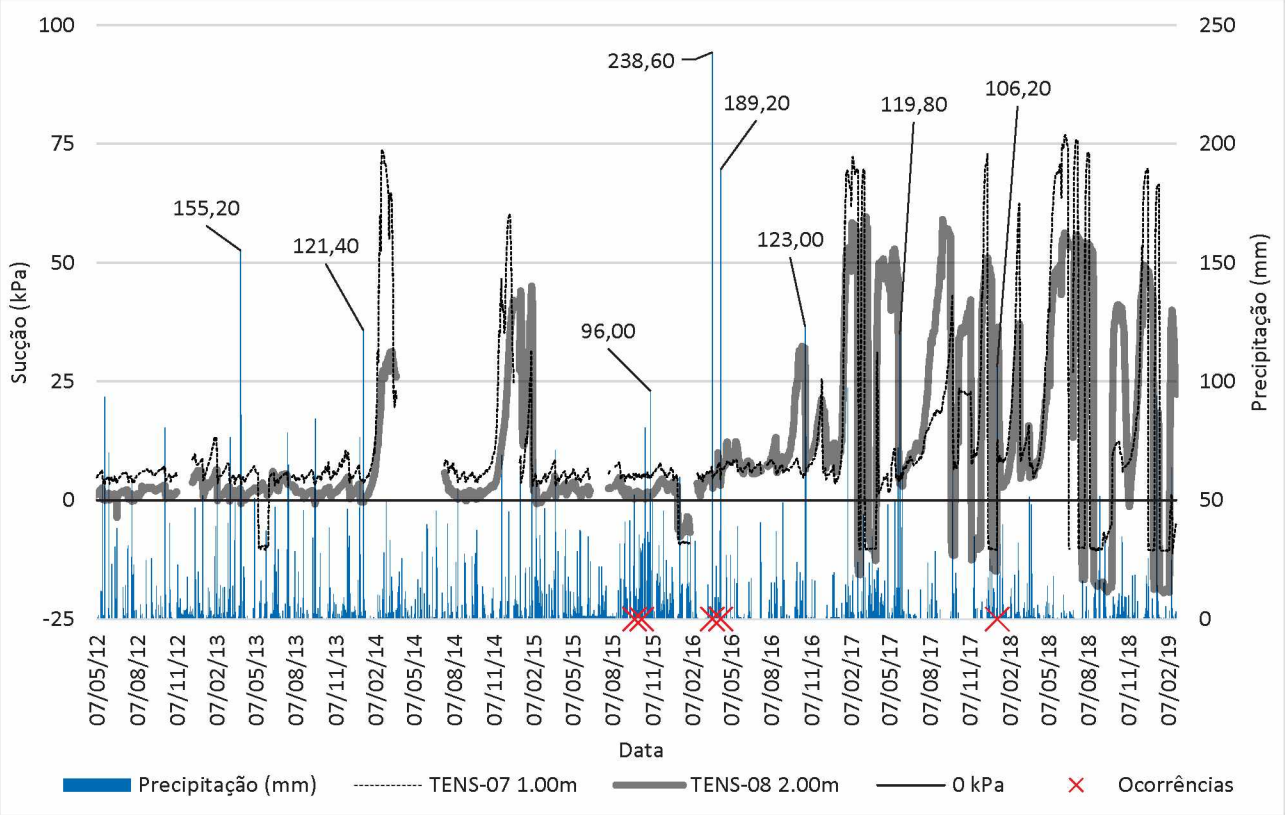
FONTE: O autor

FIGURA 77 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 2



FONTE: O autor

FIGURA 78 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 1



FONTE: O autor

Observa-se que em alguns intervalos de tempo (alguns meses) os valores de sucção ficam próximos ao patamar de 0 kPa. Estes intervalos alternam com picos de sução e alguns registros de sução negativa.

O período entre janeiro de 2015 e outubro de 2016 parece demostrar essa observação de forma clara. A maior parte dos registros ficam próximos do patamar de 0 kPa e com picos raramente passando de 15 kPa. Neste período são destacadas 4 datas com registros de escorregamentos, sendo que em apenas uma delas, no dia 13/04/2016 foram registrados 9 registros de escorregamentos na região, segundo Salah et al. (2019).

Diferentemente das leituras de poro pressão positiva, as magnitudes e variações dos valores de sução foram significativas, atingindo o limite das leituras dos tensiômetros. Quadro 16 apresenta os valores máximos, mínimos, média e desvio padrão das leituras observadas.

Segundo alguns autores (LIM et al., 1996; RIDLEY et al.,2003a; SESTREM, 2012), há uma diferença em relação a leitura, gerada pela coluna d'água presente no tubo do tensiômetro, que deve ser considerada. Segundo Lim (1996) e Sestrem (2012) deve-se

descontar o valor de poro pressão equivalente à coluna d´água no tubo do tensiômetro do limite máximo para cavitação.

QUADRO 16 - VALORES MEDIDOS MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE SUÇÃO

ψ (kPa)	TENS-01 (1,0 m)	TENS-02 (2,0 m)	TENS-03 (0,5 m)	TENS-04 (3,0 m)	TENS-05 (1,0 m)	TENS-06 (2,0 m)	TENS-07 (1,0 m)	TENS-08 (2,0 m)
Max	79,46	68,84	86,54	44,60	90,20	64,40	76,90	70,40
Min	-16,73	-21,44	-18,31	-15,78	-10,63	-9,31	-11,30	-19,51
Média	13,33	9,01	14,81	4,97	25,28	5,59	11,77	11,53
DP	22,35	21,40	21,37	4,54	32,69	7,52	18,74	18,06

FONTE: O autor

Esse limite, como já abordado no item 2.3.2, varia de 80 a 90 kPa. Adotando o limite como 90 kPa e descontando a influência da coluna d'água, apresenta-se no Quadro 17 os limites práticos de leituras para os tensiômetros. Do limite de 90 kPa, subtrai-se a pressão equivalente a coluna d'água do tubo do tensiômetro, ou seja, a sua profundidade multiplicado pelo peso específico da água. Os tensiômetros TENS-03 e TENS-08 registram suas maiores leituras ligeiramente superiores a estes limites, entretanto sem apresentarem comportamento que possam indicar alguma falha. O TENS-05, entretanto, passa bastante o limite mencionado acima e apresenta um comportamento diferenciado no final do período, quando atinge as leituras mais altas, indicando uma possível ocorrência de cavitação.

QUADRO 17 - LIMITES PRÁTICOS DOS TENSIÔMETROS

ψ (kPa)	TENS-01 (1,0 m)	TENS-02 (2,0 m)	TENS-03 (0,5 m)	TENS-04 (3,0 m)	TENS-05 (1,0 m)	TENS-06 (2,0 m)	TENS-07 (1,0 m)	TENS-08 (2,0 m)
Capacidade Prática	80,19	70,38	85,09	60,57	80,19	70,38	80,19	70,38

FONTE: O autor

4.3.1 Avaliação da correlação entre precipitação e medidas de sucção.

Observa-se coerência na relação das medidas de sução com os registros de precipitação, pois quando ocorrem os maiores registros de precipitação não há o desenvolvimento de sucção. Entretanto, não é possível estabelecer uma correlação direta entre as leituras de sucção e registros de precipitação, uma vez que, os coeficientes de correlação linear obtidos foram baixos.

A TABELA 9 apresenta os resultados dos melhores arranjos obtidos para os valores de correlação linear. Os valores foram ainda menores do que para os piezômetros e a

imposição de atraso nas leituras também não gerou melhoras significativas nas correlações.

A mesma suposição usada para explicar a ausência de melhores correlações entre a chuva e as variações de poro pressão positiva pode ser usada para explicar também a ausência de correlações entre os registros de precipitação e a variação dos valores de sucção.

Ou seja, a relação da taxa de infiltração com a precipitação, a capacidade de absorção e o coeficiente de permeabilidade, que são todos parâmetros que definem o fluxo de entrada da água no solo, são muito variáveis e portanto o fluxo vertical de água no solo em função da chuva não depende apenas da precipitação e sim de toda uma condição do solo que vai desde a condição de umidade anterior até a histerese da CRAS.

TABELA 9 - MELHORES CORRELAÇÕES OBTIDAS ENTRE AS LEITURAS DOS TENSIÔMETROS E A PRECIPITAÇÃO

Instrumentos		**Com atraso**			**Sem atraso**		**Melhora Correlação com o atraso**
TENS	Profundidade (m)	Atraso (dias)	Acumulado (dias)	r	Acumulado (dias)	r	
1	1,00	1	15	-0,31	15	-0,31	-0,54%
2	2,00	2	45	-0,23	45	-0,23	0,13%
3	0,50	4	15	-0,16	21	-0,15	5,49%
4	3,00	1	45	-0,29	45	-0,29	0,50%
5	1,00	1	45	-0,36	45	-0,36	-0,26%
6	2,00	1	45	-0,30	45	-0,31	-0,54%
7	1,00	2	45	-0,26	45	-0,26	0,46%
8	2,00	1	30	-0,28	30	-0,28	0,56%

Valores diferentes de 0 com nível de significância, alfa = 0,05

FONTE: O autor

4.3.2 Análise qualitativa do desenvolvimento da sucção.

Como pode ser observado nos diagramas das Figuras 76 a 78, as datas com registro de maior acumulado diário de chuva, cujos trechos foram analisados anteriormente, não representam períodos interessantes para análise, uma vez que não há desenvolvimento significativo de sucção nos intervalos de tempo aos quais esses registros pertencem. Portanto, escolheu-se alguns intervalos, onde há registro dos maiores valores de sucção e onde podem ser observadas algumas características do comportamento da sucção. Observa-se também que as ilhas 3 e 2 apresentam picos de sucção desde o início do

monitoramento até o final do período analisado, enquanto a ilha 1 começa a apresentar elevações mais significativas no valor da sucção a partir de 2014.

Com base na análise de 23 intervalos, foram identificados 8 padrões de comportamento que podem ser observados nas três ilhas com maior ou menor frequência. São os seguintes:

A. Súbito crescimento nos valores de sucção.
B. Súbita queda nos valores de sucção.
C. Atraso nas leituras entre instrumentos em relação à queda da sucção.
D. Reduções lentas nos valores de sucção.
E. Crescimento lento nos valores de sucção.
F. Comportamento não esperado.
G. Desenvolvimento de um patamar de sucção positiva.
H. Quedas ou perda de sucção sem registro de precipitação.

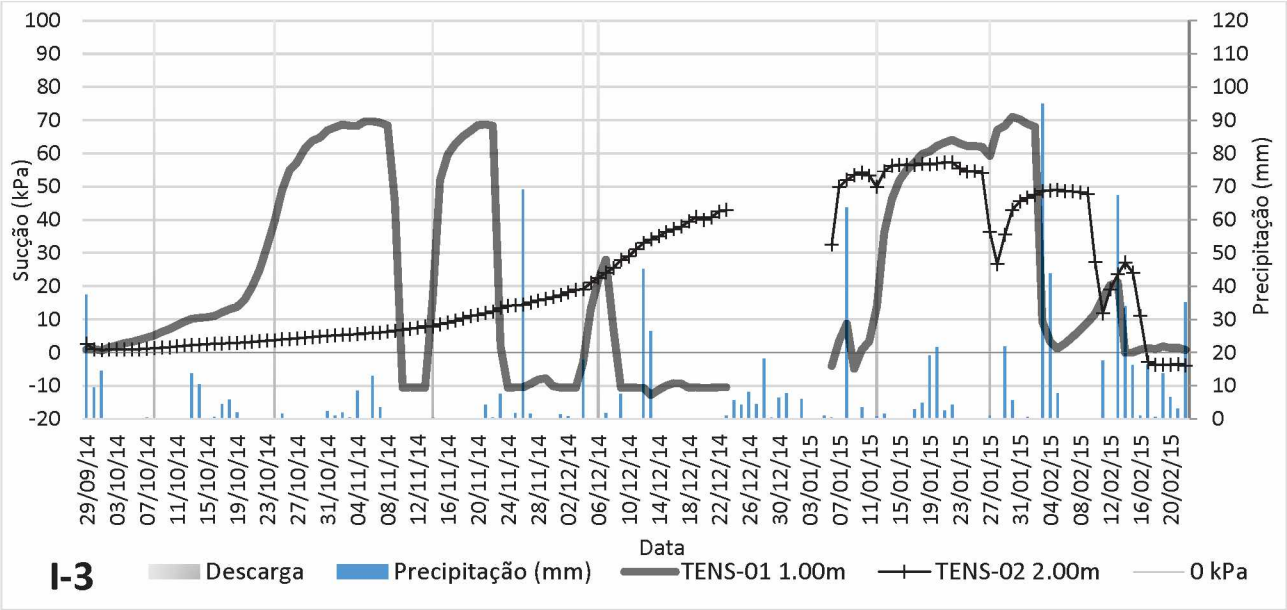
É apresentado a seguir um exemplo para cada padrão observado e nos anexos são apresentados os demais intervalos analisados. Nas figuras foi inserida uma linha horizontal para destacar o patamar de 0 kPa e as barras cinzas, chamadas de "descarga" indicam as datas das leituras de NA, onde possivelmente é feito o preenchimento do reservatório dos tensiômetros. A indicação "I-n" representa o intervalo analisado, com "n" variando de 1 a 23.

A. Súbito crescimento nos valores de sucção.

Este comportamento não é esperado, uma vez que, se espera que as sucções se desenvolvam de forma lenta, no processo de drenagem ou secagem do solo, que ao ser umedecido novamente perde a sucção de forma rápida. (TAMI et al., 2004). Esse comportamento de crescimento súbito foi observado em todas as ilhas de instrumentação e em grande parte dos intervalos observados.

Na Figura 79, o registro foi para o TENS-01 em dois momentos, entre os dias 13/11/2014 e 15/11/2014, com uma variação de 62,58 kPa em dois dias e entre os dias 11/01/2015 e 14/01/2015 com crescimento de 42,91 kPa em 3 dias. Observa-se neste exemplo a formação de um patamar negativo antes da subida rápida e que esse comportamento pode ser associado ao preenchimento dos reservatórios do tensiômetro.

FIGURA 79 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 3 DE 29/09/2014 A 22/02/2015



FONTE: O autor

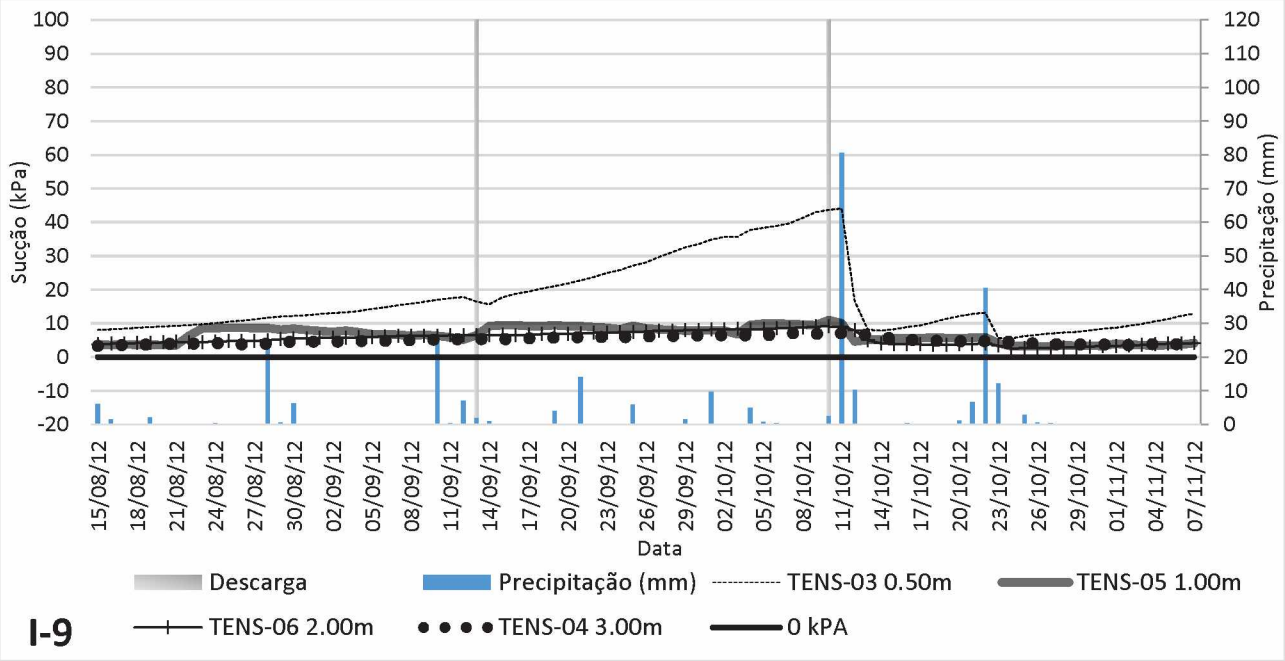
Assim como esse comportamento de subida rápida não é esperado, registros de valores baixos de sucção em períodos secos e registro de sucção negativa para este instrumento também não o são. Levando em consideração que em muitas observações se percebe a coincidência com a data onde possivelmente é feito o preenchimento do reservatório do tensiômetro, pode-se supor que este comportamento dos instrumentos não reflete a realidade e que este comportamento seja em função de alguma falha no instrumento, devido à difusão de ar ou perda de água no reservatório. Ridley et al. (2003a) argumentam que o problema da difusão de ar pode fazer o tensiômetros apresentarem leituras que sugerem um umedecimento. Isso explicaria as leituras negativas ou baixas, mesmo em períodos secos.

B. Súbita queda nos valores de sucção.

Esse comportamento é o esperado para as leituras de sucção e ocorre, pois, a permeabilidade dos solos granulares cresce em várias ordens com a variação da umidade. É observado em todas os intervalos analisados e ocorrem associados à um registro de precipitação. Entretanto, não foi possível identificar qual a magnitude de precipitação capaz de gerar tais quedas na sucção, uma vez que se observa quedas abruptas de sucção em todos os instrumentos e após registros de precipitação, antecedidos ou não por outros

registros e que variam de 0,2 mm a 123,0 mm. Segundo Tami et al. (2014), espera-se que as sucções se desenvolvam de forma gradual, devido à perda de condutividade hidráulica com o ganho de sucção e que caiam de forma rápida, devido ao ganho de condutividade hidráulica com o umedecimento. Na Figura 80 pode ser observado esse comportamento para o TENS-03, onde apresenta um ganho de aproximadamente 30 kPa em cerca de 60 dias e após uma chuva de 80,60 mm despenca de 44,04 kPa para 5,96 kPa em 3 dias.

FIGURA 80 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 2 DE 15-08-2012 A 07-11-2012



FONTE: O autor

C. Atraso nas leituras entre instrumentos em relação à queda da sucção.

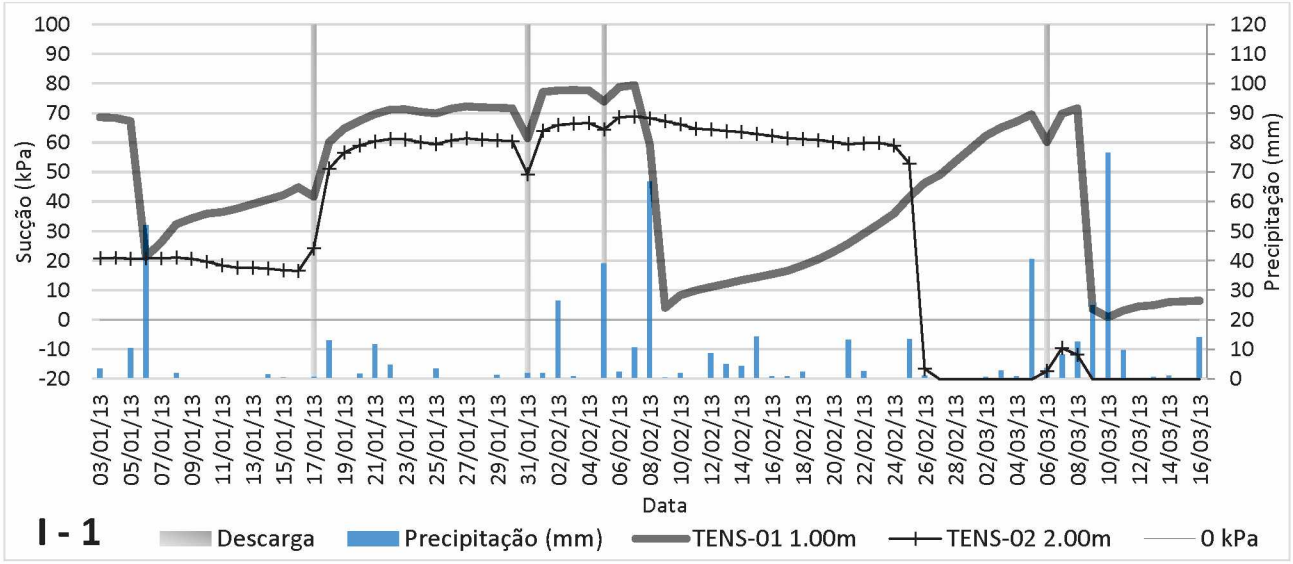
Seria esperado um atraso entre as quedas de sucção dos instrumentos mais profundos em relação as quedas de sucção dos instrumentos mais rasos. Supõe-se que após desenvolvido um patamar de sucção seria necessário que o fluxo de água gerado pela chuva, alcançasse as camadas mais profundas, após um intervalo de tempo.

Dos 23 intervalos analisados esse padrão foi identificado apenas em 6.

Na Figura 81 observa-se um atraso entre as quedas abruptas de sução do TENS-02 e do TENS-01. Esse atraso é de 17 dias. Entretanto não é possível afirmar que a queda abrupta do TENS-02 entre os dias 25/02/2013 e 26/02/2013 ocorreu em função da mesma precipitação do dia 08/02/2013 que possivelmente gerou a queda no TENS-01.

Após a precipitação de 66,8 mm do dia 08/02/2013 o TENS-02 apresenta um comportamento de queda suave até o dia 25/02/2013, quando seus valores de sucção despencam. Porém há registros de precipitação posteriores ao dia 08/02/2013 e no dia 25/02/2013 há um registro de 13,4 mm. Além disso, os valores de sucção do TENS-02 caem para um patamar negativo, não esperado. Portanto, não é possível afirmar que há realmente esse atraso e mesmo se essa queda observada no TENS-02 representa a realidade.

FIGURA 81 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 3 DE 03/01/2013 A 16/03/2013



FONTE: O autor

D. Reduções lentas nos valores de sucção.

As reduções lentas nos valores de sucção foram caracterizadas como aquelas de qualquer magnitude onde a diferença de sucção é dissipada em mais de 5 dias. Nos 23 recortes feitos nas series temporais, esse padrão foi identificado em 8 deles com 3 ocorrências na ilha 3, 4 na ilha 2 a 1 na ilha 1. As magnitudes dessas reduções foram em geral de uma ou mais dezenas de kPa, porém com mínimos sempre positivos.

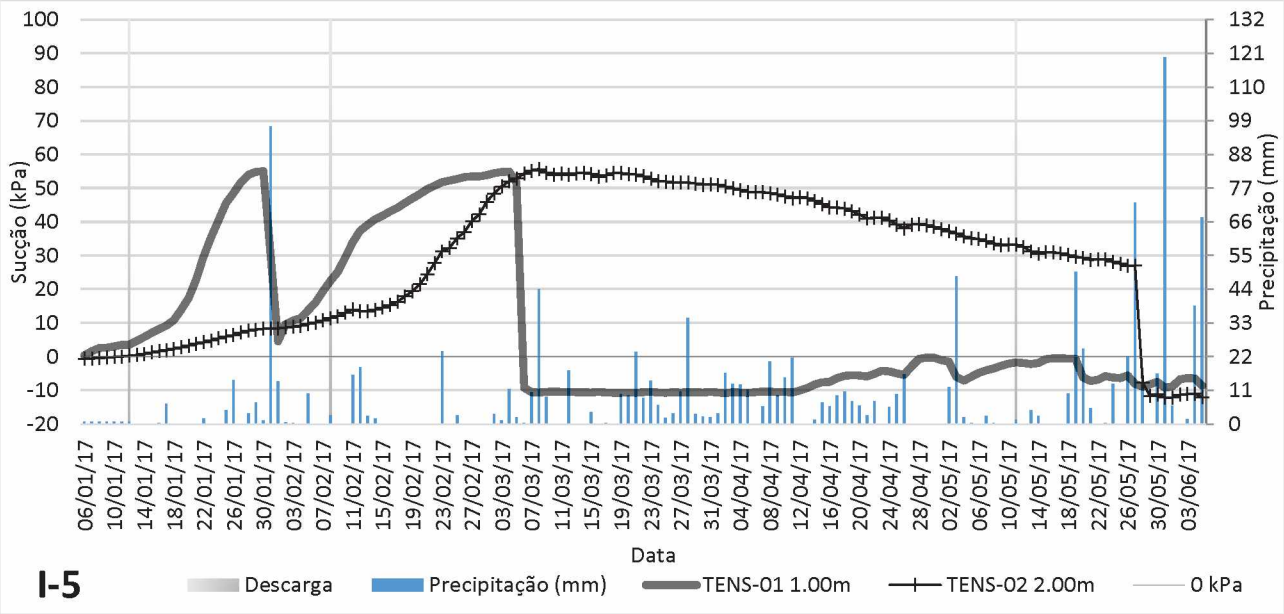
Identificou-se padrões com tempo de redução de 6 dias até 80 dias com taxas de redução de sucção variando de 0,36 kPa/dia em 80 dias a 3,94 kPa/dia em 12 dias.

Em todas as observações pôde-se associar as perdas de sucção à um registro de acumulado diário de precipitação no dia do início da queda ou no dia anterior. Observou-se também que no intervalo de tempo no qual ocorre a redução há ocorrências de chuvas

posteriores, porém em geral de pequena magnitude e com medias diárias variando de 1,24 mm/dia a 8,40 mm/dia.

Na Figura 82 identifica-se para o TENS-02, uma queda de 28,65 kPa em 80 dias. No dia 08-03-2017 o instrumento leu 55,63 kPa e após um registro de chuva de 44 mm nesse dia inicia um processo lento de queda de 0,36 kPa/dia, até que no dia 27-05-2017, um registro de 72,2 mm de chuva faz a sucção despencar para um patamar negativo. Nesse período de 80 dias a média diária de precipitação foi de 8,4 mm/dia.

FIGURA 82 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 2 DE 03/10/2013 A 23/02/2014



FONTE: O autor

Entre as 8 observações desse padrão de redução lenta, 5 delas antecederam reduções abruptas, o que também converge com o que sugerem Ridley et al. (2003b) e Tami et al. (2004), que a sucção decresce rapidamente após um processo de umedecimento que faz a permeabilidade aumentar rapidamente.

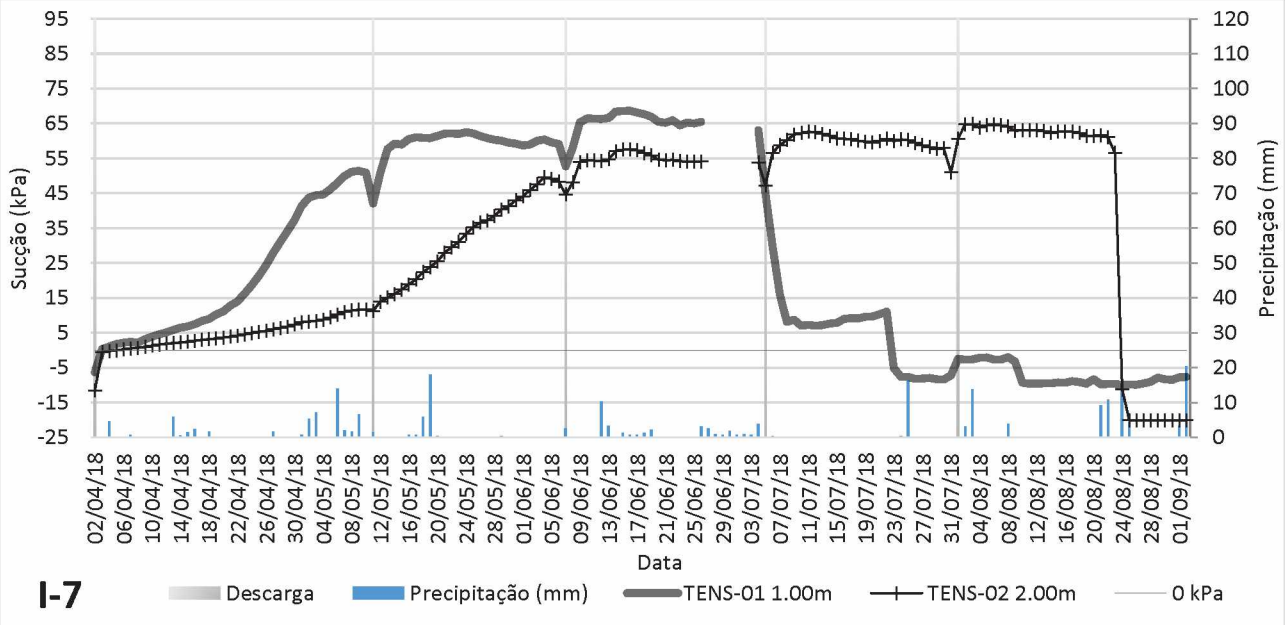
E. Crescimento lento nos valores de sucção.

Esse é um comportamento esperado e presente em todas as 23 observações. Como citado anteriormente, a permeabilidade varia com a umidade ou grau de saturação, e à medida que a água vai sendo drenada, a permeabilidade reduz em várias ordens, reduzindo a velocidade de drenagem. Além disso, sensores mais rasos estão sujeitos ao

processo de evapotranspiração. Para o caso do Morro do Boi, Joly et al. (2014) conseguiram boas correlações entre os valores de sucção do TENS-03 (0,50m) e o potencial de evapotranspiração, calculado através do método empírico de Allen et al. (1998).

Portanto os instrumentos mais profundos, sujeitos apenas a drenagem, apresentam desenvolvimento de sucção mais lento, enquanto os instrumentos mais rasos, sujeitos à drenagem e à evapotranspiração apresentam crescimentos mais rápidos, mas não necessariamente, abruptos. Leung e Ng (2013b), identificaram que o efeito da evapotranspiração pode chegar a duas vezes a profundidade das raízes e identificaram valores de até 200 kPa. Na Figura 83, por exemplo, percebe-se essa diferença entre os TENS-01 a 1,0 m e o TENS-02 a 2,0 m.

FIGURA 83 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 1 DE 02/04/2018 A 02/09/2018



FONTE: O autor

F. Comportamento não esperado.

Chama-se aqui de comportamento não esperado, ou errático, o padrão de leituras que não seriam esperados para os instrumentos e que podem indicar alguma falha na leitura. Um possível comportamento errático já foi citado, que é o aumento abrupto nos valores de sucção e destaca-se agora os patamares de valores constantes e patamares de

valores negativos. Esses padrões foram identificados em 11 das 23 observações, ocorrem nas 3 ilhas e em todos os instrumentos e podem ser observados no exemplo da Figura 84.

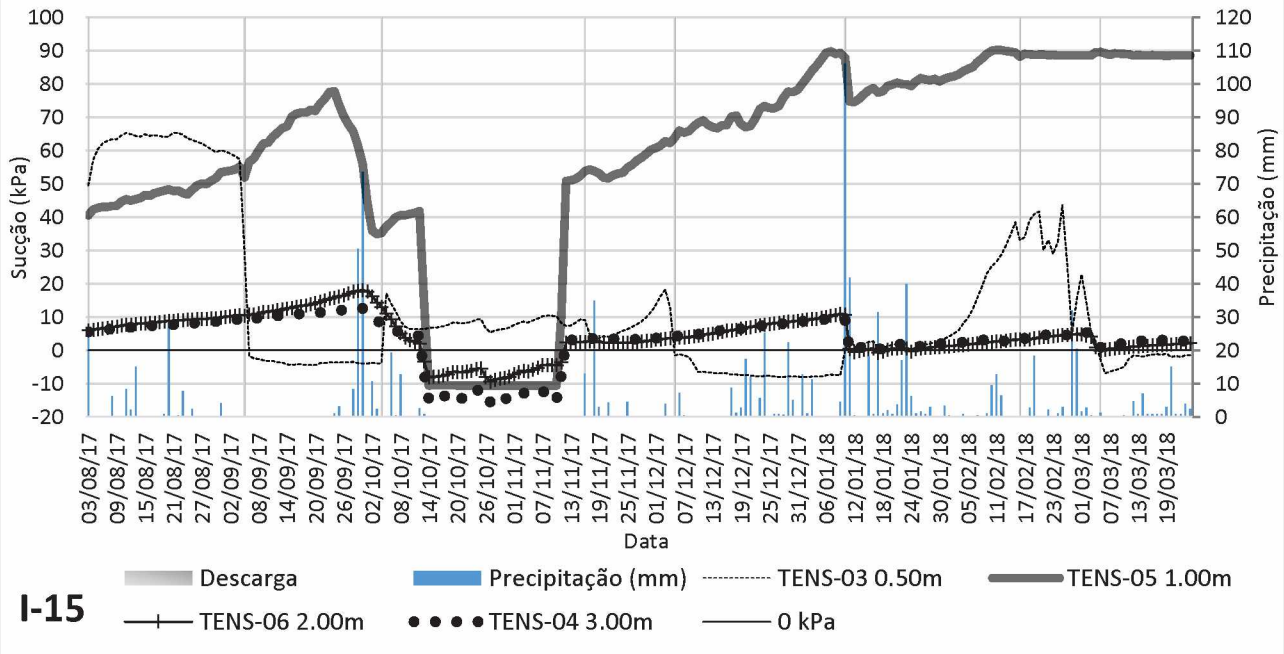
A formação de um patamar negativo de valores de sucção não é esperada, uma vez que a capacidade de leitura do modelo instalado no Morro do Boi é de 0 a 100 kPa (SESTREM, 2012). Portando, uma possibilidade é que esse comportamento possa indicar o efeito da difusão de ar ou ausência de água no reservatório.

Estes sensores mostraram-se bastante sensíveis e alguns autores descrevem essa característica para sensores mais rasos. Logo, um patamar de leituras constantes também não seria esperado.

Outra ocorrência não esperada, mas que não é um padrão pois é observada apenas uma vez, é o erro observado nas leituras finais do TENS-05, conforme pode ser visto na Figura 99. Neste caso, o TENS-05 registra leituras muito altas, além da sua capacidade prática de cerca de 80 kPa, chegando a registrar o valor de 90,20 kPa. Após esse registro, fixa suas leituras próximas a esse valor até o final da série analisada.

Apesar de não apresentar uma tendência de umedecimento, que segundo Ridley et al (2003a) poderia ser um indicio da cavitação, o fato de ter atingido uma valor de sucção alta pode ser um indicativo de que houve a cavitação do instrumento ou que essa sucção elevada gerou algum dano permanente no instrumento.

FIGURA 84 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 2 DE 03/08/2017 A 24/03/2018



FONTE: O autor

G. Desenvolvimento de um patamar de sucção positiva.

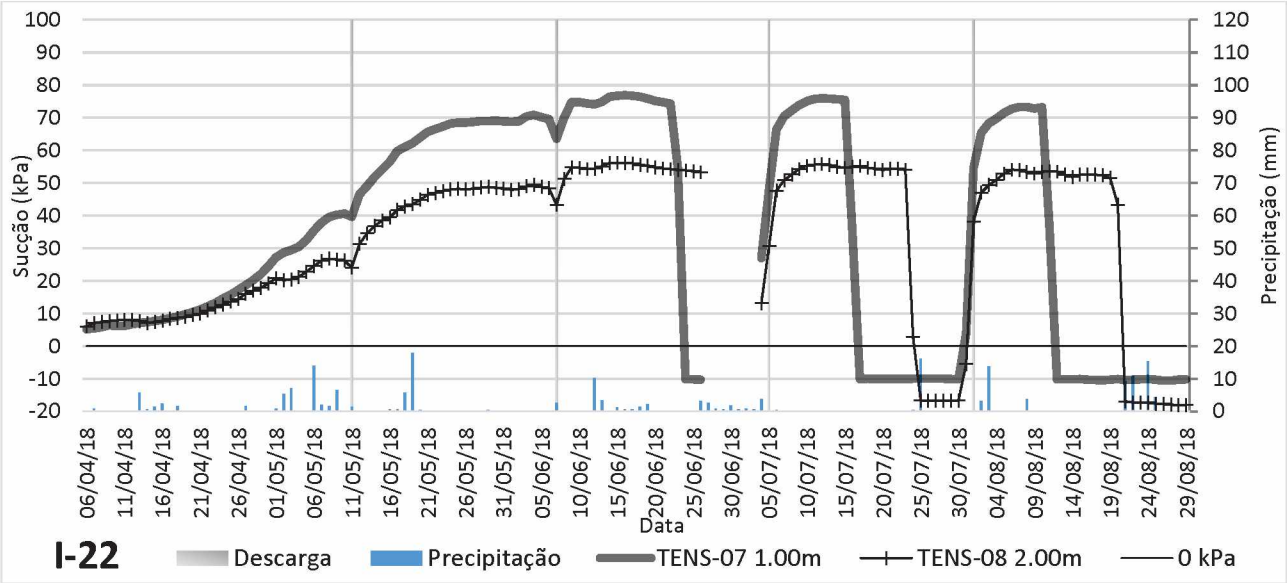
Em 13 das 23 análises realizadas, observa-se o desenvolvimento de um patamar de sucção positiva, mais comum entre os tensiômetros instalados a 1,0 m e 2,0 m de profundidade. Em algumas situações esses patamares possuem leves tendência de queda ou de aumento na sucção. Nos sensores a 1,0 m de profundidade esses patamares se desenvolvem em entre 60 e 70 kPa de sucção e duram entre 10 e 32 dias. Os sensores a 2,0 m de profundidade estabelecem esses patamares entre 50 e 60 kPa com duração entre 13 e 45 dias.

Nos instrumentos mais profundos, como estes a 1,0m e a 2,0m, esse comportamento faz sentido, uma vez que talvez já não sofrem influência das raízes das plantas e com isso tenham menores ganhos de sucção devido a evapotranspiração. Portanto, seu ganho de sucção seria exclusivamente devido a drenagem, indicando que esses patamares poderiam ser considerados como os valores máximos de sucção atingido nessas profundidades.
No sensor a 0,5 m de profundidade, há a maior ocorrência de picos de sucção, mas também podem ser observados o desenvolvimento de patamares de sucção, não tão nítidos e associados a picos ou quedas de sucção.

No sensor a 3,0m de profundidade, a variação de sucção é menor do que nos demais e a ocorrência desses platôs de sucção é bem menos evidente. Ainda assim em uma das análises feitas para a ilha 2, pode-se observar um patamar em cerca de 15 kPa.

Na Figura 85 é identificado o desenvolvimento de patamares de sucção para os dois instrumentos da ilha 1 e em três períodos separados por quedas à patamares negativos e com subidas rápidas associadas à possível manobra de descarga ou preenchimento do reservatório dos tensiômetros. No TENS-07 (1,0 m) esses patamares se estabelecem na casa dos 70 kPa com durações de 29, 8 e 7 dias e com médias de precipitação diária de 0 a 2,23mm/dia. O TENS-08 (2,0 m) desenvolve patamares na casa dos 50 kPa com durações de 32, 16 e 16 dias em 3 ocasiões, e com médias diárias de precipitação de 0 a 1,05 mm/dia. Se for considerado que essas quedas a patamares negativos representam um comportamento errático e que podem ser consequência da cavitação ou falta de água no reservatório dos tensiômetros, seria possível sugerir que na verdade trata-se de um único patamar de sucção.

FIGURA 85 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 1 DE 06/04/2018 A 29/08/2018



FONTE: O autor

H. Quedas ou perda de sucção sem registro de precipitação o positiva.

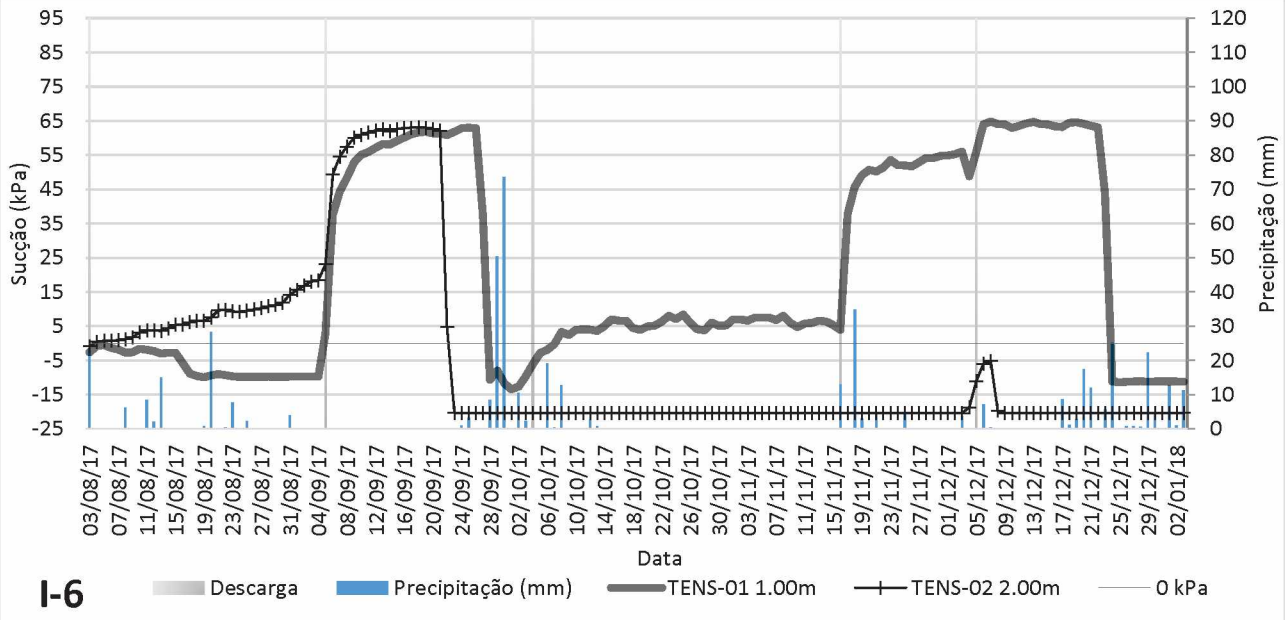
Das 23 análises realizadas, foram observadas quedas de sucção, sem que se pudesse associá-las à uma precipitação ou com precipitações muito pequenas (0,2mm), em 7 intervalos nas 3 ilhas de instrumentação.

Dentre os 7 intervalos apresentados como exemplos dos comportamentos identificados, destaca-se aqueles nos quais as quedas não puderam ser associadas a ocorrência de precipitação.

Na Figura 86, a sucção registrada no TENS-02 (2,0 m) cai de 61,17 kPa no dia 21/09/2017 para 4,78 kPa no dia 22/09/2017 e -20,28 kPa no dia 23/09/2017, sem registros de chuva do dia 18/09/2017 a 24/09/2017.

Na maioria dessas observações, essas quedas levam as leituras à patamares negativos, que como já mencionado, não seria possível para este instrumento. Isso associado ao fato de não ser possível associar a ocorrência de chuva é um indicativo de que este seja também um comportamento errado do instrumento, possivelmente causado pela difusão de ar ou ausência de água no reservatório.

FIGURA 86 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA PARA OS TENSIÔMETROS DA ILHA 3 DE 03/08/2017 A 03/01/2018



FONTE: O autor

O Quadro 18 apresenta um resumo das análises e da ocorrência dos padrões observados.

QUADRO 18 - RESUMO DOS INTERVALOS ANALISADOS

Ilha	Instrumentos	Intervalo	Início	Fim	Padrões Observados							
					A	B	C	D	E	F	G	H
3	TENS-01 TENS-02	I-1	03/01/2013	16/03/2013	X	X	X	X	X	X	X	
		I-2	03/10/2013	23/02/2014		X		X	X	X	X	
		I-3	29/09/2014	22/02/2015	X	X	X		X		X	X
		I-4	06/09/2016	05/01/2017		X			X			
		I-5	06/01/2017	05/06/2017		X		X	X	X		
		I-6	03/08/2017	03/01/2018	X	X			X	X	X	X
		I-7	02/04/2018	02/09/2018		X			X		X	
		I-8	29/09/2018	27/02/2019		X			X		X	
2	TENS-03 TENS-04 TENS-05 TENS-06	I-9	15/08/2012	07/11/2012		X			X		X	
		I-10	03/01/2013	16/03/2013		X	X		X		X	
		I-11	03/10/2013	23/02/2014	X	X		X	X	X		X
		I-12	29/09/2014	22/02/215		X			X			
		I-13	06/09/2016	05/01/2017		X			X			X
		I-14	06/01/2017	05/06/2017	X	X		X	X			
		I-15	03/08/2017	24/03/2018	X	X		X	X	X	X	X
		I-16	29/09/2018	27/02/2019		X		X	X	X		
1	TENS-07 TENS-08	I-17	06/01/2014	28/03/2014		X		X	X			
		I-18	29/09/2014	22/02/2015		X	X		X			
		I-19	06/09/2016	05/01/2017		X	X		X			X
		I-20	06/01/2017	05/06/2017	X	X	X		X	X	X	
		I-21	04/08/2017	24/03/2018	X	X			X	X	X	
		I-22	06/04/2018	29/08/2018	X	X			X	X	X	X
		I-23	09/09/2018	27/02/2019	X	X			X	X	X	

FONTE: O autor

4.4 PERFIS DE PORO PRESSÃO MEDIDOS E PERFIS HIDROSTÁTICOS

Conforme relatado anteriormente, na ocasião das leituras dos inclinômetros, a equipe de monitoramento faz também as medidas de profundidade do nível d'água. São realizadas medidas no furo da sondagem SM-04 e nos tubos dos inclinômetros. A FIGURA 87 apresenta a série histórica das leituras de precipitação e de nível d'água para as ilhas 1 e 2.

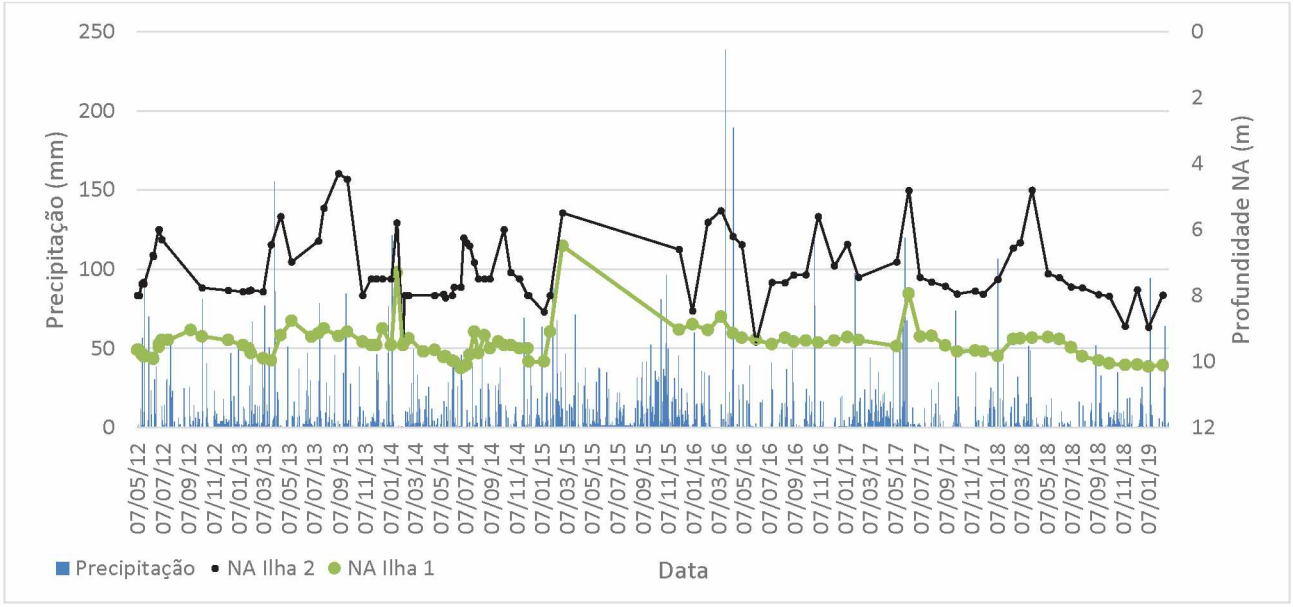
Para a ilha 1 com leituras de nível d'água feitas no furo do inclinômetro 2 (INCL-02), a variação do nível d'água foi de 3,7 m, com maior profundidade de 10,2 m e menor de

6,5 m. Na ilha 2 as leituras são feitas no furo de sondagem SM-04 e a variação do NA foi de 5,11 m com maior profundidade de 9,41 m e menor de 4,3 m.

Observa-se na Figura 87 que há uma diferença de elevação no nível d'água. Na ilha 2, que fica numa cota inferior, a elevação do NA é maior, com média na casa dos 8 m de profundidade. Suas variações são mais pronunciadas e a associação com os registros de precipitação é mais visível.

Na ilha 1, que fica numa cota superior a ilha 2, a elevação é menor e menos pronunciada e sua média de profundidade fica na casa dos 10 m.

FIGURA 87 - SÉRIE HISTÓRICA DAS LEITURAS DE NÍVEL D'ÁGUA



FONTE: O autor

Na Figura 88 e na Figura 89 são apresentados perfis de poro pressão com as leituras dos tensiômetros, piezômetros e máximos e mínimos de nível d'água em termos de poro pressão.

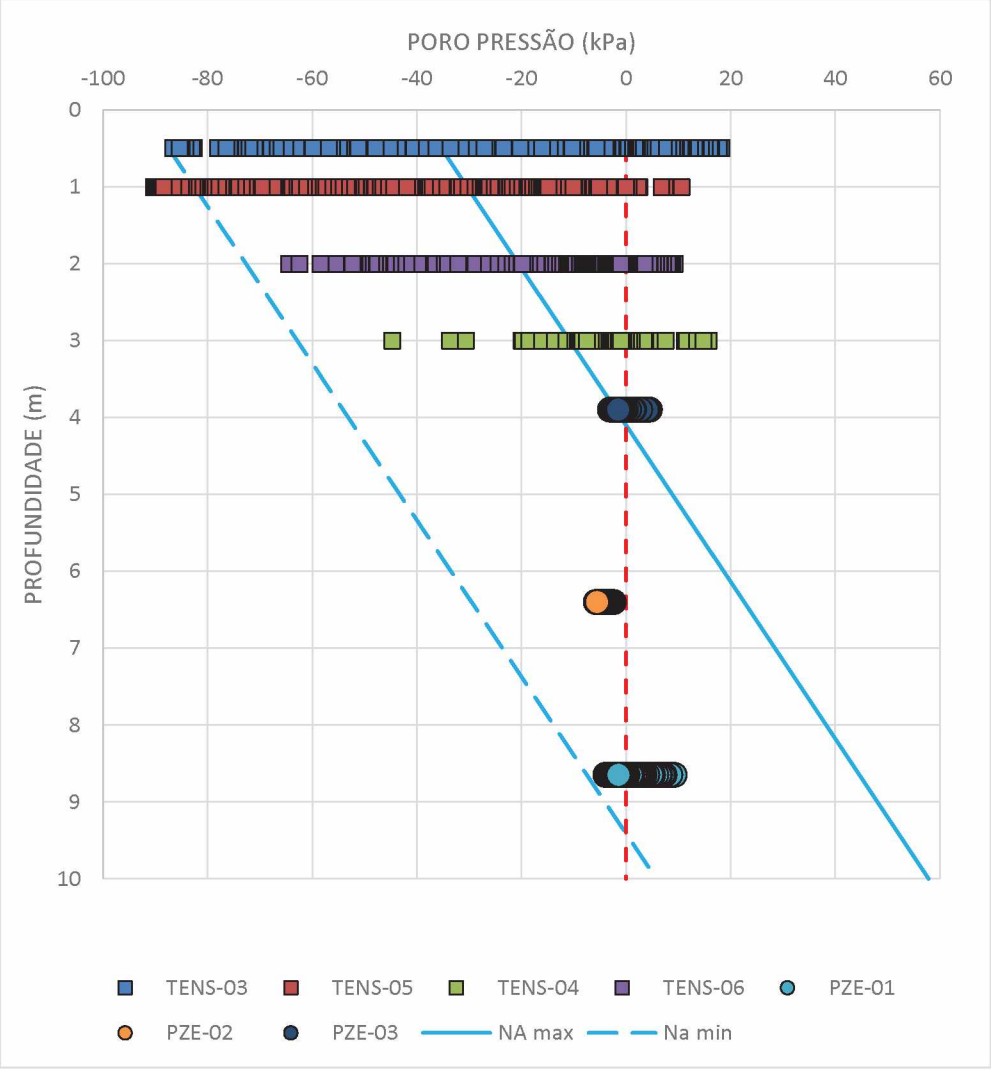
É possível observar que os valores de sucção são condizentes com os perfis hidrostáticos mínimos. O único instrumento cujas leituras excedem o perfil hidrostático mínimo é o tensiômetros TENS-05 (1,0 m) na ilha 2. Porém este instrumento é o que apresenta um comportamento errático fixando valores de sucção superiores aos 90 kPa no final da série histórica.

Os registros de poro-pressões positivas nas camadas mais rasas, medidos pelos tensiômetros, poderiam indicar a saturação devido ao avanço de uma frente de umedecimento e supõem-se que isso de fato ocorra. Entretanto, conforme mencionado

anteriormente, os tensiômetros utilizados na instrumentação do Morro do Boi não são capazes de medir poro-pressões positivas e, possivelmente, esses registros indicam erros de leitura, associados à cavitação ou falta de água no reservatório do instrumento.

Por outro lado, na ilha 2 o PZE-03, que está a 3,90 m de profundidade registrou poro-pressões positivas, mesmo que não haja registro de que tenha ficado submerso ou abaixo do lençol freático. Isso pode ser em função de uma franja capilar ou pode ser um indício da formação de uma frente de umedecimento capaz de atingir cerca de 4m de profundidade.

FIGURA 88 - PERFIL DE PORO PRESSÃO NA ILHA 2

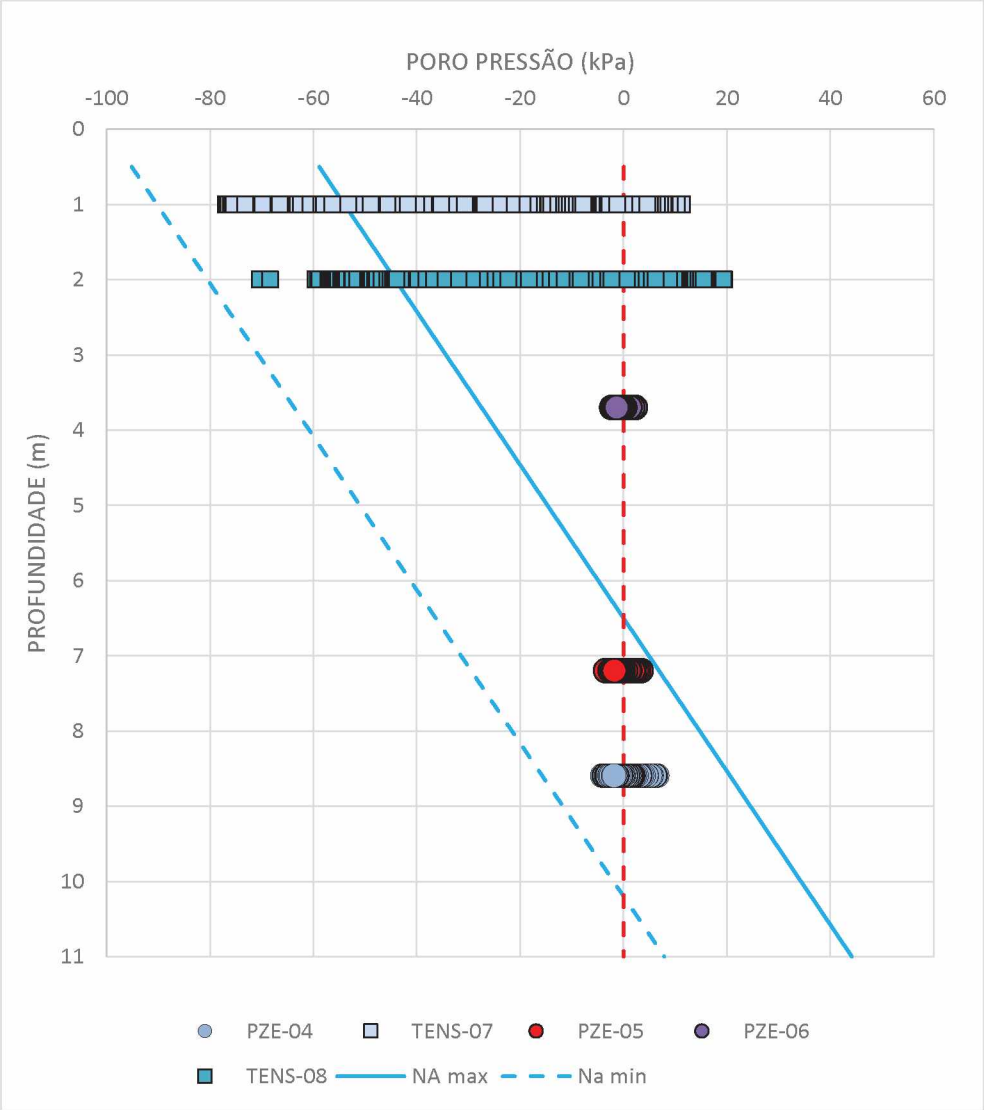


FONTE: O autor

A Figura 90 apresenta um recorte da Figura 56, onde podem ser observados os maiores registros de elevação do NA e do PZE-03. O registro de NA no dia 04/09/2013 é o mais alto e indica a profundidade de 4,3 m. Nesse dia, não é observado variação

significativa no PZE-03, que é observada 20 dias depois, porém logo após um acumulado diário de chuva de 84,4mm. Essa consideração pode indicar que o registro positivo de poro pressão do PZE-03, talvez possa ser associado a infiltração e não a franja capilar. Segundo Joly (2018), a frente de umedecimento poderia alcançar essa profundidade, a depender do acumulado e intensidade da chuva.

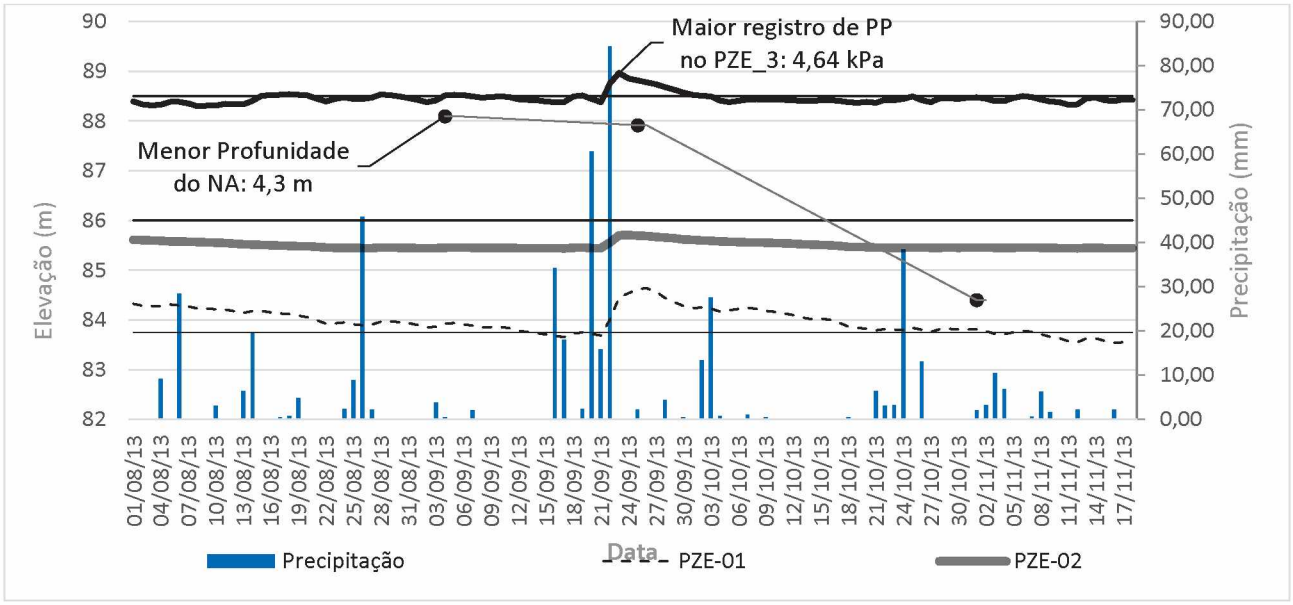
FIGURA 89 - PERFIL DE PORO PRESSÃO NA ILHA 1



FONTE: O autor

É possível observar também pelas Figuras 88 e 89 que os piezômetros que ficam submersos, isto é o PZE-02, PZE-03, PZE-05 e PZE-06, não chegam a registrar o máximo de poro pressão hidrostática. Essa visualização complementa a observação feita no item 4.2.1 de que possa haver um fluxo subsuperficial e que em função da característica drenante do solo, não são desenvolvidos valores significativos de poro pressão.

FIGURA 90 - PORO PRESSÃO EM TERMOS DE ELEVAÇÃO NA ILHA 2.

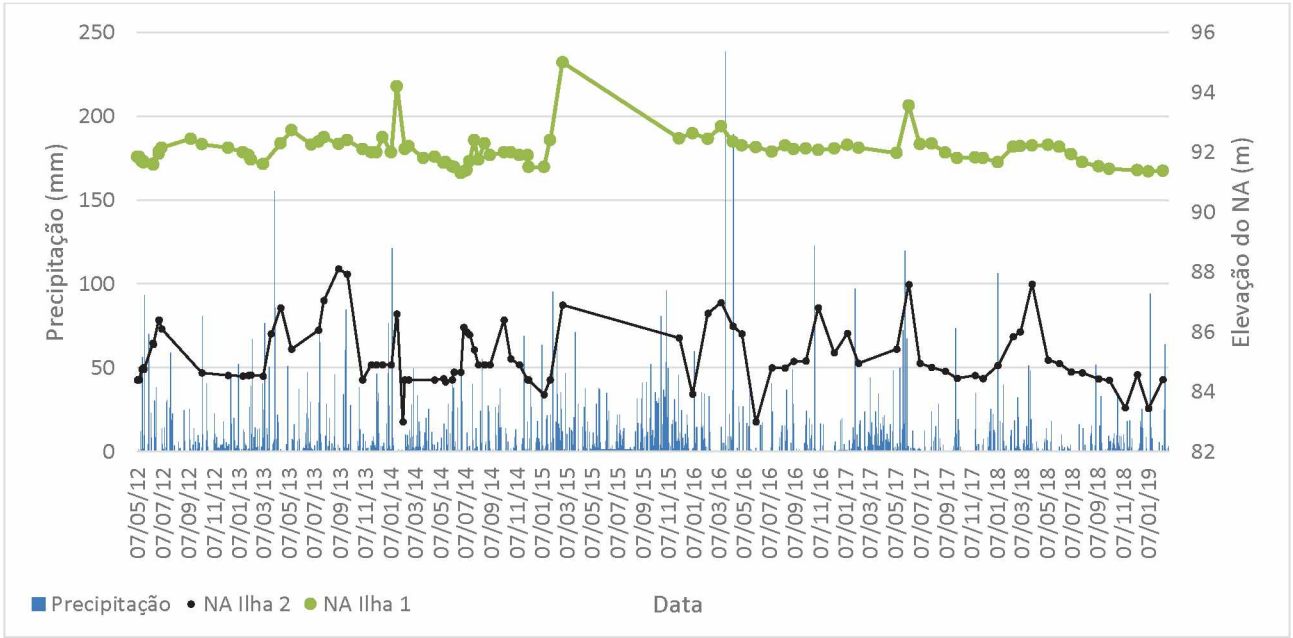


FONTE: O autor

A Figura 91 mostra a diferença de potencial entre as medidas de nível d'água na ilha 1 e na ilha 2.

Essa diferença de potencial entre os níveis d'água na ilha 1 e ilha 2 embasa a possibilidade da existência de fluxo subsuperficial, o que explicaria o fato de que os valores de poro pressão medidos pelos piezômetros não são compatíveis com o perfil hidrostático.

FIGURA 91 - MEDIDAS DE NA EM TERMOS DE POTENCIAL TOTAL.



FONTE: O autor

4.5 MEDIDAS DE DESLOCAMENTOS SUB-HORIZONTAIS

São avaliadas nessa seção os registros dos deslocamentos sub-horizontais medidos através dos dois inclinômetros instalados no Morro do Boi. O período de registro das leituras dos inclinômetros é maior do que o período analisado neste trabalho e apresentam leituras de fevereiro de 2012 a julho de 2019. São analisadas 84 leituras realizadas com intervalo médio de 30 dias, mas variando de 9 a 122 dias.

O inclinômetro 1 (INCL-01) fica localizado na ilha 2 de instrumentação, dentro da área estabilizada e o inclinômetro 2 (INCL-02) fica localizado na ilha 1 de instrumentação, acima da ilha 2 e fora da área estabilizada.

O QUADRO 19 apresenta os valores dos maiores deslocamentos positivos e negativos para os inclinômetros.

QUADRO 19 - LEITURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DOS INCLINÔMETROS

Instrumento		Deslocamento Positivo (mm)		Deslocamento Negativo (mm)	
		Valor (mm)	Profundidade (m)	Valor (mm)	Profundidade (m)
INCL-01	Eixo A	10,33	1,0	-1,62	5,5
	Eixo B	4,27	2,5	-3,16	2,0
INCL-02	Eixo A	4,99	2,0	-4,50	2,0
	Eixo B	7,38	1,0	-4,60	3,5

FONTE: O autor

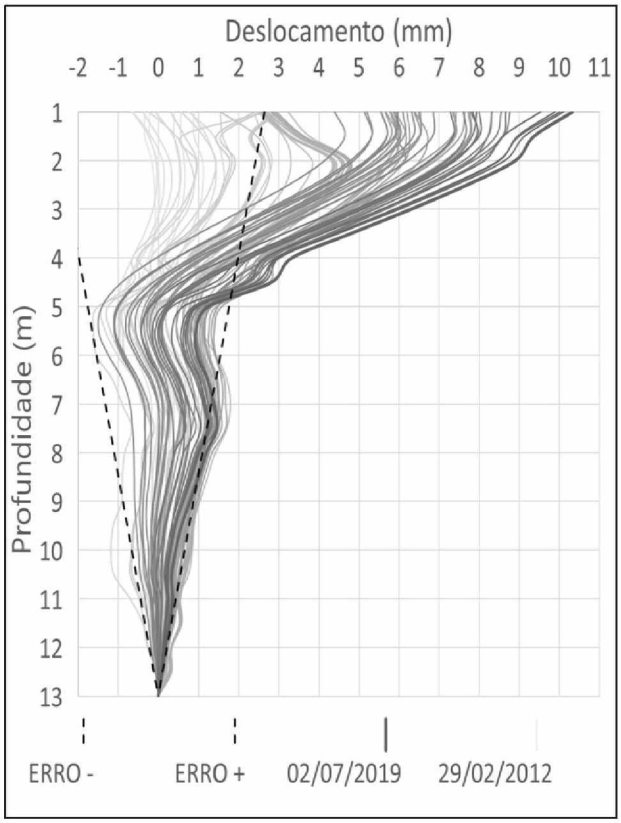
A Figura 92 apresenta os gráficos dos deslocamentos do inclinômetro INCL-1. Esses gráficos contemplam todas as leituras e as suas datas estão classificadas de acordo com a tonalidade da linha que as representa. A tonalidade mais clara representa uma leitura mais antiga, enquanto a tonalidade mais escura representa uma leitura mais recente. A figura apresentada dessa forma possibilita observar a tendência dos deslocamentos e a ocorrência de retração nos deslocamentos.

Observa-se que para o INCL-01 há um movimento visível no sentido positivo do eixo A e sem uma retração mais evidente, enquanto no eixo B pode ser observado uma grande retração. O cone formado pelas linhas tracejadas delimita os valores de possíveis erros sistemáticos sugeridos por Mikkelsen (2003).

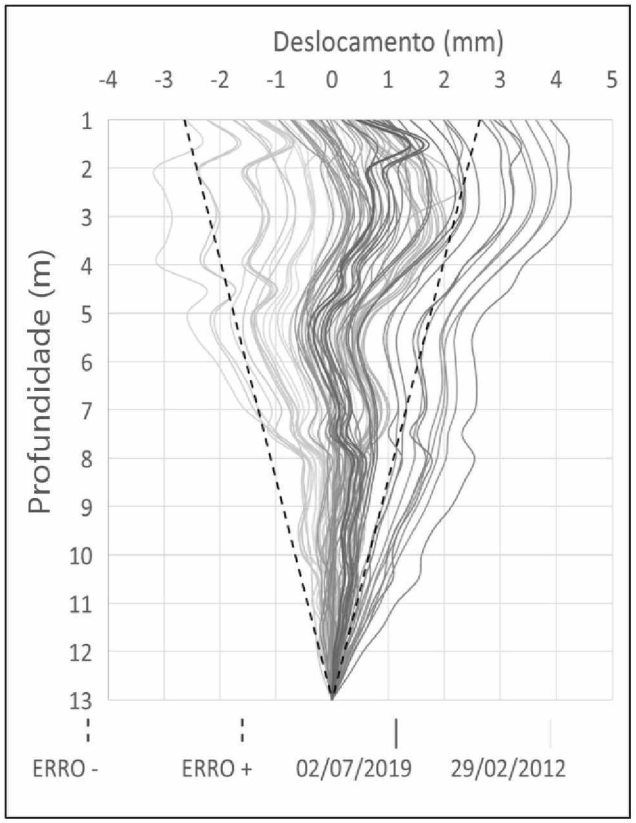
Segundo Mikkelsen (2003), o erro randômico associado aos inclinômetros pode influenciar em 0,02 mm por intervalo de leitura (cada 50cm) e a soma dos erros sistemáticos podem influenciar em 0,11 mm por intervalo. Os erros randômicos foram desconsiderados, pois, para as leituras do Morro do Boi, são feitas as médias das medidas entre os dois sentidos de cada eixo.

FIGURA 92 - LEITURAS INCL-01.

Eixo A



Eixo B



FONTE: O autor

No eixo A, observa-se a identificação de uma possível superfície de escorregamento na profundidade de 5m, com os deslocamentos inferiores a este ponto dentro da margem de erro sugerida por Mikkelsen (2003). A forma em "S" das curvas próximas a 5m de profundidade, também são indicativos de que exista uma superfície de escorregamento nesse ponto (JENG et al., 2017).

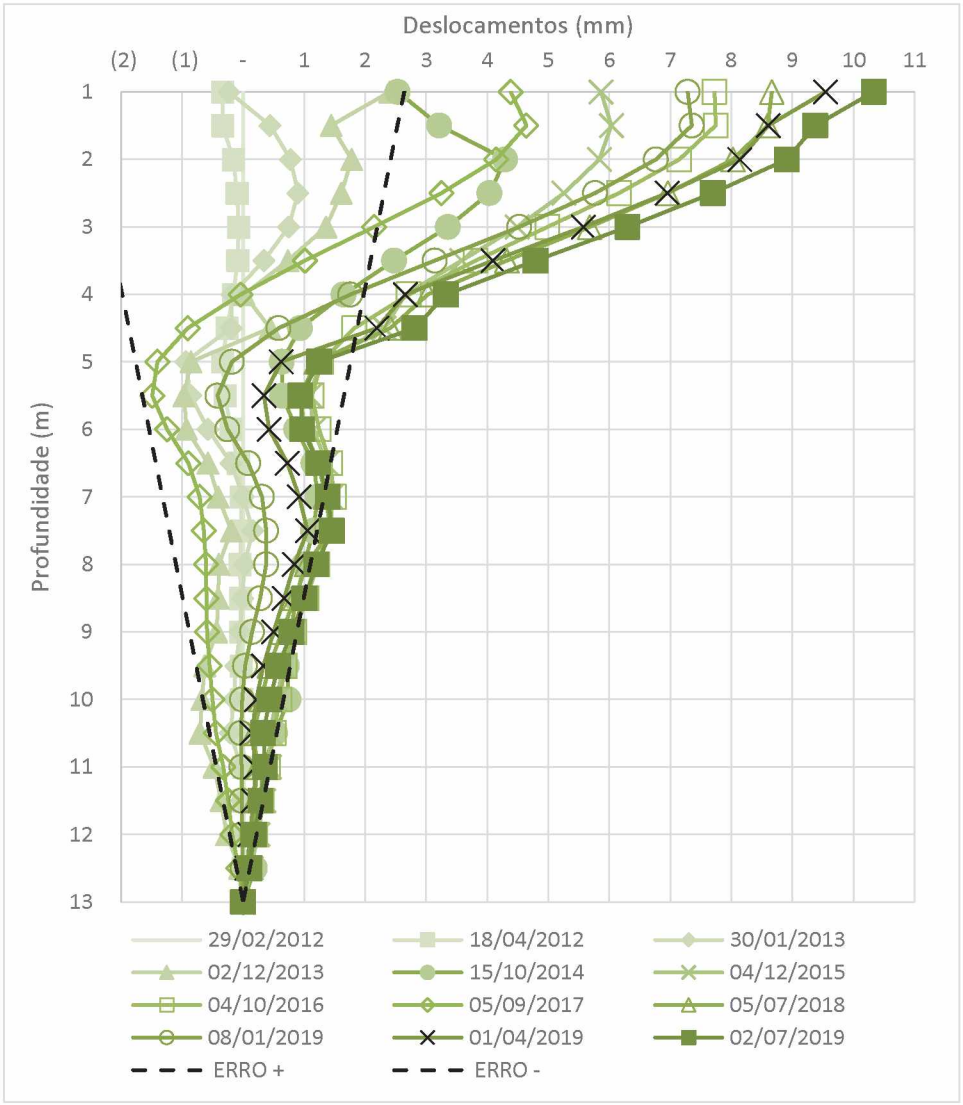
No eixo B, apesar das curvas indicarem deslocamentos superiores à margem de erro, o comportamento de retração total observado pode ser um indicativo de um erro de inversão de polaridade que apresenta essa forma de "limpador de para-brisas", conforme sugerido por Cornforth (2005).

Essas retrações podem também estar associadas a uma redução no índice de vazios. Leung e Ng (2016) observaram que para um solo argilo-arenoso de Hong Kong, o índice de vazios reduziu com o incremento da sucção e atribuíram recuperações de 10mm, que representaram 25% nos deslocamentos sub-horizontais, a esta redução no índice de vazios.

Para os dados do Morro do Boi, não há correlação significativa entre os deslocamentos e os valores de sucção.

A Figura 93 apresenta o gráfico com as principais leituras do INCL-01 no eixo A, onde é possível verificar a existência de uma superfície de escorregamento e o valor máximo de 10,33 mm deslocamento na superfície, e observar que os deslocamentos se dão de forma progressiva.

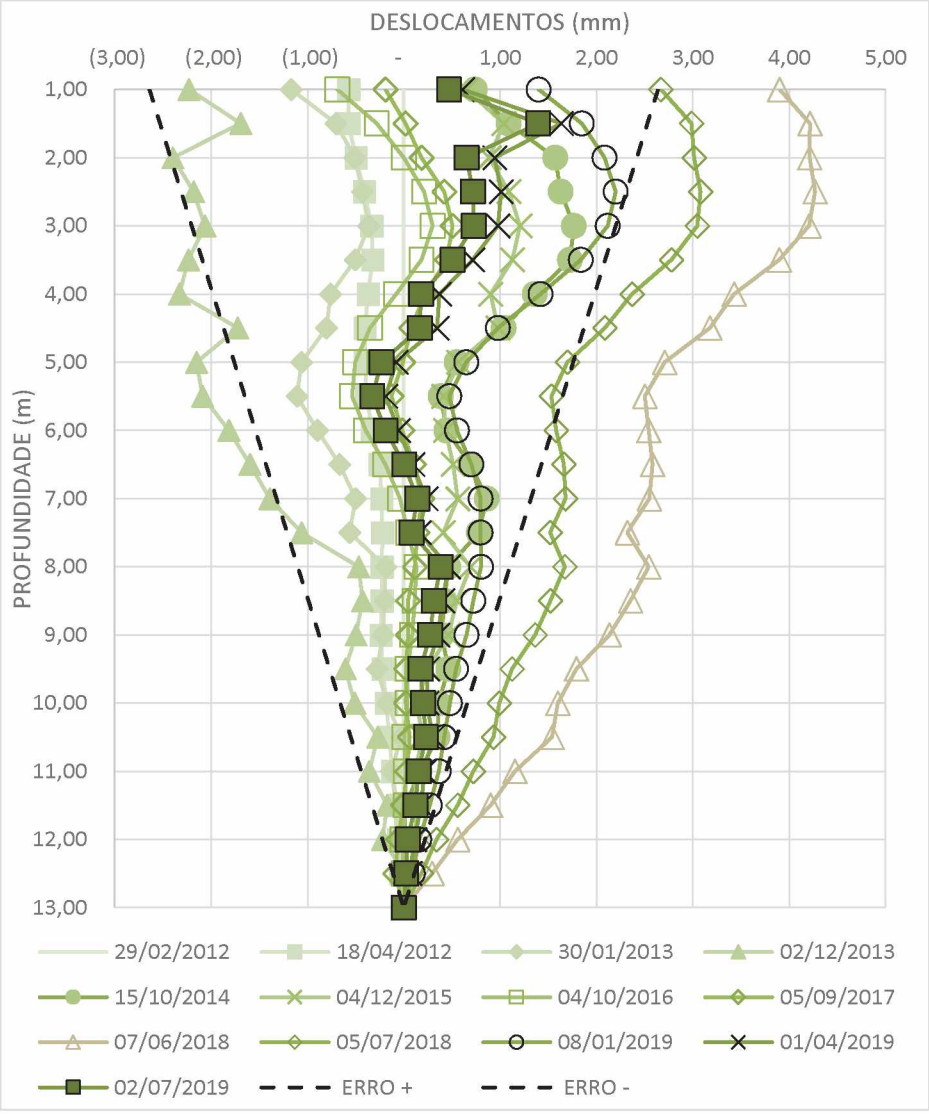
FIGURA 93 - LEITURAS INCL-01 – EIXO A



FONTE: O autor

A Figura 94 apresenta o gráfico com as principais leituras do INCL-01 no eixo B. Observa-se que praticamente todas as leituras ficam dentro do cone de possíveis erros sistemáticos e que há praticamente uma recuperação total dos deslocamentos. O deslocamento máximo registrado foi de aproximadamente 4 mm na superfície no dia 07/06/2018, mas o último registro no dia 02/07/2019 registra menos de 1 mm.

FIGURA 94 - LEITURAS INCL-01 – EIXO B.



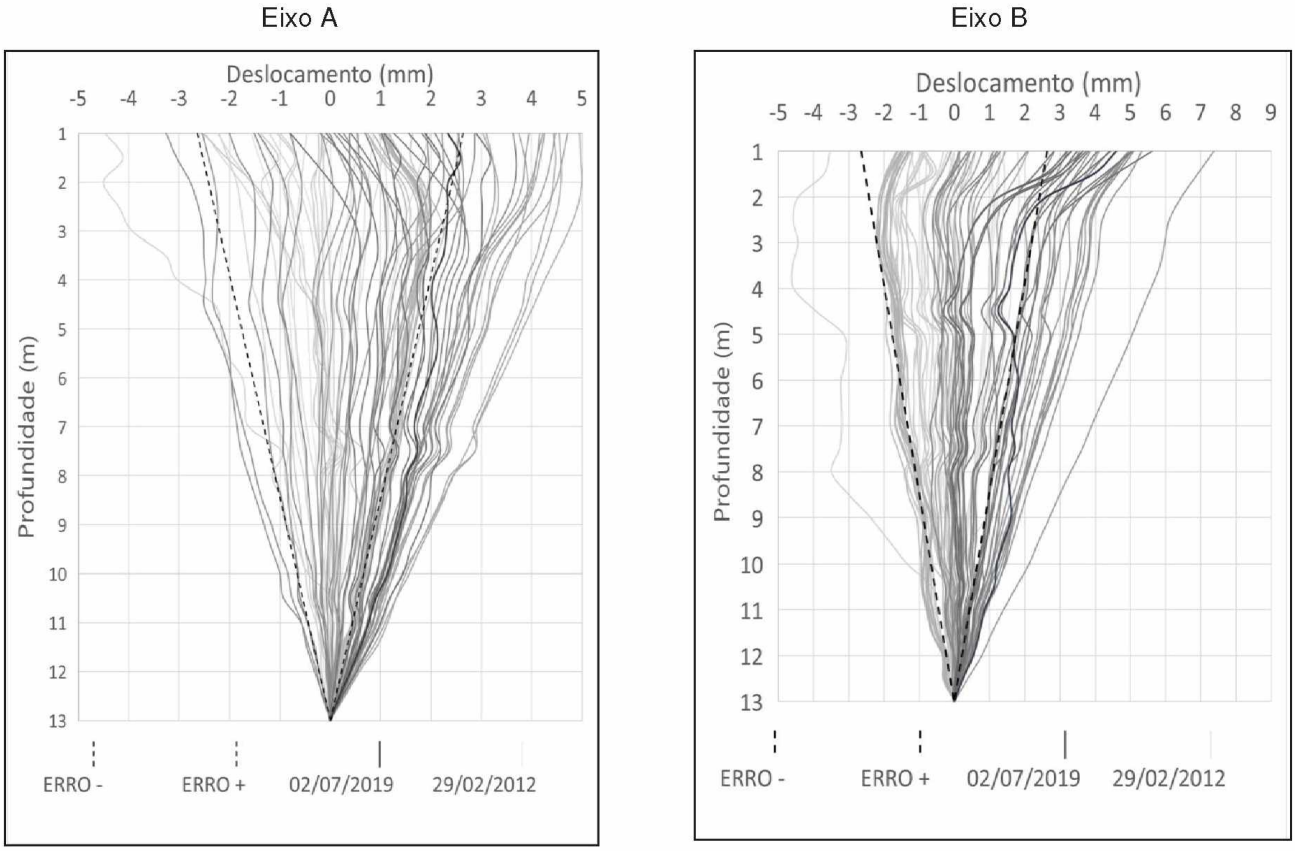
FONTE: O autor

A Figura 95 apresenta os gráficos para os eixos A e B do INCL-02. Da mesma forma as leituras estão organizadas em ordem cronológica de acordo com a tonalidade das linhas que as representam.

Observa-se que a maior parte das leituras fica dentro dos cones que demarcam os valores de erros sistemáticos e algumas leituras avançam para indicar registros maiores de

deslocamentos. Os maiores registros na superfície são de 4,95 mm no eixo A e de 7,38 mm no eixo B. Entretanto, há uma recuperação de 1,87 mm (38%) para o eixo A e de 2,78 mm (38%) para o eixo B, conforme pode ser observado na Figura 96 e na Figura 97.

FIGURA 95 - LEITURAS INCL-02.



FONTE: O autor

Não é claro que haja um movimento no INCL-02, pois os deslocamentos não são progressivos, as recuperações são significativas e boa parte das leituras ficam dentro dos possíveis erros sistemáticos.

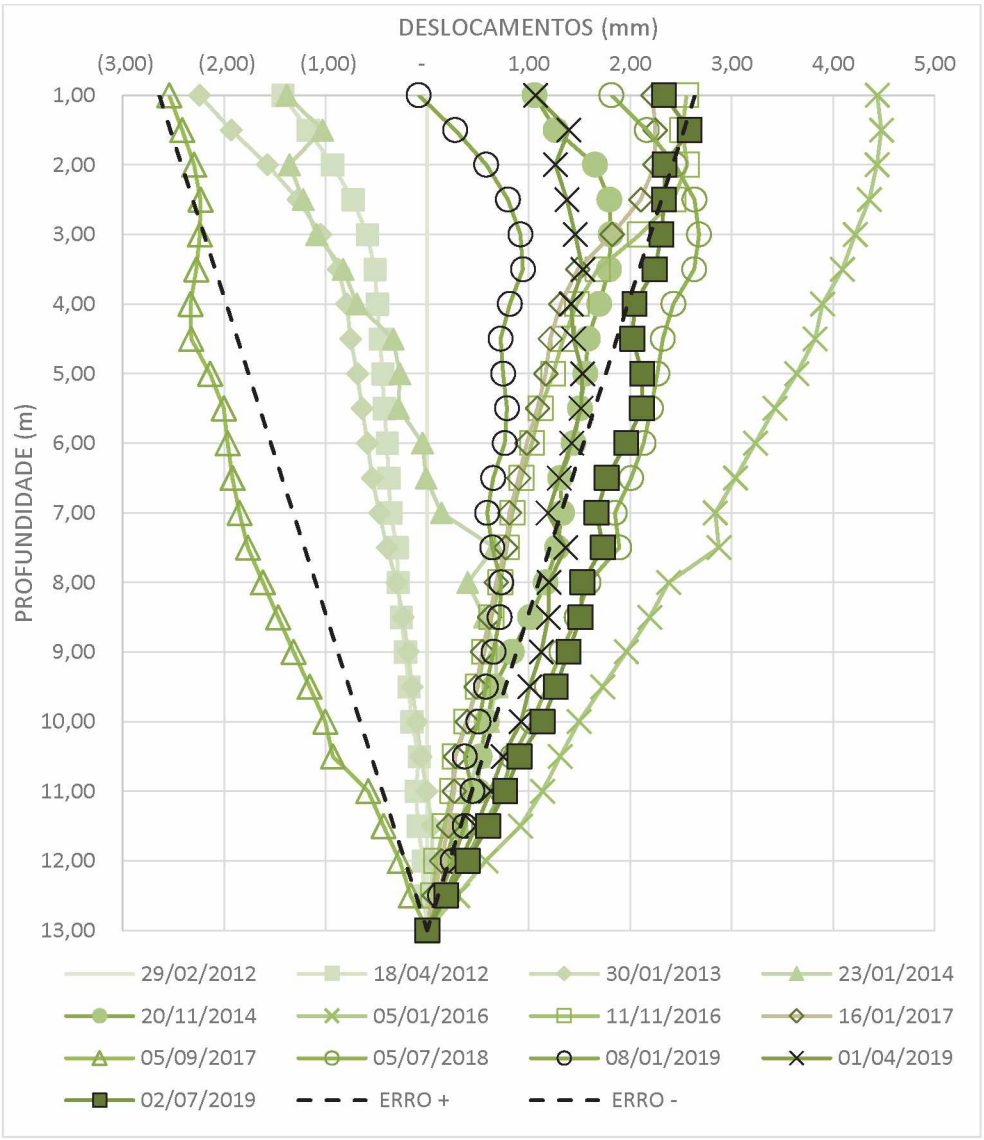
As maiores leituras, de 4,99 mm a 2 m no eixo A e de 7,38 mm a 1 m no eixo B não acontecem no mesmo dia. Apesar do eixo B registrar o maior deslocamento, isso não é uma constante, e considerando a resultante das medidas nos dois eixos, observa-se também que a direção do deslocamento é também variável.

Em função da magnitude dos deslocamentos, dos comportamentos de retração e da impossibilidade de se evidenciar movimentos claros, pode-se considerar que não há movimentos significativos no INCL-02 e no eixo B do INCL-01.

Avalia-se, portanto, o movimento registrado no eixo A do INCL-01 como o único registro de que há um deslocamento no Morro do Boi. Esses deslocamentos nesse instrumento e nessa direção são coerentes, pois o inclinômetro está instalado dentro da zona estabilizada por uma solução passiva.

O eixo A representa a direção transversal à rodovia e seu sentido positivo representa o sentido do pé do talude.

FIGURA 96 - LEITURAS INCL-02 – EIXO A.

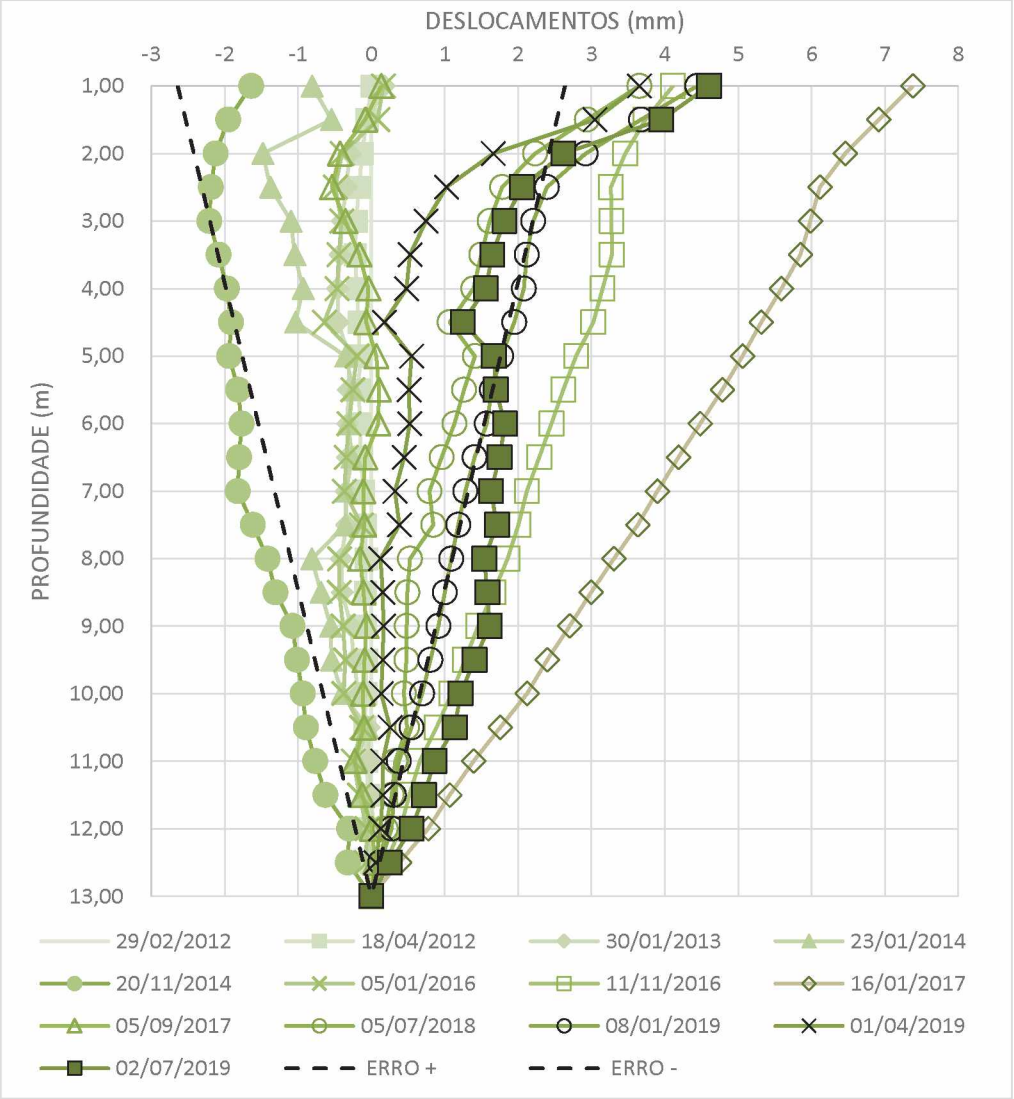


FONTE: O autor

O fato de estar na zona estabilizada, significa que pode estar sob influência de uma massa já rompida, ou ainda, que esses deslocamentos seriam esperados para mobilizar a resistência dos grampos usados na estrutura de contenção.

O período de leituras dos inclinômetros é de 2.680 dias, ou seja, pouco mais de 7 anos. Logo, considerando o deslocamento máximo de 10,33 mm nesse período, pode-se estimar a velocidade média do deslocamento em 1,41 mm/ano. Entretanto essa velocidade não é constante e variou de 0,29 mm/ano a 5,88 mm/ano. Existem também registros de retração de 3,34 mm (43%) entre outubro de 2016 e setembro de 2017 e de 1,49 mm (17%) entre maio de 2018 e janeiro de 2019.

FIGURA 97 - LEITURAS INCL-02 – EIXO B.

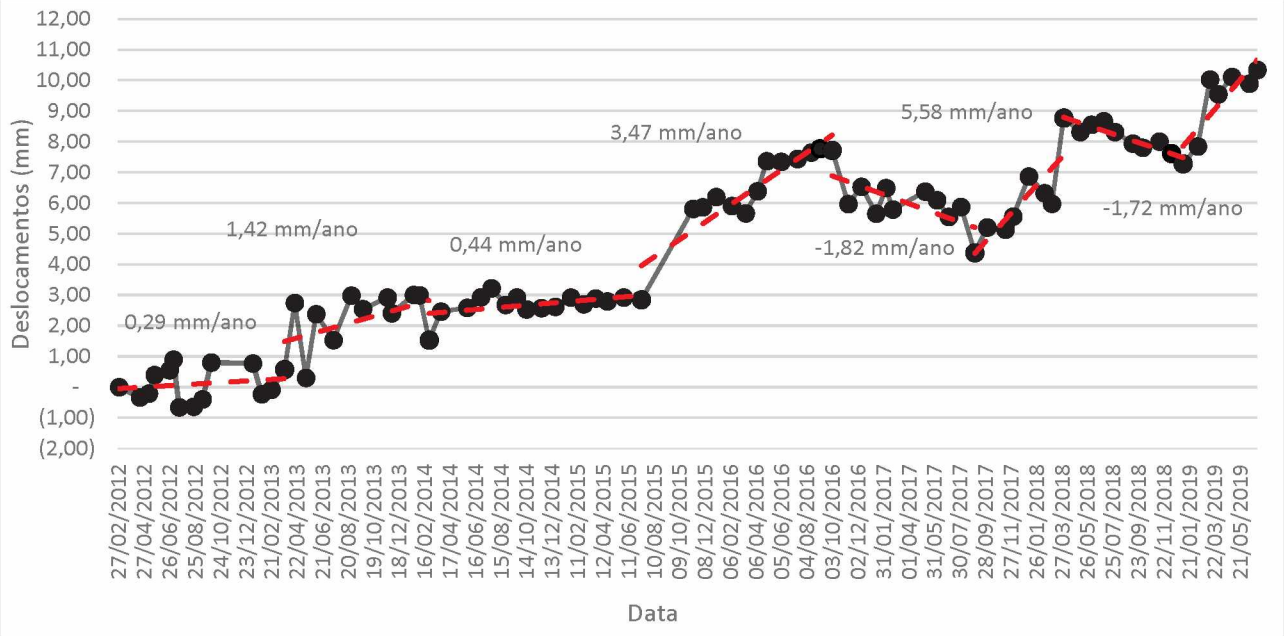


FONTE: O autor

A Figura 98 apresenta os deslocamentos a 1 m de profundidade ao longo do período analisado, onde podem ser observadas as variações de velocidades dos deslocamentos. São apresentadas as velocidades médias estimadas com base na inclinação das linhas de tendência.

Segundo a classificação de Cruden e Varnes (1996), deslocamentos de até 16mm por ano caracterizam movimentos extremamente lentos, e mesmo as maiores velocidades observadas no período analisado são inferiores a este limite. Gonzalez et al. (2017) tinham observado deslocamentos de 2mm até março de 2013 e Ferreira et al. (2018), 7 mm até abril de 2016.

FIGURA 98 - LEITURAS INCL-01 PARA 1 M DE PROFUNDIDADE



FONTE: O autor

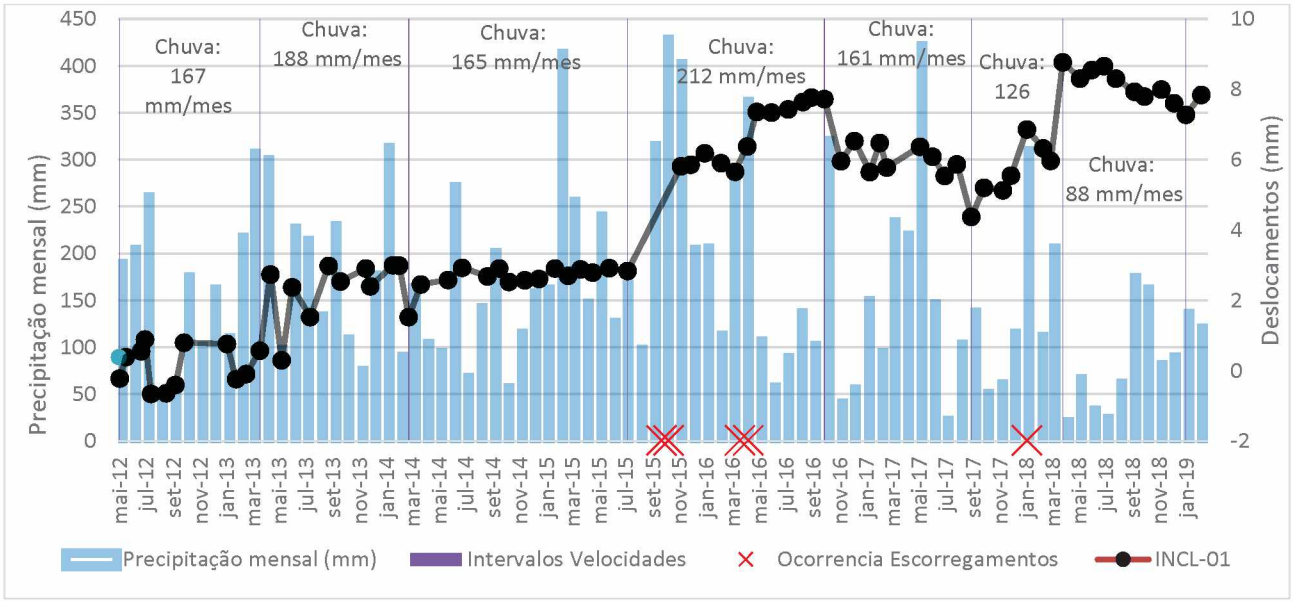
A Figura 99 mostra a evolução dos deslocamentos plotada junto com a precipitação mensal. Destaca-se também os registros de escorregamentos na região, segundo Salah et al. (2019).

Observa-se claramente que maiores velocidades de deslocamentos estão associadas à maiores médias mensais de chuva, exceto pelo período entre setembro de 2018 e abril de 2018, quando uma média mensal de 126 mm está associada à uma velocidade de deslocamento maior.

A Figura 100 apresenta as leituras de deslocamentos juntamente com as leituras de sucção dos 4 tensiômetros da Ilha 2. O período entre janeiro de 2015 e outubro de 2016 no qual já foi observado que há um menor acréscimo das sucções é também o período de maior precipitação e dos maiores deslocamentos.

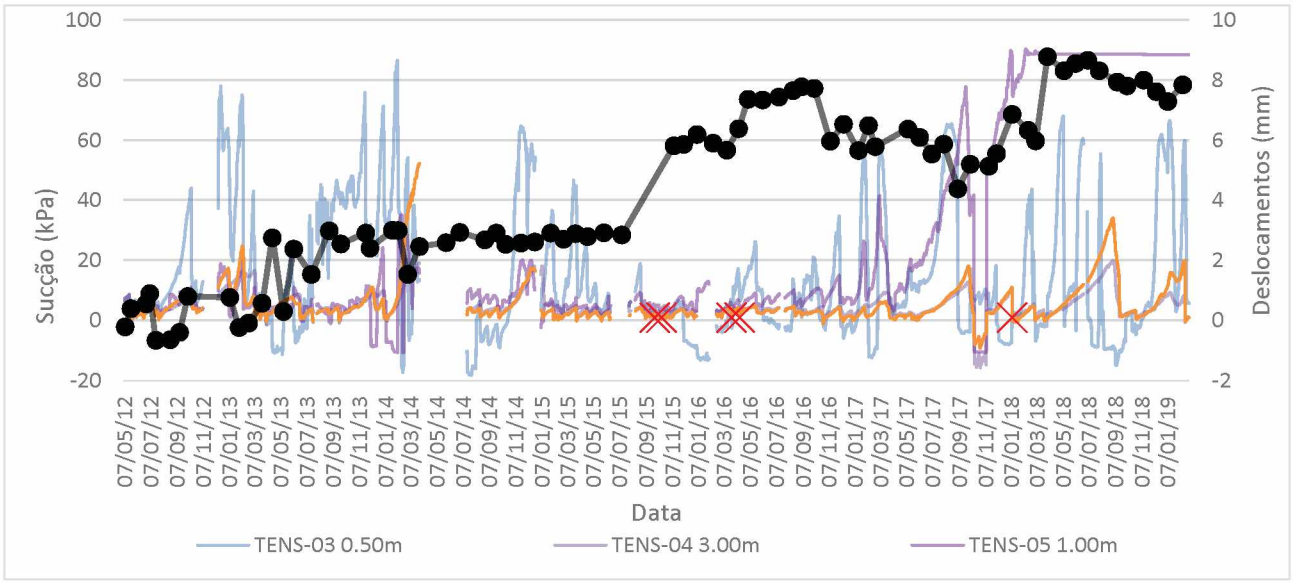
Observa-se também que nos períodos de maior velocidade dos deslocamentos são registradas ocorrências de escorregamentos em outros taludes da região.

FIGURA 99 - LEITURAS INCL-01 PARA 1 M DE PROFUNDIDADE COM CHUVAS MENSAIS



FONTE: O autor

FIGURA 100 - LEITURAS INCL-01 PARA 1 M DE PROFUNDIDADE COM CHUVAS MENSAIS



FONTE: O autor

4.5.1 Avaliação da variação dos fatores de segurança e deslocamentos

Adotando a profundidade de 5,0 m identificada como possível posição de uma superfície de deslizamento nas leituras do INCL-01, e usando o método do talude infinito, calculou-se os fatores de segurança, variando os valores de poro pressão, coesão e ângulo de atrito.

Para os valores de poro pressão, adotou-se as leituras do PZE-03, que fica a 3,90m e do PZE-01 que fica a 8,65 m de profundidade. Na ilha 2, o piezômetro mais próximo da profundidade de 5,0m, seria o PZE-02, porém as leituras desse instrumento não registram valores positivos de poro pressão.

Usando a equação 10, quando a poro pressão é positiva e a equação 11, quando negativa e utilizando os dados do QUADRO 20, obteve-se a variação dos fatores de segurança em função da poro pressão, da coesão e do ângulo de atrito interno.

Desconsiderou-se as medidas do PZE-02, se adotou uma média ponderada entre as leituras do PZE-03 (3,90 m) e PZE-01 (8,65 m), adotando esse valor como a variação de poro pressão a 5m de profundidade.

$$FS= \frac{c'+(\gamma.\mathrm{h}.\cos^2\beta-u).\tan\emptyset'}{\gamma\cdot\mathrm{h}\cdot\cos\beta.\mathrm{sen}\,\beta} \quad (10)$$

$$FS= \frac{c'+(\gamma.\mathrm{h}.\cos^2\beta).\tan\emptyset'+\psi_m\cdot\tan\emptyset^b}{\gamma\cdot\mathrm{h}\cdot\cos\beta.\mathrm{sen}\,\beta} \quad (11)$$

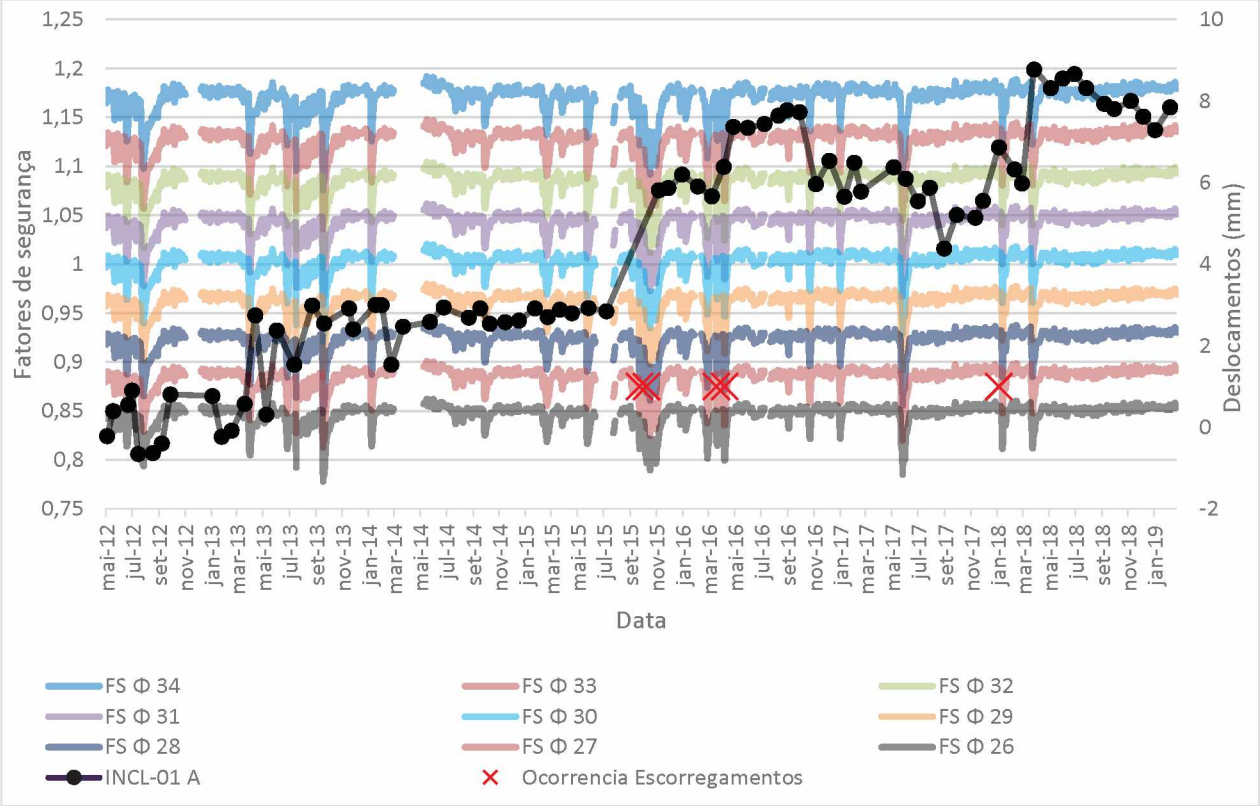
QUADRO 20 - VALORES ADOTADOS PARA O CÁLCULO DOS FATORES DE SEGURANÇA

Parâmetro	Símbolo	Valor Adotado	Origem
Coesão Efetiva	c'	0 a 2 kPa	Lazarim (2012) sugeriu entre 1,1 e 2 Kpa.
Peso específico natural	γ	16,46 kN/m³	Média dos valores obtidos por Pretto (2014)
Profundidade	h	5,0 m	O autor
Inclinação do Talude	β	30º	O autor
Ângulo de atrito interno efetivo	$\emptyset'$	26° a 34°	Lazarim (2012)
Poropressão positiva	u	Média ponderada entre as leituras positivas do PZE-03 e PZE-01	O autor
Sucção Mátrica	ψ_m	Média ponderada entre as leituras negativas do PZE-03 e PZE-01	O autor
$\emptyset^b$	$\emptyset^b$	$\emptyset'/2$	Adotado

FONTE: O autor

A Figura 101 apresenta os valores dos fatores de segurança e valores das leituras de deslocamentos durante o período analisado para a simulação com coesão zero.

FIGURA 101 - VARIAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA E DESLOCAMENTOS COM O TEMPO PARA COESÃO ZERO.



FONTE: O autor

Observa-se que há uma convergência entre os períodos com menores valores de fator de segurança e os períodos com maiores velocidades de deslocamento, exceto no período entre 04/10/2016 e 05/09/17, onde há uma tendência de retração nas leituras do INCL-01. Entretanto, os valores menores de FS são associados às poro-pressões registradas no dia 01/06/07, logo após o segundo maior acumulado mensal de chuva (421 mm) no mês de maio de 2017. A TABELA 10 apresenta os menores e maiores valores de FS para a série para as 3 simulações de coesão e 9 simulações de ângulo de atrito possíveis.

Considerando que o INCL-1 está instalado na área estabilizada e que há uma nítida formação de uma superfície de ruptura, é possível supor, que neste pondo do talude, haja momentos onde haveria uma condição de instabilidade, se não houvesse a estrutura de contenção. Portanto, é possível estimar um intervalo de valores de ângulo de atrito e coesão

na superfície de ruptura. Escolheu-se aqueles valores de ângulo de atrito, cujos pares de FS possuem valores acima de 1 e que em determinado momento, em função do acréscimo de poro pressão ou redução da sucção, atingem valores menores que 1.

Na TABELA 10 estão destacados os pares de FS máximo e FS mínimo, onde o máximo é superior a 1 e o mínimo é inferior a 1.

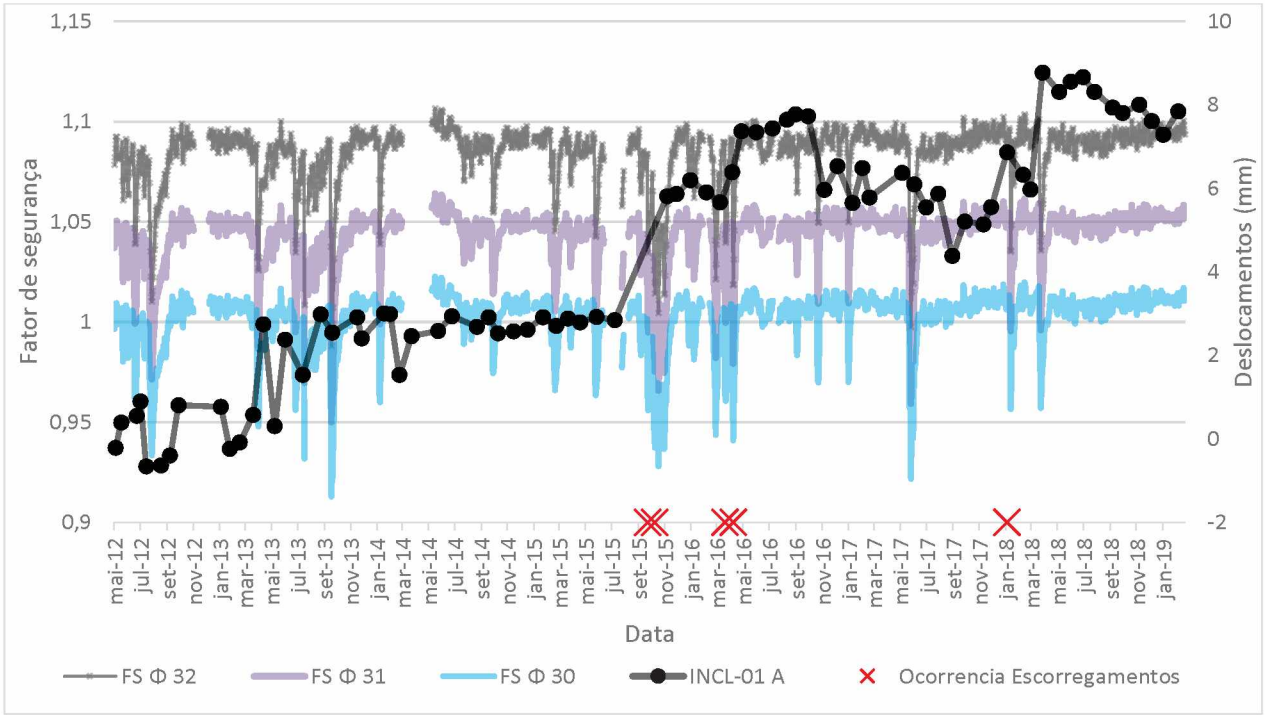
TABELA 10 - MAIORES E MENORES VALORES DE FS OBTIDOS, VARIANDO c' E $\emptyset'$

Coesão (kPa)	F.S.	Angulos de atrito interno (°)								
		34	33	32	31	30	29	28	27	26
0	Máx	1,19	1,15	1,11	1,06	1,02	0,98	0,94	0,90	0,86
	Min	1,07	1,03	0,99	0,95	0,91	0,88	0,84	0,81	0,77
1	Máx	1,22	1,18	1,13	1,09	1,05	1,01	0,97	0,93	0,89
	Min	1,09	1,05	1,02	0,98	0,94	0,90	0,87	0,83	0,80
2	Máx	1,25	1,21	1,16	1,12	1,08	1,04	0,998	0,96	0,92
	Min	1,12	1,08	1,04	1,01	0,97	0,93	0,90	0,86	0,83

FONTE: O autor

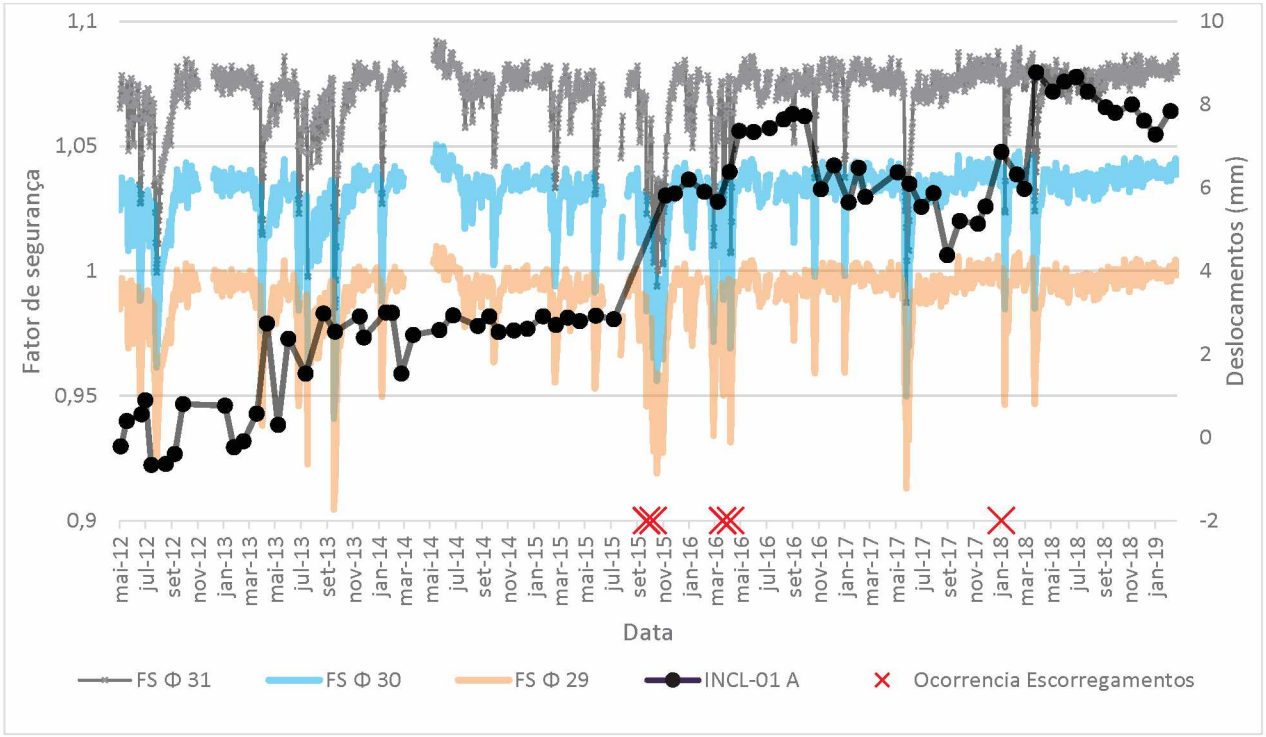
As Figuras de 102 a 104 apresentam as variações dos FS apenas para os ângulos de atrito destacados na TABELA 10 para as 3 possibilidades de coesão.

FIGURA 102 - VARIAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA DESTACADOS NA TABELA TABELA 10 COM COESÃO ZERO.



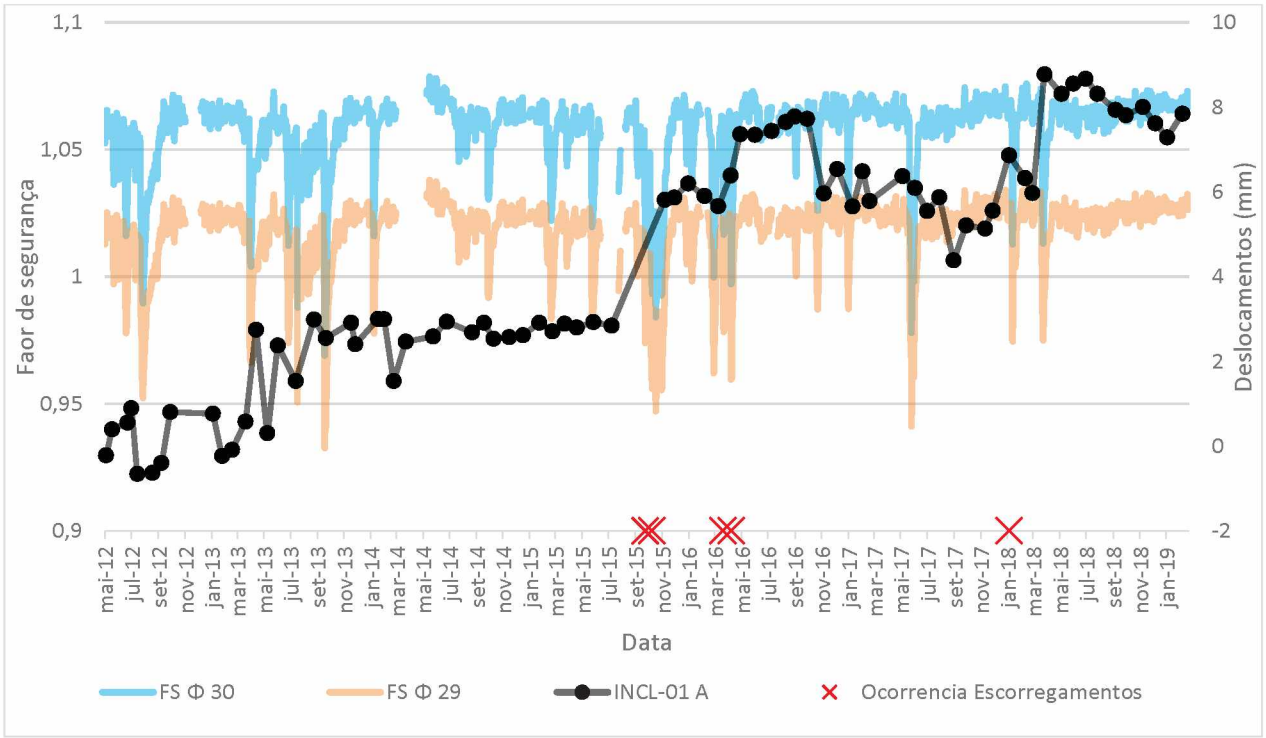
FONTE: O autor

FIGURA 103 - VARIAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA DESTACADOS NA TABELA TABELA 10 COM COESÃO DE 1 KPA.



FONTE: O autor

FIGURA 104 - VARIAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA DESTACADOS NA TABELA TABELA 10 COM COESÃO DE 2 KPA.



FONTE: O autor

Nessas figuras fica mais evidente que os fatores de segurança atingem valores inferiores 1 nos períodos de maior deslocamento. Inclusive, os registros de escorregamentos na região, segundo Salah et al. (2019), também ocorrem nesses mesmos períodos.

É possível estimar os valores de coesão e ângulo de atrito na superfície de deslizamento conforme QUADRO 21.

QUADRO 21 - VALORES ESTIMADOS PARA COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO NA SUPERFÍCIE DE RUPTURA

Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
0	30 a 32
1	29 a 31
2	29 a 30

FONTE: O autor

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresenta-se a seguir as principais conclusões ou considerações sobre os resultados obtidos neste trabalho, bem como são lançadas questões para discussão futura e sugestões para próximas pesquisas.

5.1 CONCLUSÕES

5.1.1 Pluviometria

O regime pluviométrico registrado pelo pluviógrafo do Morro do Boi é bastante distribuído ao longo do ano, não sendo possível definir de forma clara períodos secos e úmidos, que segundo Monteiro (2001) é uma característica do regime de chuvas de Santa Catarina.

Apesar disso é possível identificar o período entre junho e agosto como o mais seco e que as maiores precipitações ocorrem no verão e outono. As precipitações de até 100 mm de acumulado diário apresentam boa distribuição ao longo do ano e ocorrem em todas as estações.

Aproximadamente 73 % dos registros diários são classificados como, de dia seco a chuva leve, e apenas 27% como, de chuva moderada a chuva violenta, de acordo com a classificação do CIRAM.

5.1.2 Poro pressão

Os valores de poro pressão desenvolvidos foram baixos, com máximo de 9,3 kPa para o piezômetro mais profundo na Ilha 2.

Não foi possível estabelecer correlação direta com a precipitação, o que era esperado, uma vez que é apenas uma parcela de chuva que infiltra. E essa proporção depende da intensidade e duração da chuva, da condição de umidade do solo anterior a chuva, da inclinação do talude e da cobertura vegetal.

Parece haver um comportamento não esperado para o piezômetro 02, visto que não há registros de poro-pressões positivas, mesmo que este instrumento tenha ficado submerso.

Foi observado que o desenvolvimento dos acréscimos de poro pressão em razão da precipitação não é instantâneo e que há um atraso de 1 a 8 dias para as leituras de poro pressão atingirem picos após os eventos analisados. Da mesma forma a dissipação também não é rápida, levando de 1 a 23 dias para dissipar o acréscimo de poro pressão gerado.

Não foi possível estabelecer correlação entre os tempos de atraso ou de dissipação com fatores pluviométricos como intensidade, duração e acumulado. Entretanto, parece haver uma tendência de aumento dos acréscimos de poro pressão, e da velocidade com que esses acréscimos se desenvolvem, com a intensidade da chuva, em especial para os instrumentos da ilha 2.

Por outro lado, obteve-se boas correlações entre os valores de poro pressão e do nível d'água, em especial para os instrumentos mais profundos. Entretanto, os valores de poro pressão registrados não são compatíveis com a possível coluna d'água formada pelo lençol freático, quando os instrumentos ficam submersos.

Portanto, poderia se supor que os piezômetros são mais influenciados pela variação do nível d'água do que pela infiltração, porém há também registro de poro-pressões positivas nos instrumentos mais rasos, mesmo que estes nunca tenham ficado submersos, indicando que possa sim haver influência da infiltração ou de fluxos subsuperficiais.

O fato de que os piezômetros em condições submersas não registram valores de poro pressão, pode ser uma confirmação da presença de fluxo subsuperficial. Algo esperado, tendo em vista a capacidade drenante do solo coluvionar, além das fraturas e descontinuidades presentes nos leitos rochosos, e de que os instrumentos mais profundos estão instalados nas interfaces entre camadas.

Avaliando as datas nas quais ocorreram registros de escorregamentos próximos ao Morro do Boi, mas em outros taludes, conforme Salah et al. (2019), observou-se que as datas dessas ocorrências, em geral, coincidiam com as datas dos eventos, porém não necessariamente com as datas de picos de poro pressão.

Pode-se supor que não há relação alguma, uma vez que são locais diferentes. Mas, pode-se supor que por serem em regiões próximas sejam taludes com comportamento similares e que o fato de haver um escorregamento em outro talude e não no talude estudado está atrelado ao fato de haver uma estrutura de contenção nesse talude.

Portanto, supondo que há relação entre o talude estudado e as ocorrências registradas em outros locais, poderia se assumir que não fora necessariamente um

acréscimo de poro pressão positiva que ocasionou os escorregamentos e sim quedas na sucção.

Considerando que os escorregamentos podem ocorrer tanto pela redução da sucção nas camadas mais rasas ou pelo acréscimo da poro pressão nas camadas mais profundas, a duração de uma chuva poderia ser estimada como o intervalo de tempo entre a data da chuva e a data para dissipação do acréscimo de poro pressão gerado. Com os dados obtidos nesse trabalho esse tempo poderia ser estimado somando-se os tempos para atingir o pico de poro pressão e o tempo para dissipação, chegando a valores de 3 a 26 dias.

5.1.3 Sucção

Não foi possível estabelecer correlação significativa entre as leituras de sucção e os registros de precipitação e foram identificados padrões de comportamento não esperados para as leituras de sucção.

Entretanto, alguns comportamentos esperados podem ser observados, como o crescimento lento da sucção, formação de um patamar positivo de sucção indicando possíveis limites para o desenvolvimento da sucção em especial para os instrumentos mais profundos e quedas bruscas associadas à registros de precipitação.

Entre os comportamentos não esperados, pode-se associá-los ao problema de cavitação ou ausência de água no reservatório.

Como este tipo de instrumento fora desenvolvido para uso em agricultura e foi adaptado para o uso geotécnico e conforme já sugerido por Ridley et al. (2003a) e Marinho et al. (2008), talvez este tipo de tensiômetro não seria o mais indicado para monitoramentos de longa duração.

A questão não é tanto a capacidade do instrumento, pois ainda há dúvidas sobre a possibilidade de se ler sucções negativas, mas sim a operação de monitoramento, visto que há necessidade de executar o preenchimento do tensiômetro frequentemente.

5.1.4 Perfis de poro pressão medidos e hidrostáticos

As leituras de sucção são coerentes com os perfis hidrostáticos mínimos, mas as leituras de poro pressão positivas não. Isso reforça a tese de que existem fluxos

subsuperficiais que elevam e reduzem o nível do lençol freático, porém limitando a geração de poro pressão.

Há registros de poro pressão nos piezômetros mais rasos, mesmo que esses nunca fiquem submersos, indicando que a frente de umedecimento atinja esta profundidade e levantando a questão sobre as leituras negativas dos tensiômetros.

Seriam todas as leituras negativas de sucção resultado da cavitação ou ausência de água no reservatório? Ou, algumas dessas leituras poderiam realmente estar indicando o avanço de uma frente de umedecimento? Recentemente, Swinka (2020) questionou o fabricante deste tipo de tensiômetro, que informou que estes são capazes de ler até -20 kPa de sucção[1], apesar de suas fichas de especificação não indicarem isso.

5.1.5 Medidas de deslocamentos sub-horizontais

Levando em consideração a precisão dos inclinômetros com base na margem de erros sistemáticos sugeridos por Mikkelsen (2003), pode-se assumir que há um único movimento claro registrado pelos inclinômetros. É o movimento registrado no eixo A (no sentido do pé do talude) do inclinômetro 1, instalado na ilha 2 e dentro da área estabilizada.

O deslocamento total até o dia 02/07/2019 foi de 10,33 mm com uma velocidade média de 1,41 mm/ano, caracterizado como extremamente lento de acordo com Cruden e Varnes (1996).

A velocidade dos deslocamentos é variável, atingindo valores de 5,58 mm/ano nos períodos chuvosos e retrações de até 43% nos períodos mais secos.

Como a solução de contenção adotada, que é um solo grampeado, é uma solução passiva, espera-se que algum deslocamento seja necessário para mobilizar a resistência dos grampos. Portanto, esses deslocamentos não significam uma falha da estrutura.

Considerando o talude como na iminência de romper, caso não houvesse a estrutura de contenção, e usando a profundidade identificada nas leituras do inclinômetro 1, estimou-se os valores de coesão e ângulo de atrito na superfície de escorregamento. Para coesão variando entre 0 kPa e 2 kPa, o ângulo de atrito deve variar entre 29° e 32°.

---

[1] SWINKA, L.M. **Capacidade dos tensiômetros do tipo *jet fill* fazer leituras negativas**. 12 nov. 2020. Informação Verbal.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar da abundância de dados do Morro do Boi, há uma carência de medidas de umidade, o que ajudaria a construir as CRAS *in situ.*

Os dados de umidade, juntamente com uma aferição das CRAS e curvas de permeabilidade ajudariam a identificar a condição de umidade e permeabilidade do solo, anterior a ocorrência de chuva.

Obviamente existe correlação entre a chuva e todas as grandezas estudadas aqui, mas saber a parcela da chuva que infiltra é crucial para se obter coeficientes de correlação melhores. Poder-se-ia desenvolver uma pesquisa para medir o *runoff* e associar com as estimativas de evapotranspiração feitas por Joly (2017) e com isso se obter a relação entre a precipitação e o que infiltra no solo.

Como há muitas dúvidas quanto a acurácia das leituras de sucção e o desempenho dos tensiômetros do tipo *jet fill*, uma pesquisa em ambiente controlado, comparando as leituras destes instrumentos com outros ou com valores conhecidos, poderia responder se estes tensiômetros realmente deveriam ser evitados em pesquisas e monitoramentos geotécnicos ou se apenas uma melhor operação seria suficiente para que os dados obtidos por estes instrumentos fossem mais confiáveis. Além disso, ajudaria a confirmar se esses tensiômetros são capazes de medir sucção negativa e em caso afirmativo, permitira uma nova interpretação dos dados do Morro do Boi e uma melhor compreensão da formação de frente de umedecimento neste local.

Por fim, usando os dados de monitoramento das células de carga e *strain gauges* instalados na contenção do Morro do Boi, seria possível verificar se há correlação dos deslocamentos identificados nesse trabalho com aumentos de carga nos grampos.

REFERÊNCIAS

ATLAS Brasileiro de Desastres Naturais. Universidade Federal de Santa Catarina / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 126 p. : il. color. ; 22 cm. Disponível em https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/, acesso em 21/08/2018

BANCO MUNDIAL. **Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Santa Catarina – novembro de 2008**. Brasilia, 2012. Relatório Técnico. Disponível em: http://documents.worldbank.org, acesso em 21/08/2018

BICALHO, K. V.; MACHADO, S. L.;GERSCOVICH, D. M. S. Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados. In: CARVALHO, J.C. et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: ABMS, 2015. p.297-326

BRESSANI, Luiz **A. Instrumentação em obras geotécnicas–taludes e escavações**. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 5., São Paulo, 2009.

BURGOS, P. C.;CONCIANI, W. Índices físicos, textura, consistência e classificação dos solos. In: CARVALHO, J.C. et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: ABMS, 2015. p.181-204

CAMPBELL SCIENTIFIC. Disponível em <https://www.campbellsci.com.br/>. Acesso em 20 jun. 2018

CAMPOS, T. M. P.; MOTTA, M. F. B. Resistência ao cisalhamento de solos não saturados. In: CARVALHO, J.C. et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: ABMS, 2015. p.465-497

CHOQUET, P.; JUNEAU, F.; DEBREUILLE, P. J.; BESSETTE, J. **Reliability, long-term stability and gage performance of vibrating wire sensors with reference to case histories**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS. 5, Singapura, 1999.

CNT: SEST/SENAT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019**. Brasília, 2019. Relatório. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/relatorio-gerencial, acesso em 01/07/2020.

CONCIANI, W.; BURGOS, P. C.; BEZERRA, R. L. Origem e formação dos Solos, perfis de intemperismo. In: CARVALHO, J.C. et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: ABMS, 2015. p.21-37

CORNFORTH, Derek H.; CORNFORTH, Derek. **Landslides in practice**: investigation, analysis, and remedial/preventative options in soils. J. Wiley, 2005

CUOMO, S.; DELLA SALA, M. Rainfall-induced infiltration, runoff and failure in steep unsaturated shallow soil deposits. **Engineering Geology**, v. 162, p. 118-127, 2013.

CRUDEN, David M.; VARNES, David J. Landslide types and processes. In: TURNER, A. Keith; JAYAPRAKASH, G. P. **Landslides: investigation and mitigation**. Special Report 247. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, 1996. p.36-75. Relatório Técnico

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**, New York. John Wiley and Sons, 1988.

EPL – Empresa de Planejamento e Logistica S.A**. Concessões/Rodovia BR-101/SC**. 2020. Disponível em: https://www.epl.gov.br/rodovia-br-101-sc. Acesso em 01/07/2020

FERREIRA, Kemmyle Samy de Matos et al. **Anlysis of a stabilized slope during a critical pluviometric events through field geothecnical instrumentation data**. In:INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, 10., Rio de Janeiro, 2018.

FERREIRA, Kemmyle Samy de Matos, **Análise hidromecânica de um talude rodoviário composto por solo residual no trecho de Serra do Mar da BR-376/PR.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil)–Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba–PR, 2017.

FIORI, Alberto Pio. **Estabilidade de taludes: exercícios práticos**.São Paulo, Oficina de Textos, 2017.

FREDLUND, D. G. Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 16, n. 1, p. 121-139, 1979.

FREDLUND, D. G. **Use of soil-water characteristic curves in the implementation of unsaturated soil mechanics.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3. Anais, Recife, Brazil. 2002. p. 887-902.

GERSCOVICH, D. M. S.; VARGAS JR, E. A.; DE CAMPOS, T. M. P. On the evaluation of unsaturated flow in a natural slope in Rio de Janeiro, Brazil. **Engineering Geology**, v. 88, n. 1-2, p. 23-40, 2006.

GERSCOVICH, D. M. S.; VARGAS JR, E. A.; CAMPOS, T. M. P. Estabilidade de taludes. In: CARVALHO, J.C. et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: ABMS, 2015. p.613-632

GERSCOVICH, Denise MS. **Estabilidade de Taludes (2ª edição)**. São Paulo, Oficina de Textos, 2016.

GITIRANA JR, G. F. N.; MARINHO, F. A. M.; ALFARO SOTO, M. A. A curva de retenção da água de materiais porosos. In: CARVALHO, J.C. et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: ABMS, 2015. p.205-229

GONZALEZ, A. A. M.; PASSINI, L. B.; KORMANN, A. C. M. Rainfall Effects on Pore Pressure Changes in a Coastal Slope of the Serra do Mar in Santa Catarina. **SOILS AND ROCKS**, v. 40, n. 3, p. 263-278, 2017.

GONZALEZ, A. M. A. **Estudo de séries de leituras obtidas através do monitoramento da instrumentação geotécnica implantada em uma encosta litorânea**. 2013. 188 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013

HUNT, R. E. **Geotechnical investigation methods**. CRC Press, 2007

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **O que é o PIB**. 2020. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php. Acesso em 01/07/2020

JENG, C. J.; YO, Y. Y.; ZHONG, K. L. Interpretation of slope displacement obtained from inclinometers and simulation of calibration tests. **Natural Hazards**, v. 87, n. 2, p. 623-657, 2017.

JOLY, Nelson Henrique et al. **Análise da influência na evapotranspiração em uma encosta litorânea rodoviária**. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 2014.

JOLY, Nelson Henrique, **Análise do efeito das chuvas no desenvolvimento das Poropressões: estudo de caso para um talude contido na Serra do mar**. 2018. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018

LAZARIM, T. P. **Caracterização e retroanálises da ruptura de um talude rodoviário–BR-101, Santa Catarina**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil)–Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba–PR, 2012.

LAZARIM, T. P.; KORMANN, A. C. M. ; SESTREM, L. P. **Caracterização geotécnica e retroanálise da ruptura de uma encosta litorânea situada na BR-101**, Santa Catarina, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRANSEG, 17., Goiânica, 2014.

LEUNG, A. K.; NG, C. W. W. Seasonal movement and groundwater flow mechanism in an unsaturated saprolitic hillslope. **Landslides**, vol. 10, p.455-467, 2013a.

LEUNG, A. K.; NG, C. W. W. Analyses of groundwater flow and plant evapotranspiration in a vegetated soil slope. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 50, n. 12, p. 1204-1218, 2013b.

LEUNG, Anthony Kwan; NG, Charles Wang Wai. Field investigation of deformation characteristics and stress mobilisation of a soil slope. **Landslides**, v. 13, n. 2, p. 229-240, 2016.

LIM, T. T., RAHARDJO, H., CHANG, M. F., & FREDLUND, D. G. Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n. 4, p. 618-628, 1996.

LI, A.G., THAM, L.G., LEE, C.F., LAW, K.T. Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 42, n. 1, p. 13-26, 2005.

LONDONO, Ana C. Discussion of" Response of a residual soil slope to rainfall". **Canadian Geotechnical Journal**, v. 43, n. 9, p. 979-983, 2006.

MACHADO, S. L.; VILAR, O. M. Potenciais de água no solo. In: CARVALHO, JC et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: ABMS, 2015. p. 79-96

MARINHO, F. A. M.; TAKE, W. A.; TARANTINO, Alessandro. Measurement of matric suction using tensiometric and axis translation techniques. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26, n. 6, p. 615, 2008.

MARINHO, F.A.M.; SOTO, M.A.A.; GITIRANA Jr, G.F.N. Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. In: CARVALHO, J.C. et al. **Solos não saturados no contexto geotecnico**. São Paulo: ABMS, 2015. p. 231-256

MASSAD, Faiçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

MIKKELSEN, P. Erik. **Advances in inclinometer data analysis**. In: SYMPOSIUM ON FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, 6., Oslo, 2003.

MONTEIRO, Maurici Amantino. Caracterização climática do estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. **Geosul**, v. 16, n. 31, p. 69-78, 2001.

NG, C. W.W.; SPRINGMAN, S. M.; ALONSO, E. E. Monitoring the performance of unsaturated soil slopes. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26, n. 6, p. 799-816, 2008

PRETTO, J. H. F. **Análise de tensão x deformação de uma encosta natural: um estudo de caso: Morro do Boi – Balneário Camburiú/SC**, 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014

PRETTO, J.H.F.; SESTREM, L.P..; KORMANN, A.C.M.; MARINHO, F.A.M. **Caracterização das Camadas Não Saturadas de Uma Encosta Litorânea: Determinação da Curva de Retenção de água**. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ENCOSTAS, 6., Angra dos Reis, 2013.

PRETTO, José Henrique Ferronato et al. **Mapeamento geotécnico de uma encosta litorânea em Santa Catarina a partir de ensaios geofísicos eletrorresistivos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRANSEG, 17., Goiânia, 2014

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

RIDLEY, A. M.; DINEEN, k.; BURLAND, J.B; VAUGHAN, P.R. Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering. **Géotechnique**, vol. 53, n. 2, p. 241-253, 2003a.

RIDLEY, A. M.; BRADY, K. C.; VAUGHAN, P. R. **Field measurement of pore water pressures**. Crowthorne, Berkshire, UK: Transport Research Laboratory, 2003b. Relatório Técnico.

SALAH, ISABEL CRISTINA et al. **Classificação da Precipitação Diária numa Região Litorânea de Santa Catarina e Relação com Ocorrências de Deslizamentos**. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICAS DA ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL – GEOSUL,12., Joinville, 2019.

SANTOS, D. R. **Casos de instabilidade de taludes ao longo das rodovias BR-376/PR e BR-101/SC – Eventos de 2008 e 2011.** 2014. 150 f. Dissertação de mestrado – Engenharia de Infraestrutura aeronáutica / Infraestrutura aeroportuária, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014

SESTREM, L. P. **Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea**. 2012. 195 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012

SESTREM, L. P., DYMINSKI, A. S., KORMANN, A. C. M., & dos Santos, C. J. A. **Retroanálise de estabilidade de talude rodoviário em uma encosta litorânea em Santa Catarina**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 16., Porto de Galinhas, 2012.

SESTREM, L. P.; KORMANN, A. C. M.; MARINHO, F. A. M. A field study on the influence of rainfall intensity, suction and load distribution, in a reinforced unsaturated slope in Brazil. In: **Landslides and Engineered Slopes**. Experience, Theory and Practice. CRC Press, 2018. p. 1829-1834.

SESTREM, L. P.; KORMANN, A. C. M.; MARINHO, F. A. M. Precipitation Influence on the Distribution of Pore Pressure and Suction on a Coastal Hillside. **SOILS AND ROCKS**, v. 38, n. 1, p. 81-92, 2015.

SIMEONI, L.; MONGIOVÌ, L. Inclinometer monitoring of the Castelrotto landslide in Italy. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 133, n. 6, p. 653-666, 2007.

STARK, T. D.; CHOI, H. Slope inclinometers for landslides. **Landslides**, v. 5, n. 3, p. 339, 2008.

TAMI, D; RAHARDJO, H; LEONG, E. Effects of hysteresis on steady-state infiltration in unsaturated slopes. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 9, p. 956-967, 2004.

TARANTINO, A; RIDLEY, A. M.; TOLL, D. G. Field measurement of suction, water content, and water permeability. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26, n. 6, p. 751-782, 2008

TSAPARAS, I, RAHARDJO, H, TOLL, D.G., LEONG, E. Infiltration characteristics of two instrumented residual soil slopes. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 40, n. 5, p. 1012-1032, 2003.

UNESP – Universidade do Estado de São Paulo – Campus Rio Claro – **Curso de Geologia Ambiental pela Internet**. Disponível em < http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/> Acesso em 10 de julho de 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2014** / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres; Banco Mundial [Organização Rafael Schadeck] - Florianópolis: CEPED UFSC, 2016. 230 p.

URCIUOLI, G. et al. Long-term investigations on the pore pressure regime in saturated and unsaturated sloping soils. **Engineering Geology**, v. 212, p. 98-119, 2016.

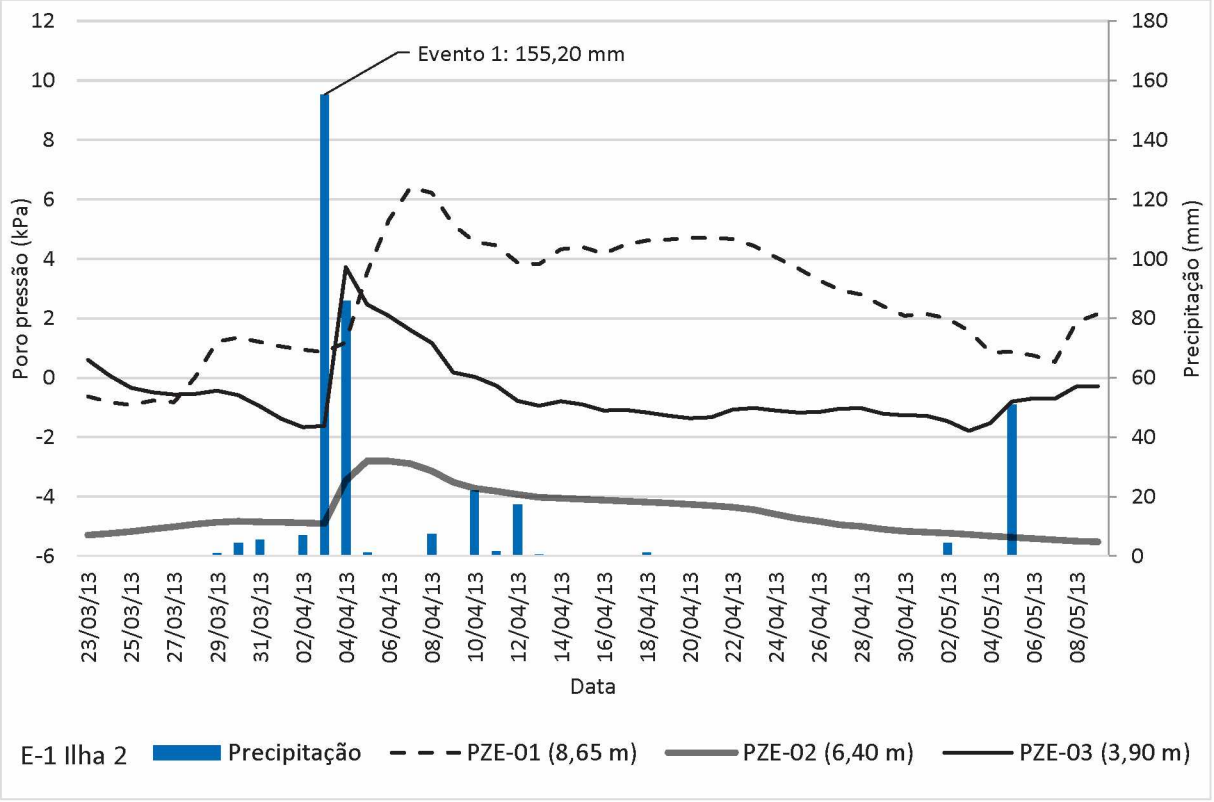
YAN, W. M.; ZHANG, G. Soil-water characteristics of compacted sandy and cemented soils with and without vegetation. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 52, n. 9, p. 1331-1344, 2015.

ANEXOS

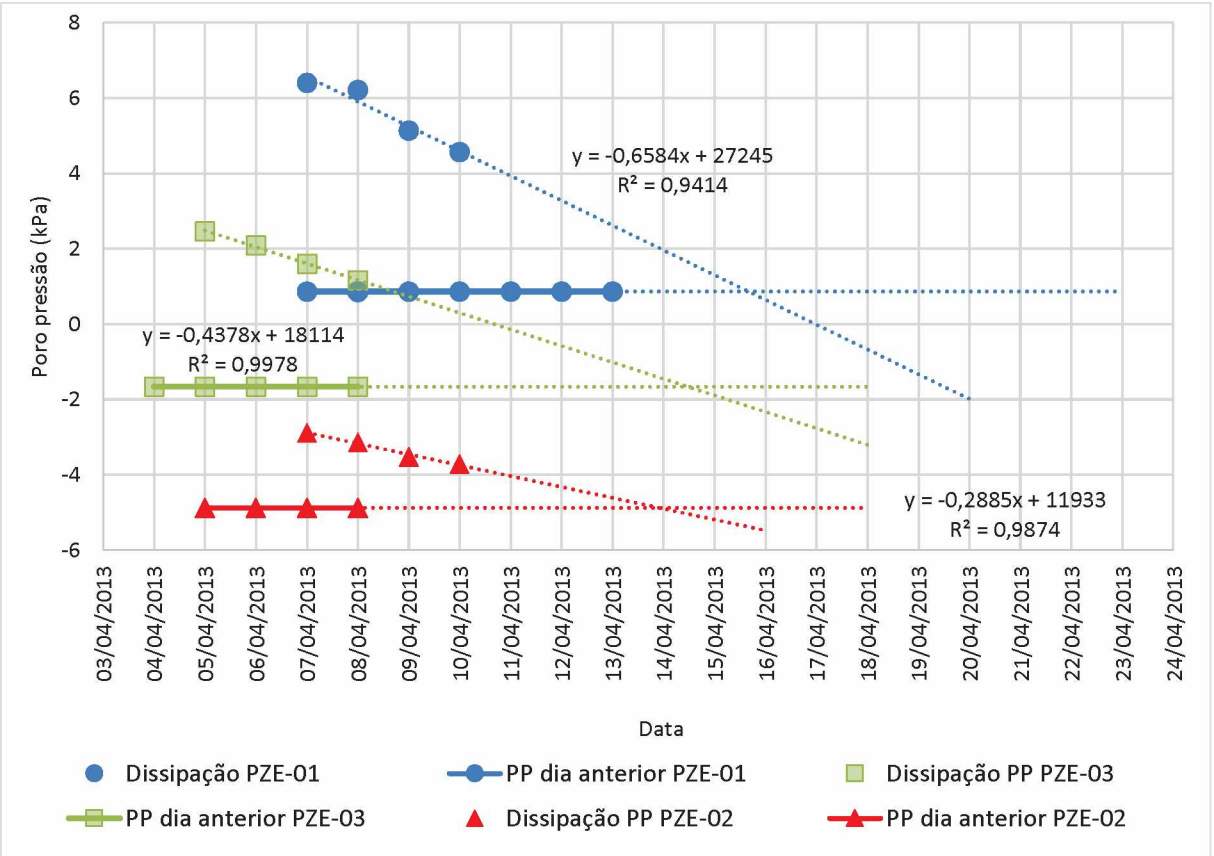
ANEXO 1

Gráficos das análises de acréscimo de poro pressão e dissipação de poro pressão.

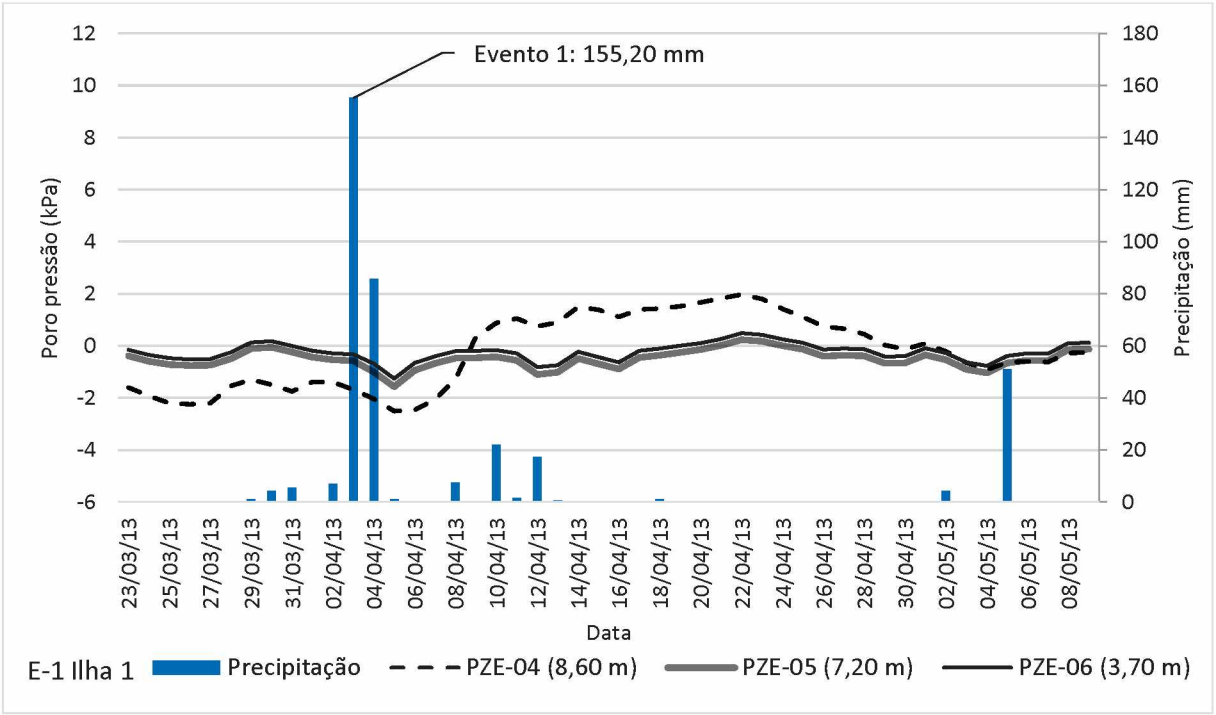
Evento 1 – 23/03/2013 a 09/05/2013 – Ilha 2



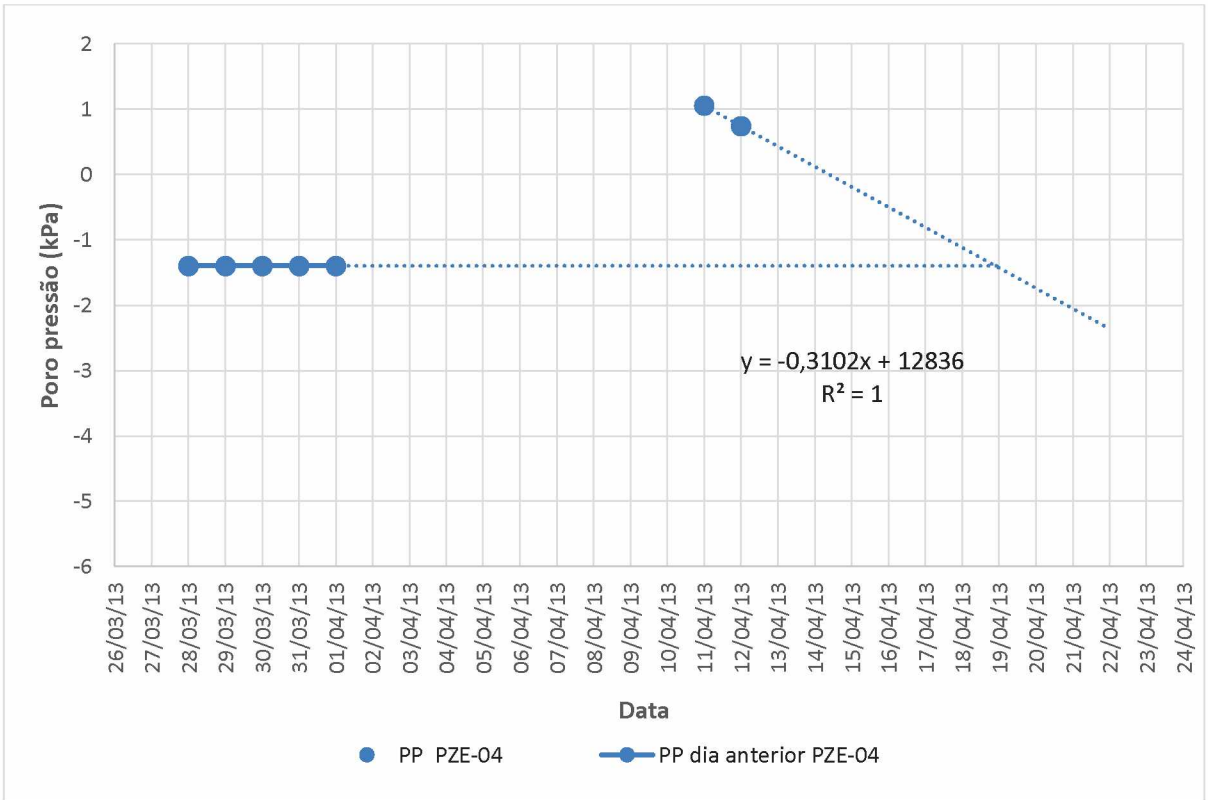
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 1 na Ilha 2



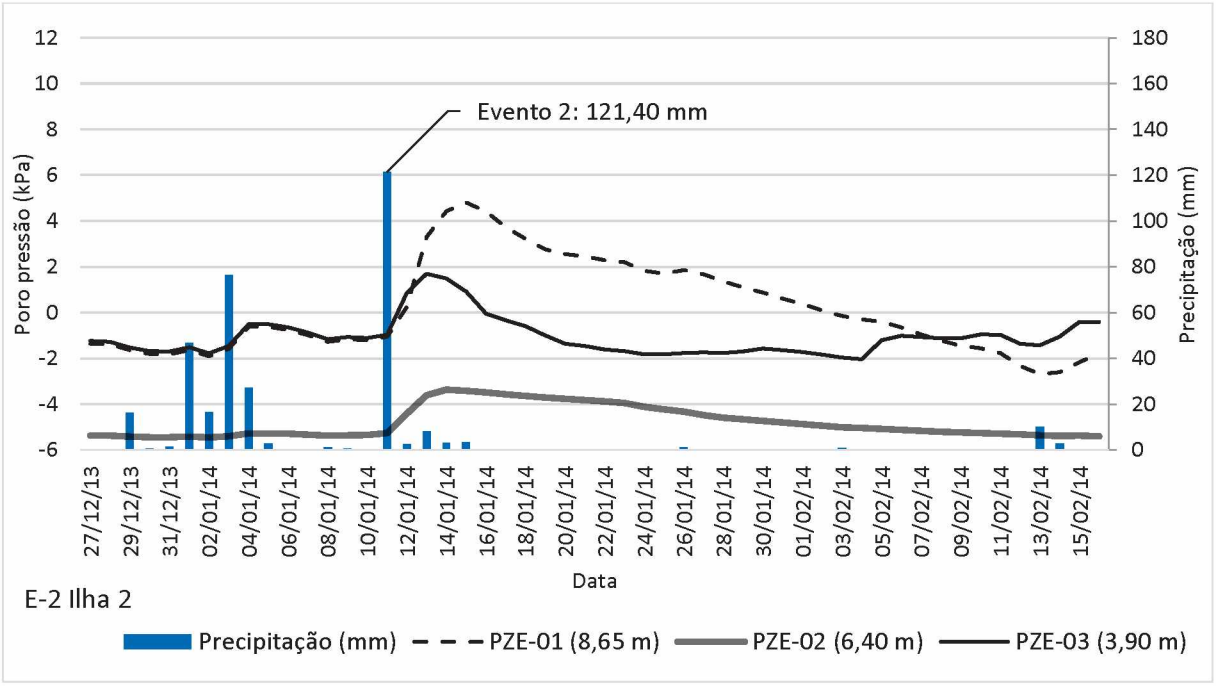
Evento 1 – 23/03/2013 a 09/05/2013 – Ilha 1



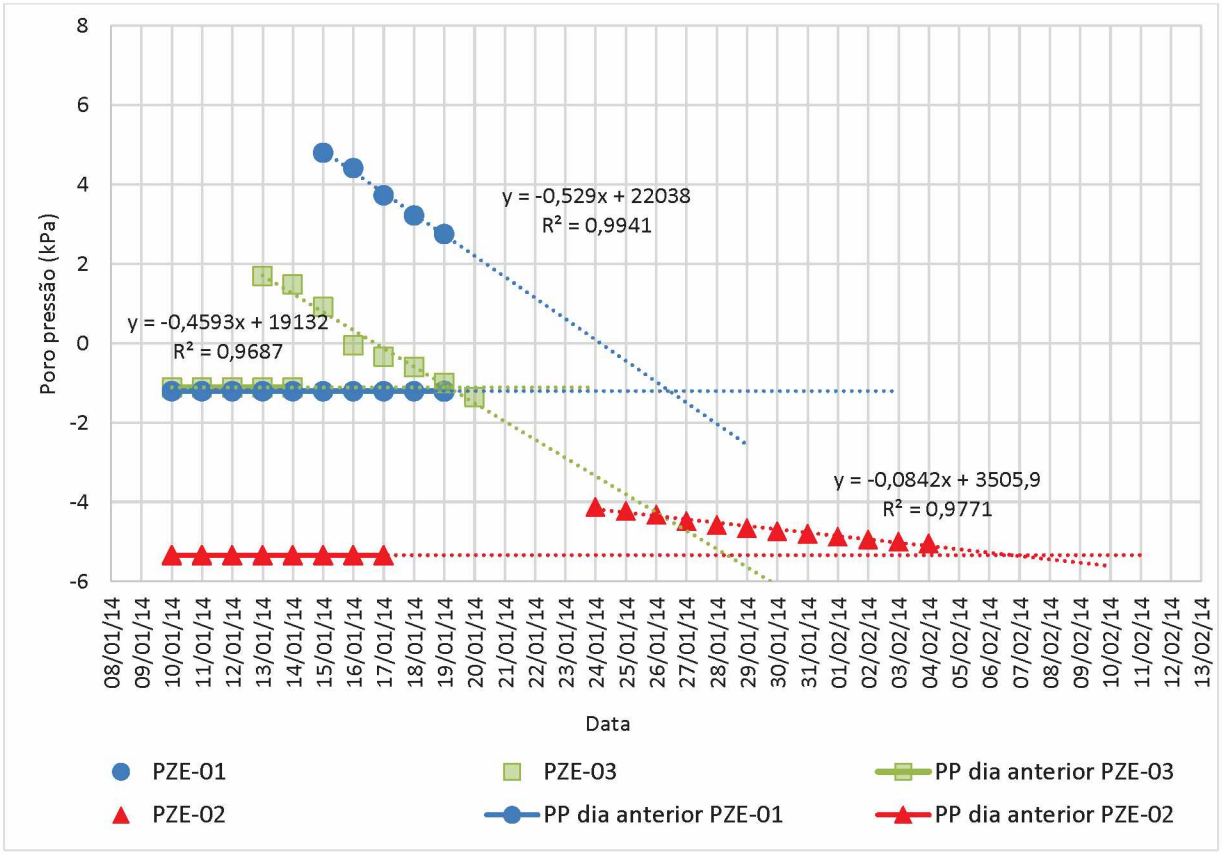
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 1 na Ilha 1



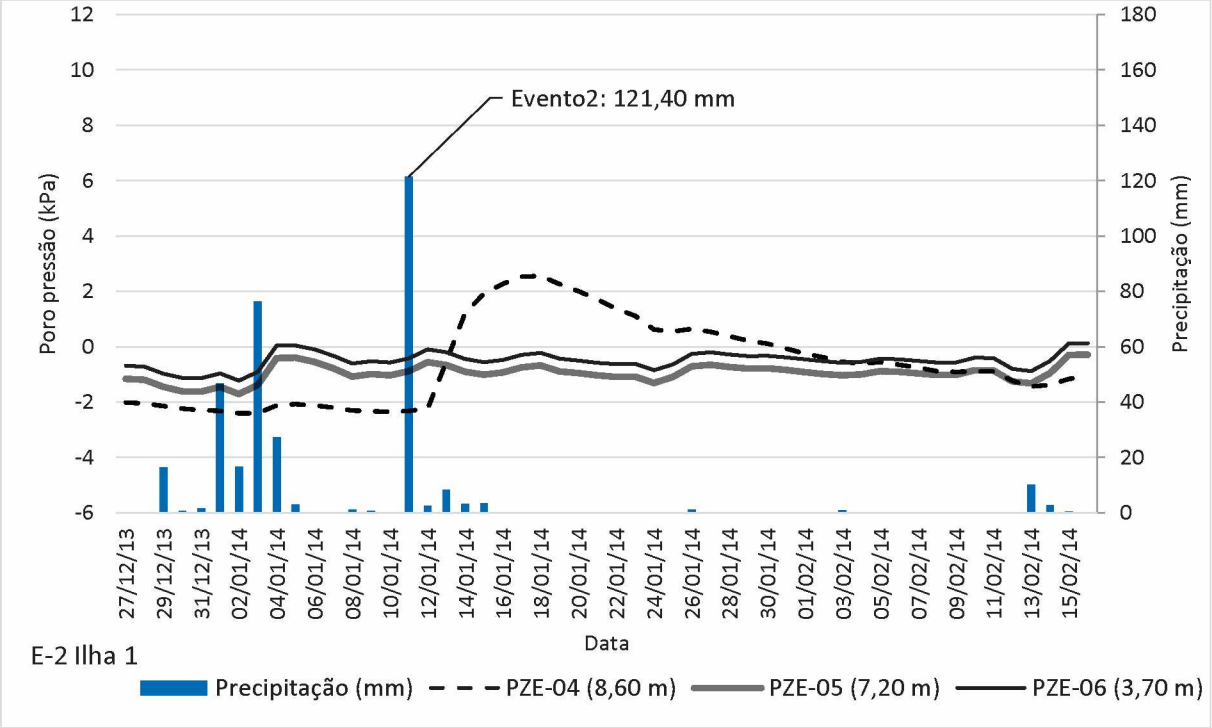
Evento 2 – 27/12/2013 a 16/02/2014 – Ilha 2



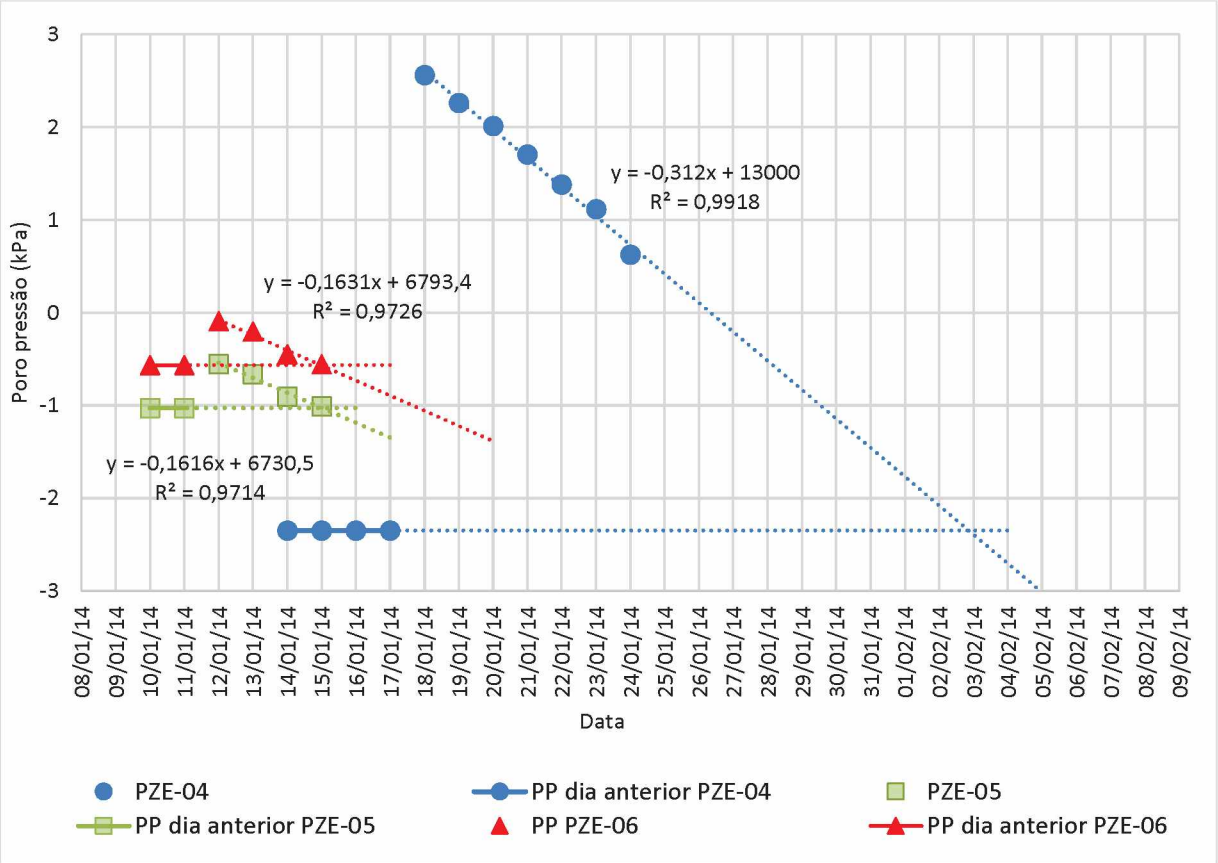
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 2 na Ilha 2



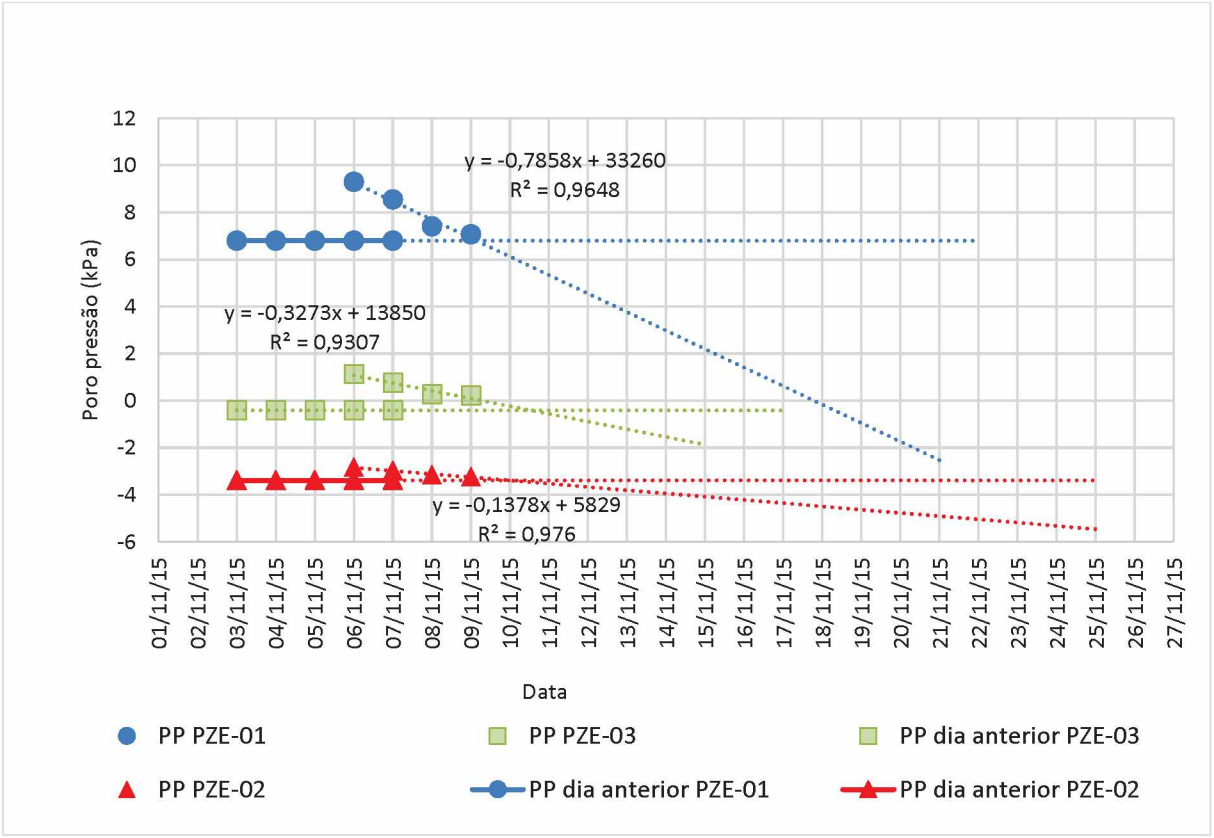
Evento 2 – 27/12/2013 a 16/02/2014 – Ilha 1



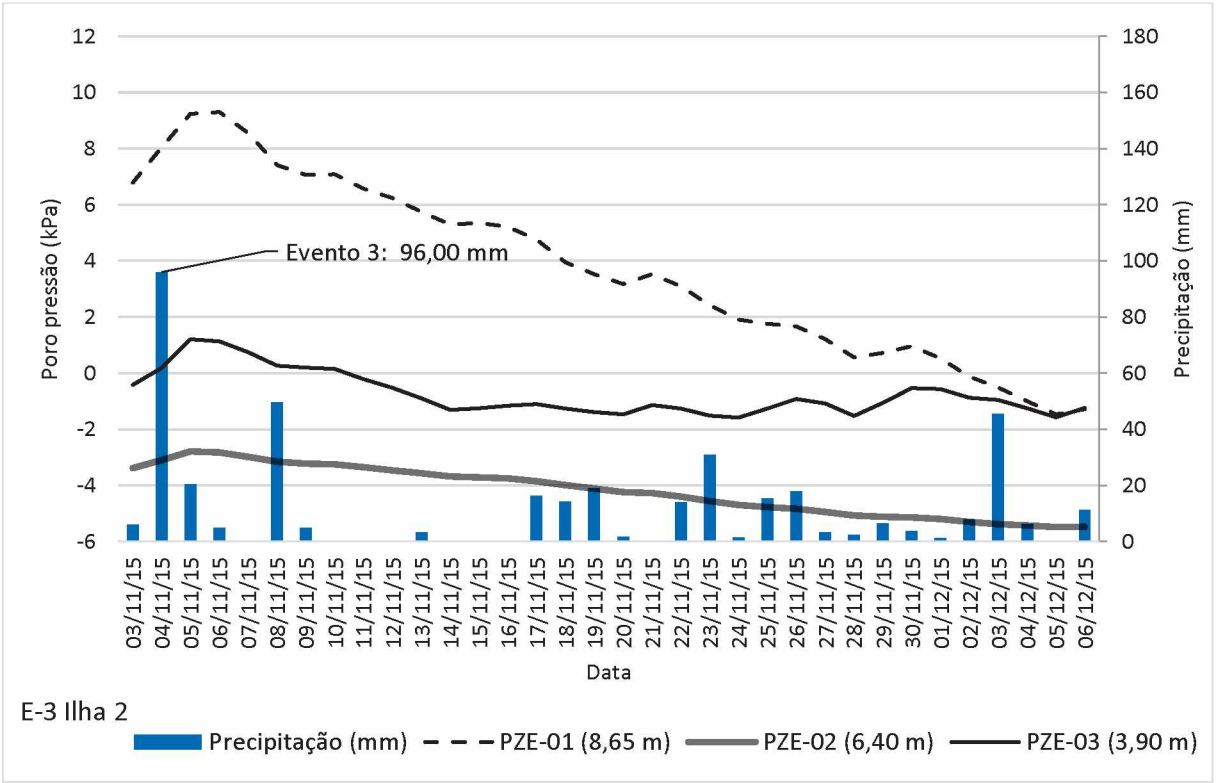
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 2 na Ilha 1



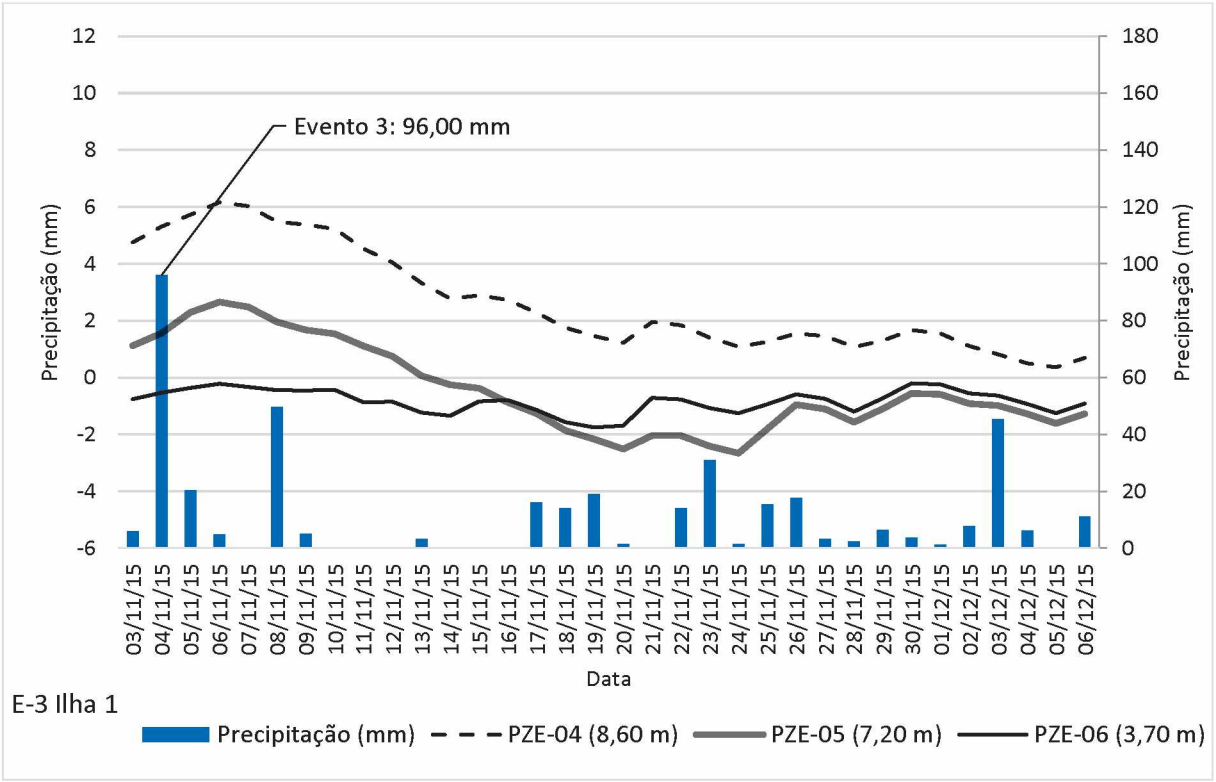
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 3 na Ilha 2



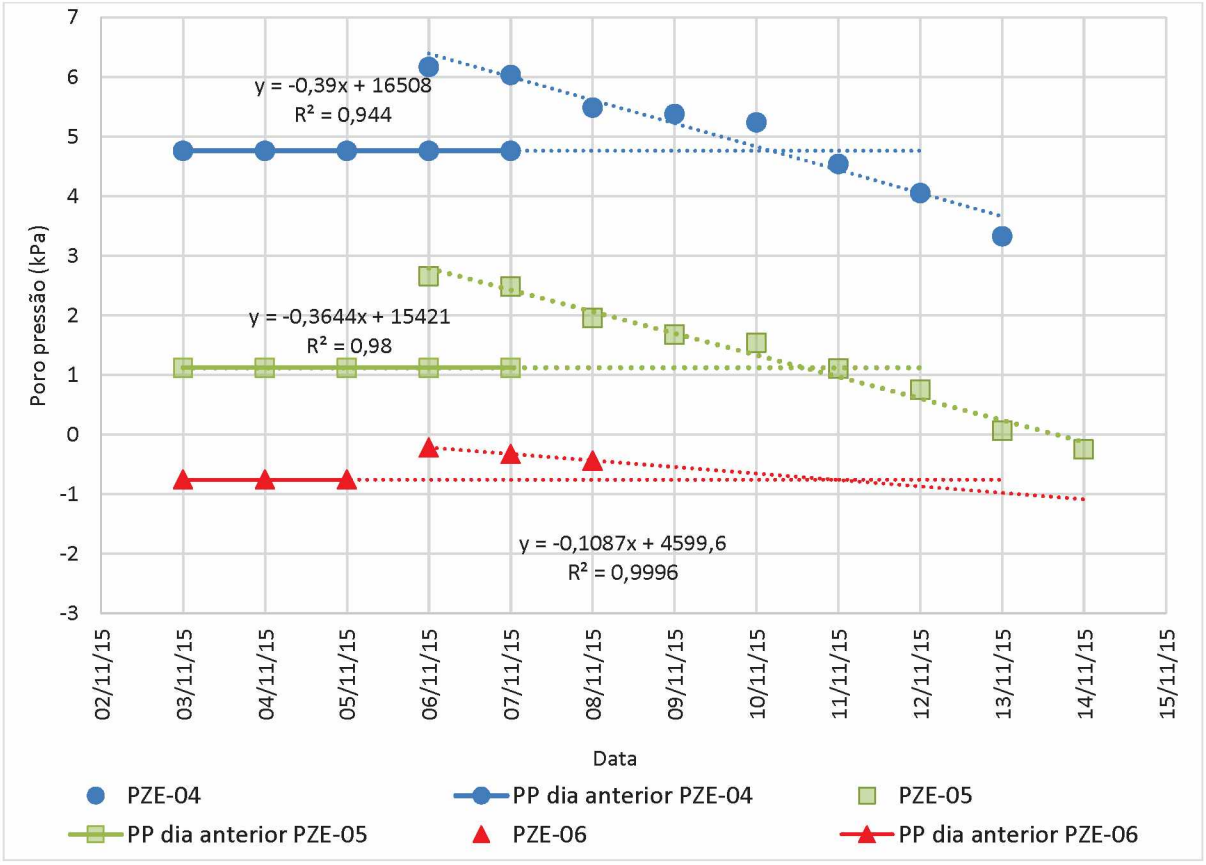
Evento 3 – 29/08/15 a 06/12/2015 – Intervalo final de 03/11/2015 a 06/12/2015 – Ilha 2



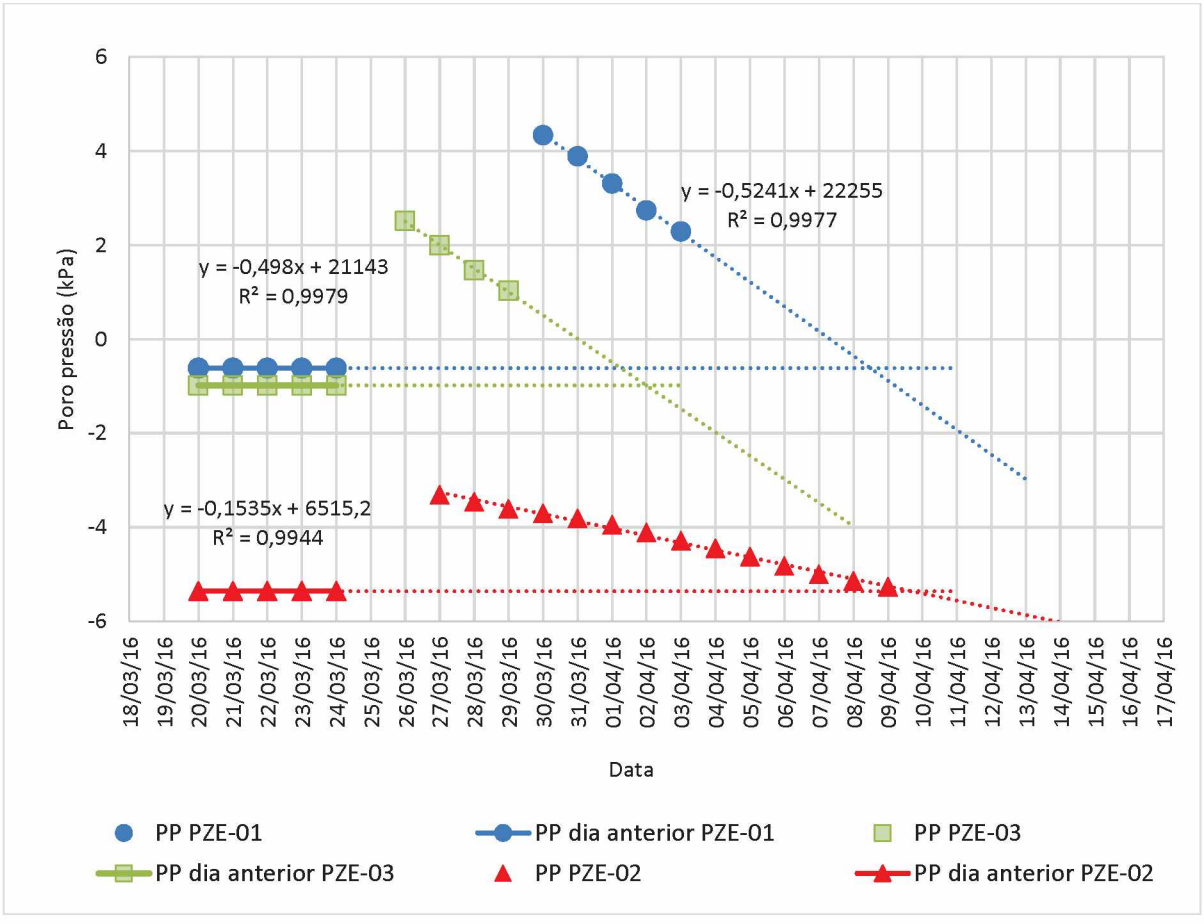
Evento 3 – 29/08/15 a 06/12/2015 – Intervalo final de 03/11/2015 a 06/12/2015 – Ilha 1



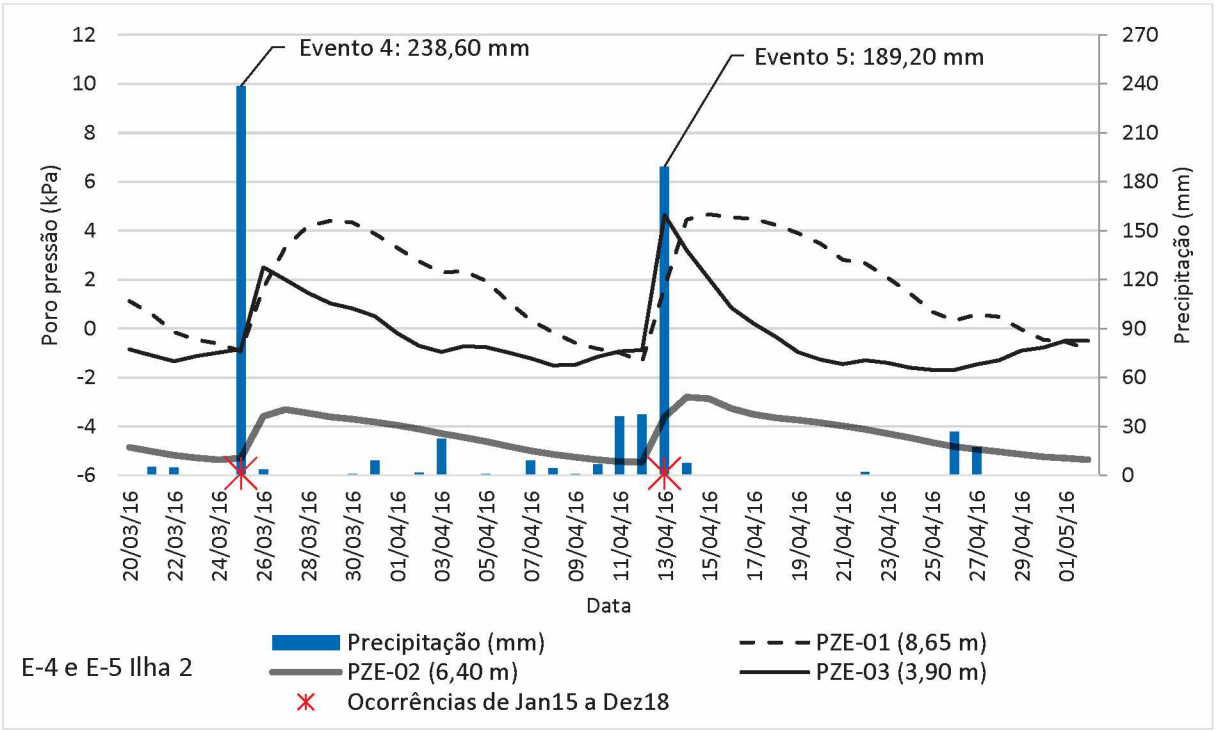
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 3 na Ilha 1

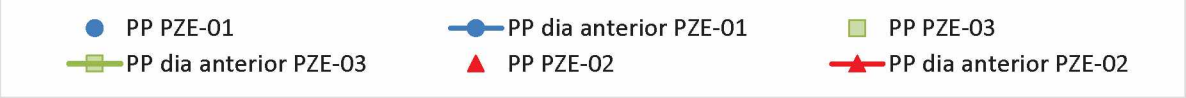


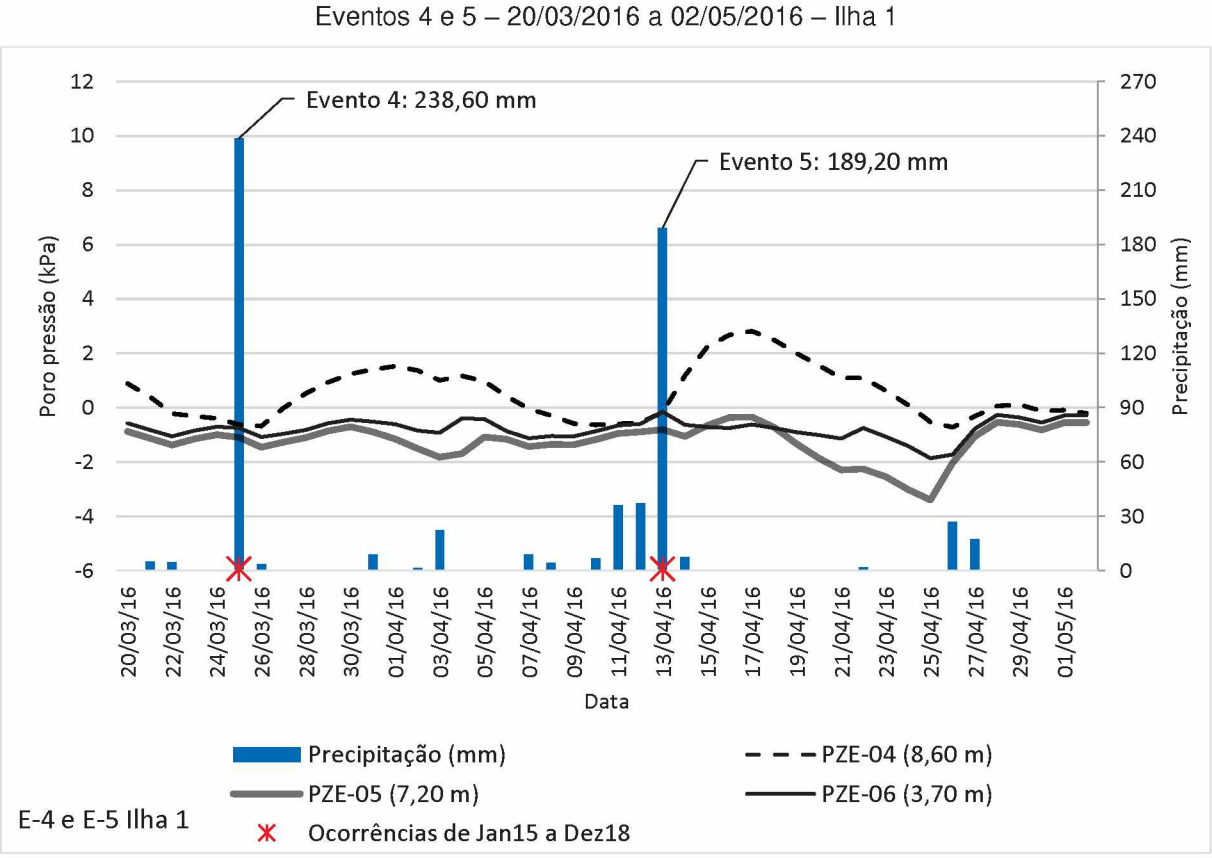
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 4 na Ilha 2

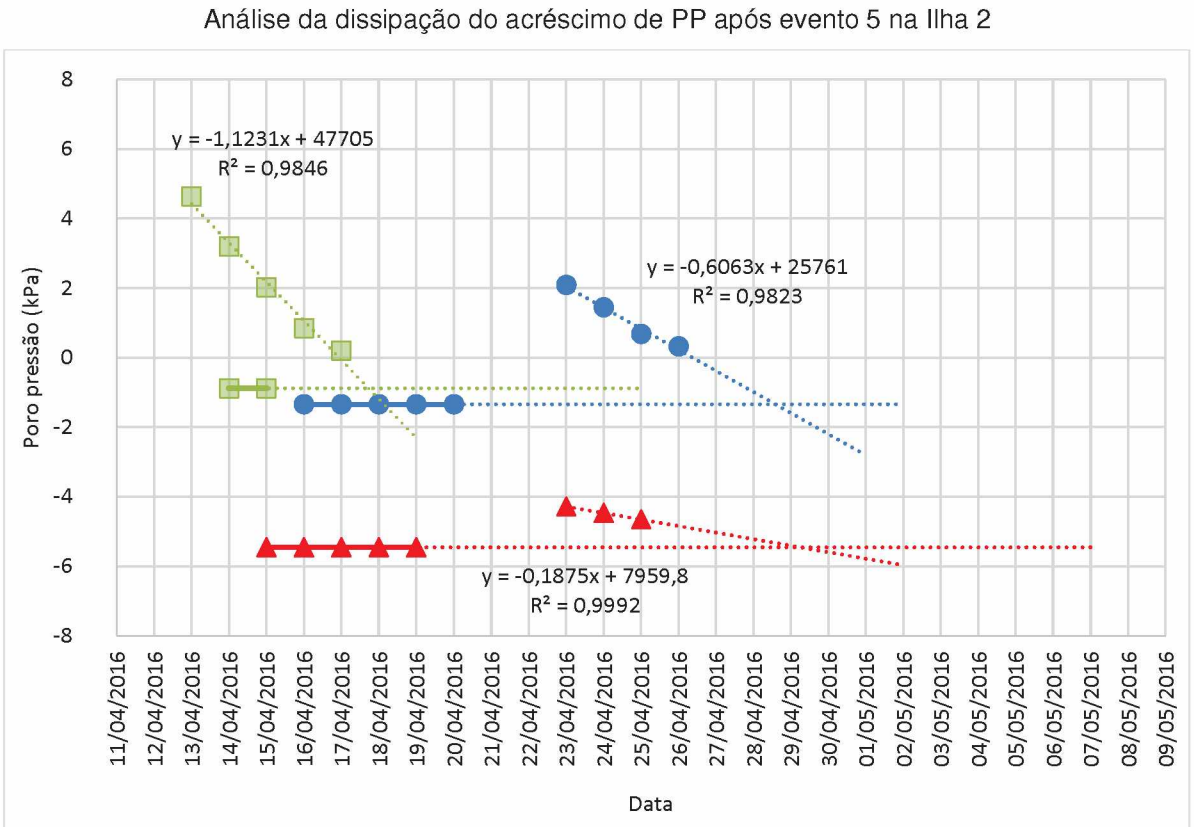


Eventos 4 e 5 – 20/03/2016 a 02/05/2016 – Ilha 2

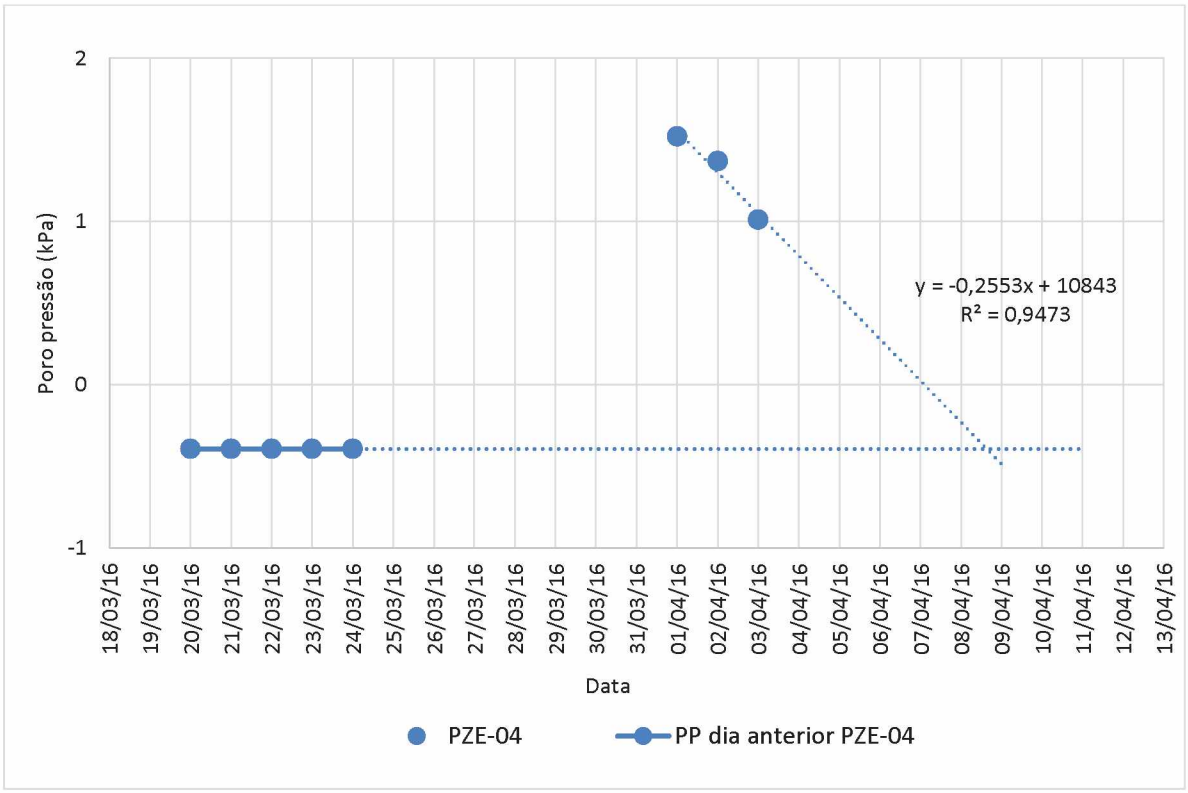



PP PZE-01
PP dia anterior PZE-01
PP PZE-03
PP dia anterior PZE-03
PP PZE-02
PP dia anterior PZE-02

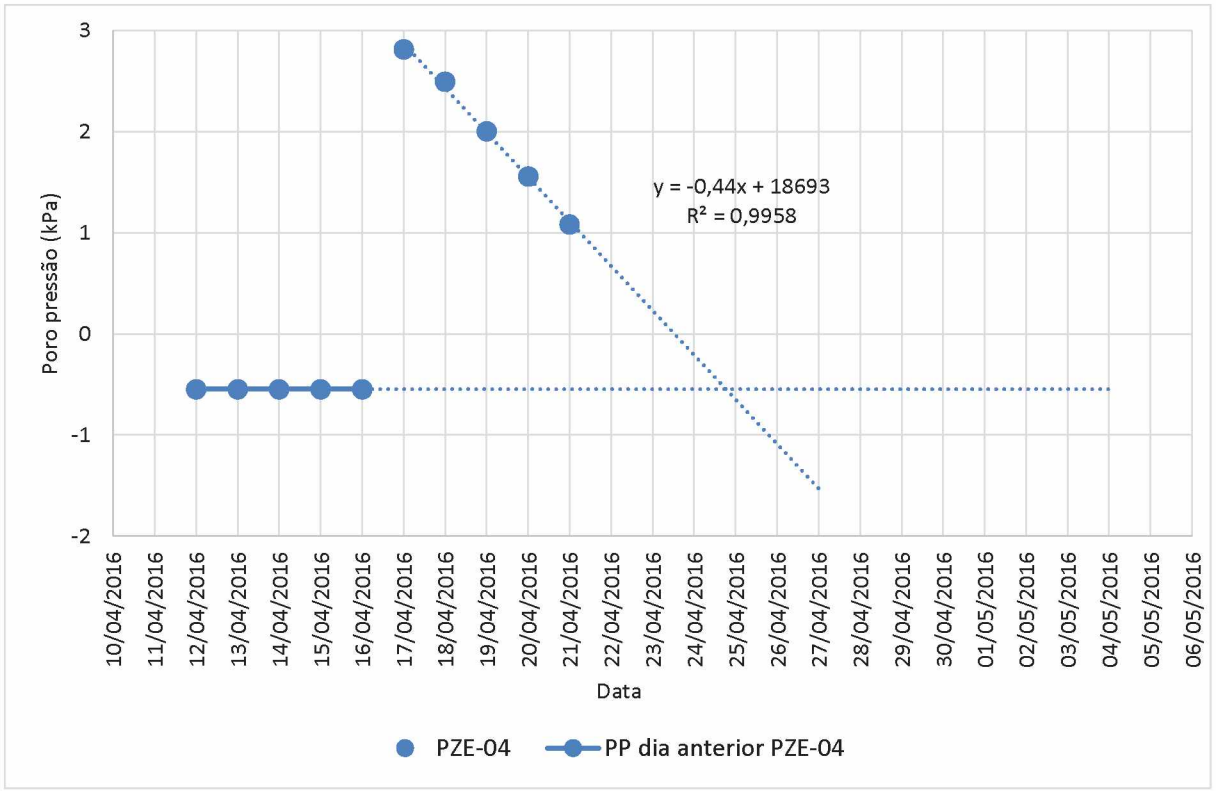

Eventos 4 e 5 – 20/03/2016 a 02/05/2016 – Ilha 1
Evento 4: 238,60 mm
Evento 5: 189,20 mm
Poro pressão (kPa)
Precipitação (mm)
Data
Precipitação (mm)
PZE-04 (8,60 m)
PZE-05 (7,20 m)
PZE-06 (3,70 m)
Ocorrências de Jan15 a Dez18
E-4 e E-5 Ilha 1


Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 5 na Ilha 2
y = -1,1231x + 47705
R² = 0,9846
y = -0,6063x + 25761
R² = 0,9823
y = -0,1875x + 7959,8
R² = 0,9992
Poro pressão (kPa)
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
11/04/2016
12/04/2016
13/04/2016
14/04/2016
15/04/2016
16/04/2016
17/04/2016
18/04/2016
19/04/2016
20/04/2016
21/04/2016
22/04/2016
23/04/2016
24/04/2016
25/04/2016
26/04/2016
27/04/2016
28/04/2016
29/04/2016
30/04/2016
01/05/2016
02/05/2016
03/05/2016
04/05/2016
05/05/2016
06/05/2016
07/05/2016
08/05/2016
09/05/2016
Data

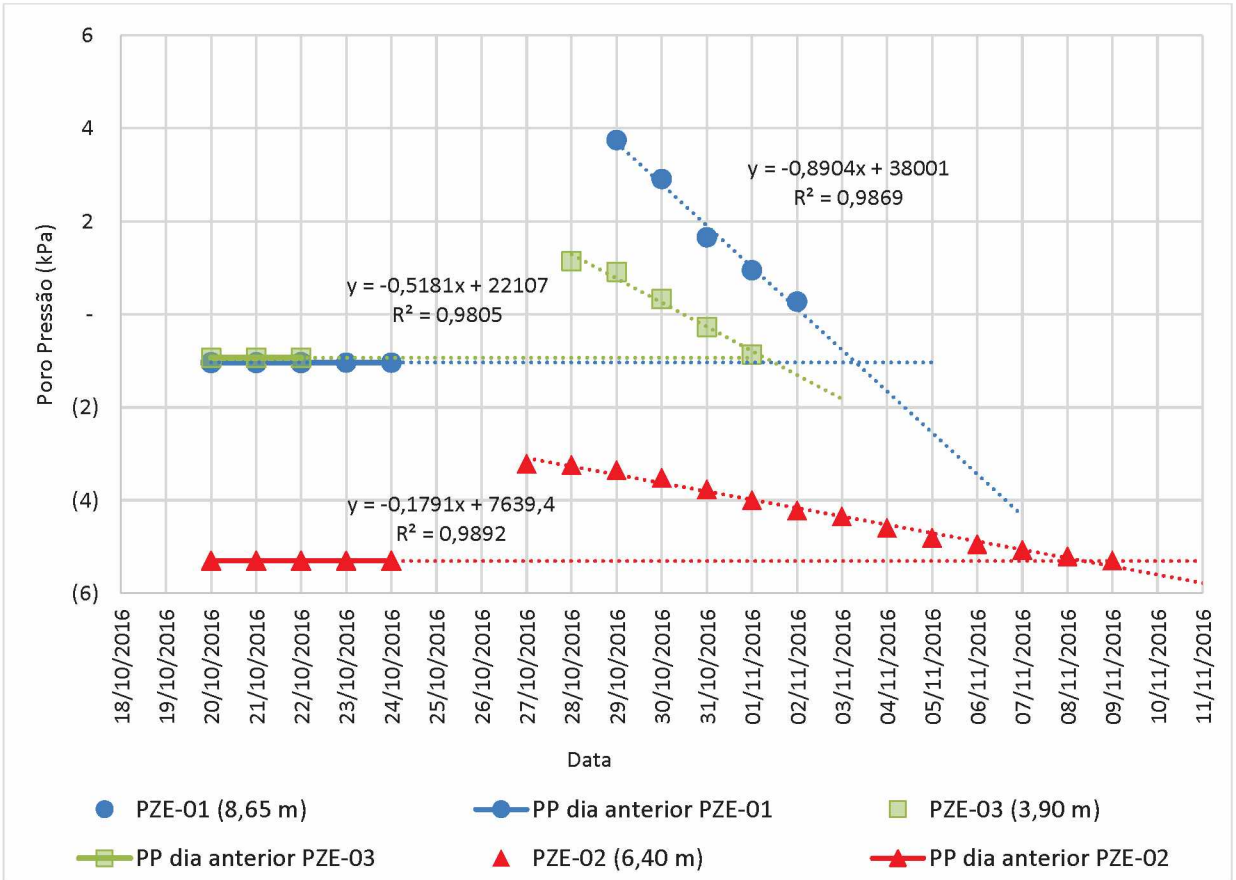
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 4 na Ilha 1



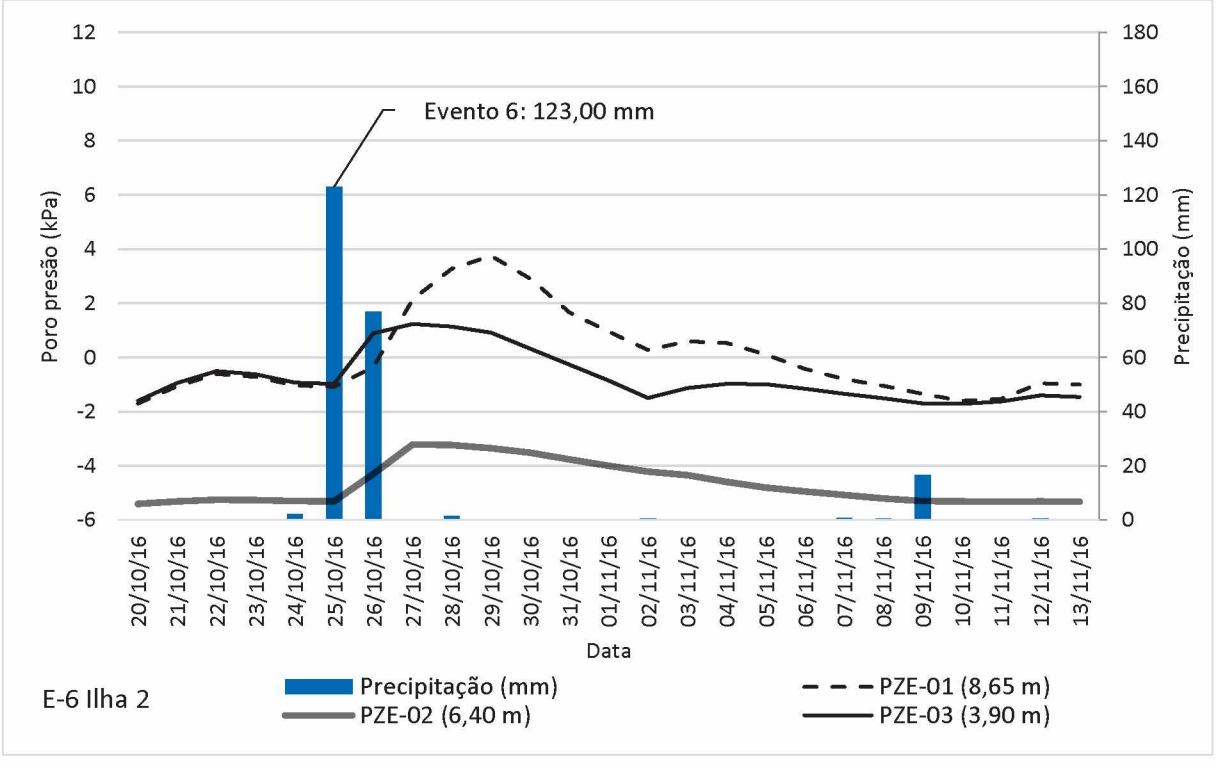
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 5 na Ilha 1



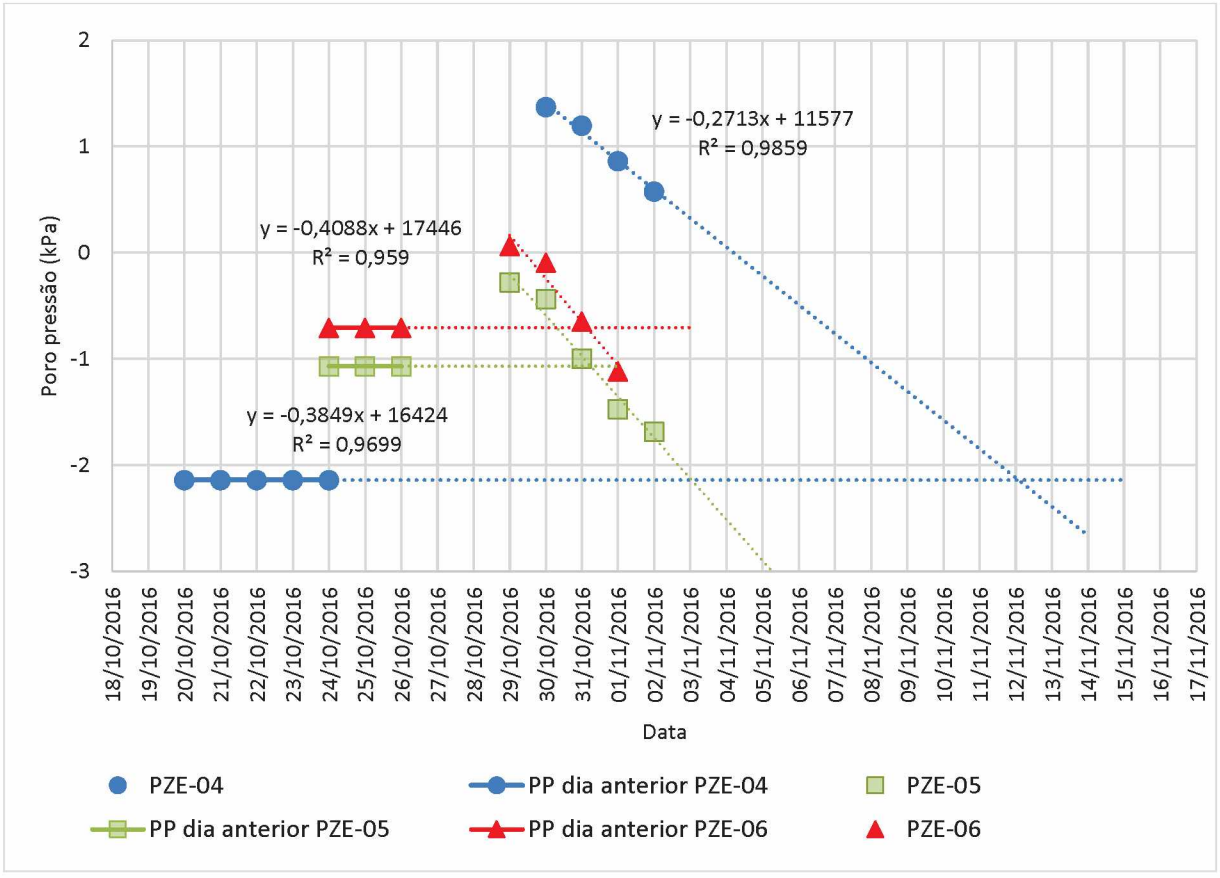
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 6 na Ilha 2

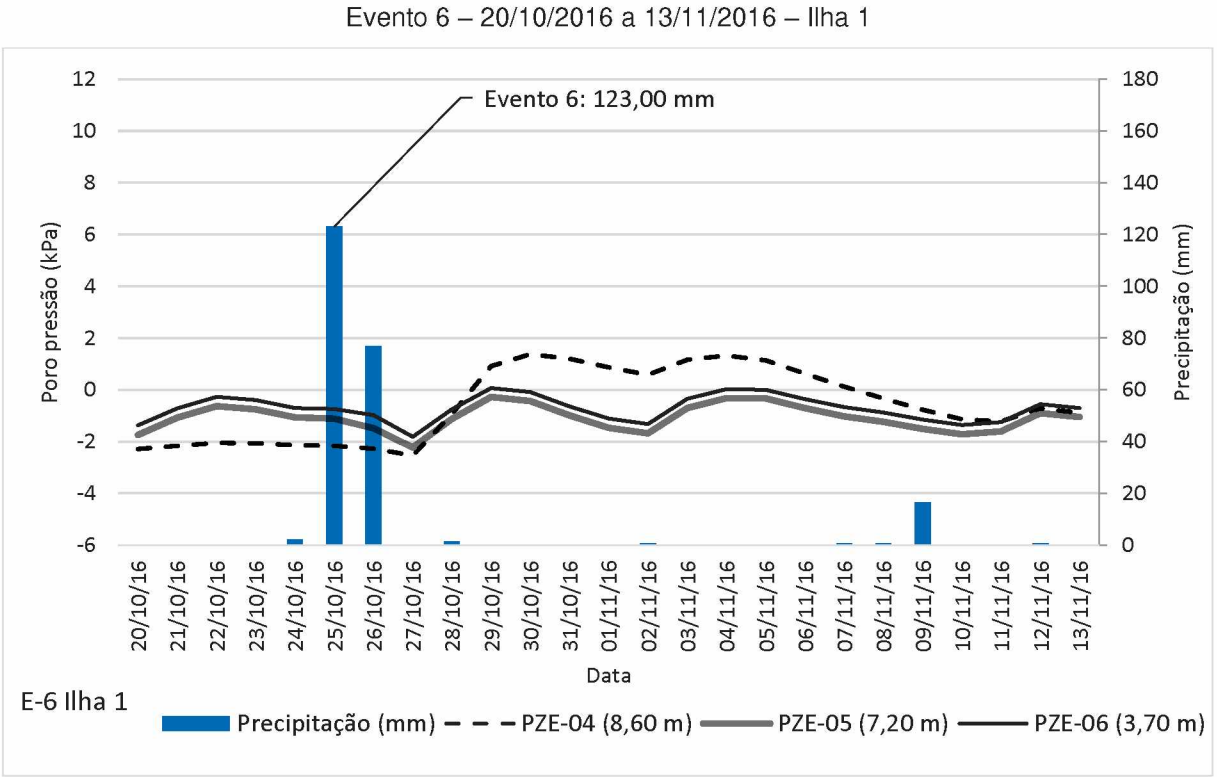


Evento 6 – 20/10/2016 a 13/11/2016 – Ilha 2

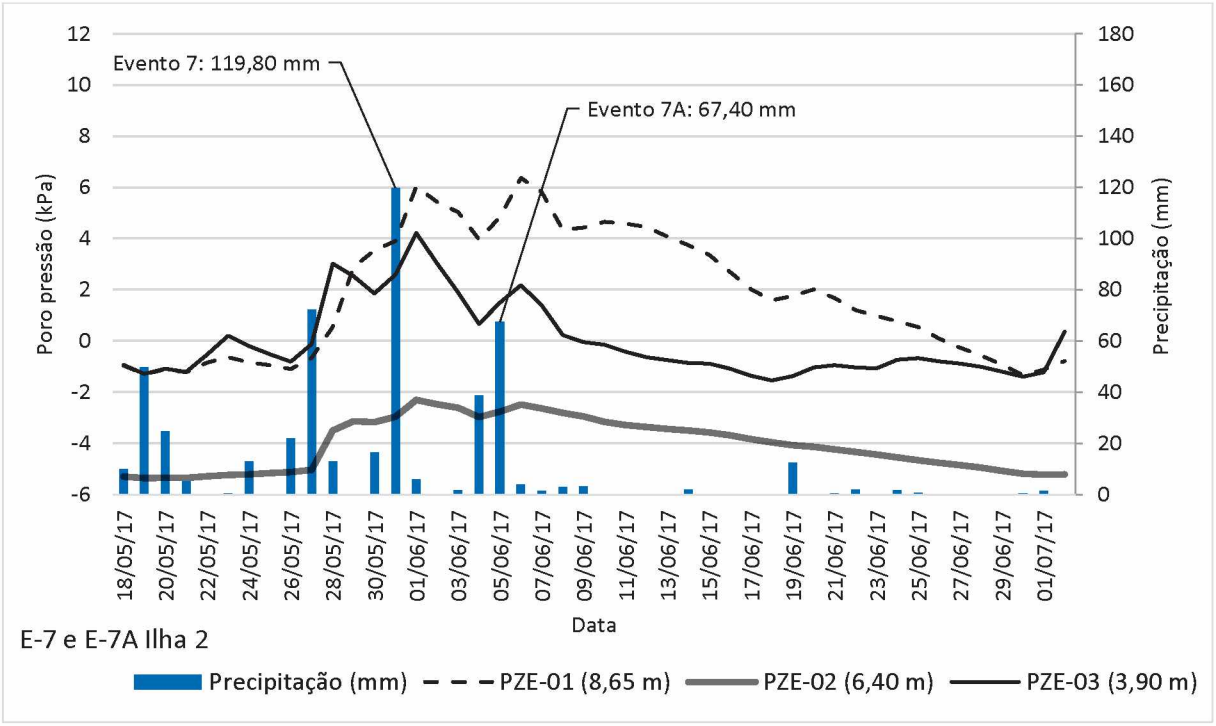


Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 6 na Ilha 1

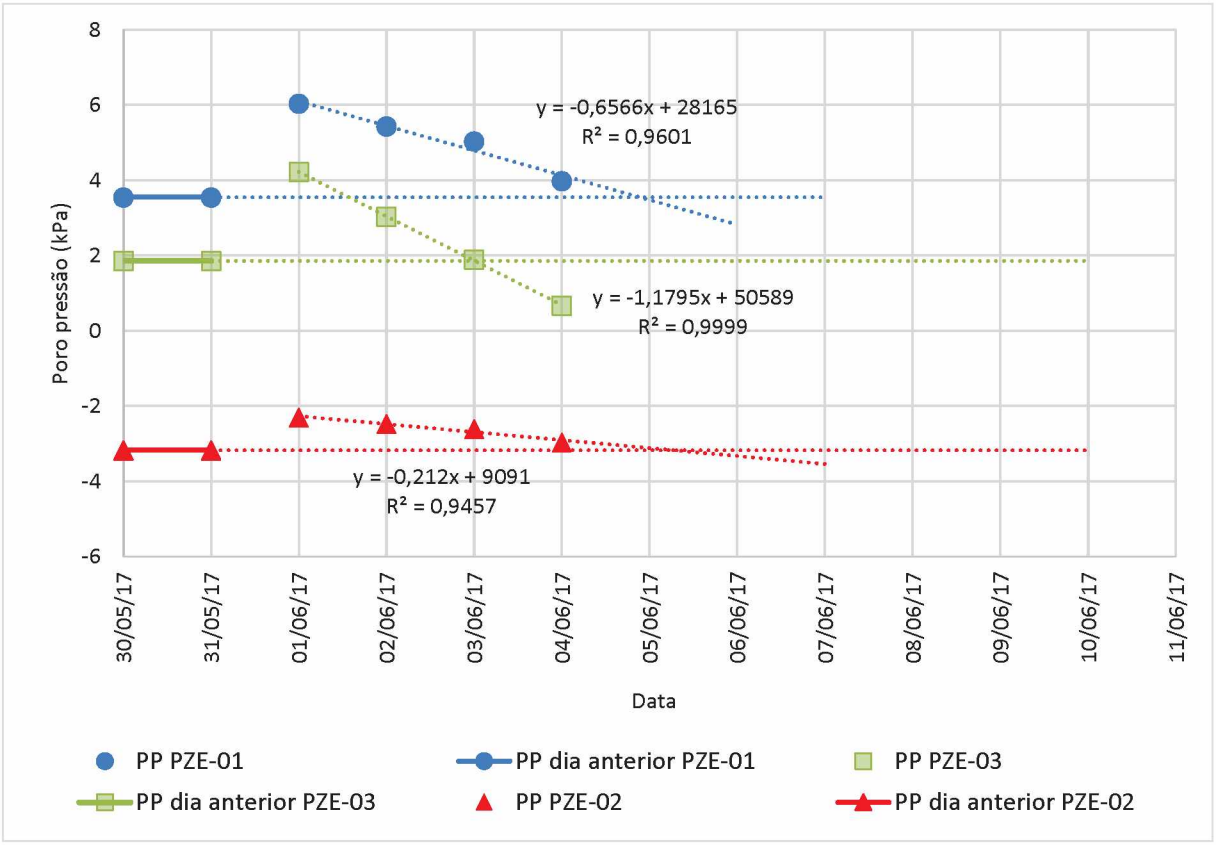



Evento 6 – 20/10/2016 a 13/11/2016 – Ilha 1
Evento 6: 123,00 mm
Poro pressão (kPa)
Precipitação (mm)
12
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
20/10/16
21/10/16
22/10/16
23/10/16
24/10/16
25/10/16
26/10/16
27/10/16
28/10/16
29/10/16
30/10/16
31/10/16
01/11/16
02/11/16
03/11/16
04/11/16
05/11/16
06/11/16
07/11/16
08/11/16
09/11/16
10/11/16
11/11/16
12/11/16
13/11/16
Data
E-6 Ilha 1
Precipitação (mm)
PZE-04 (8,60 m)
PZE-05 (7,20 m)
PZE-06 (3,70 m)

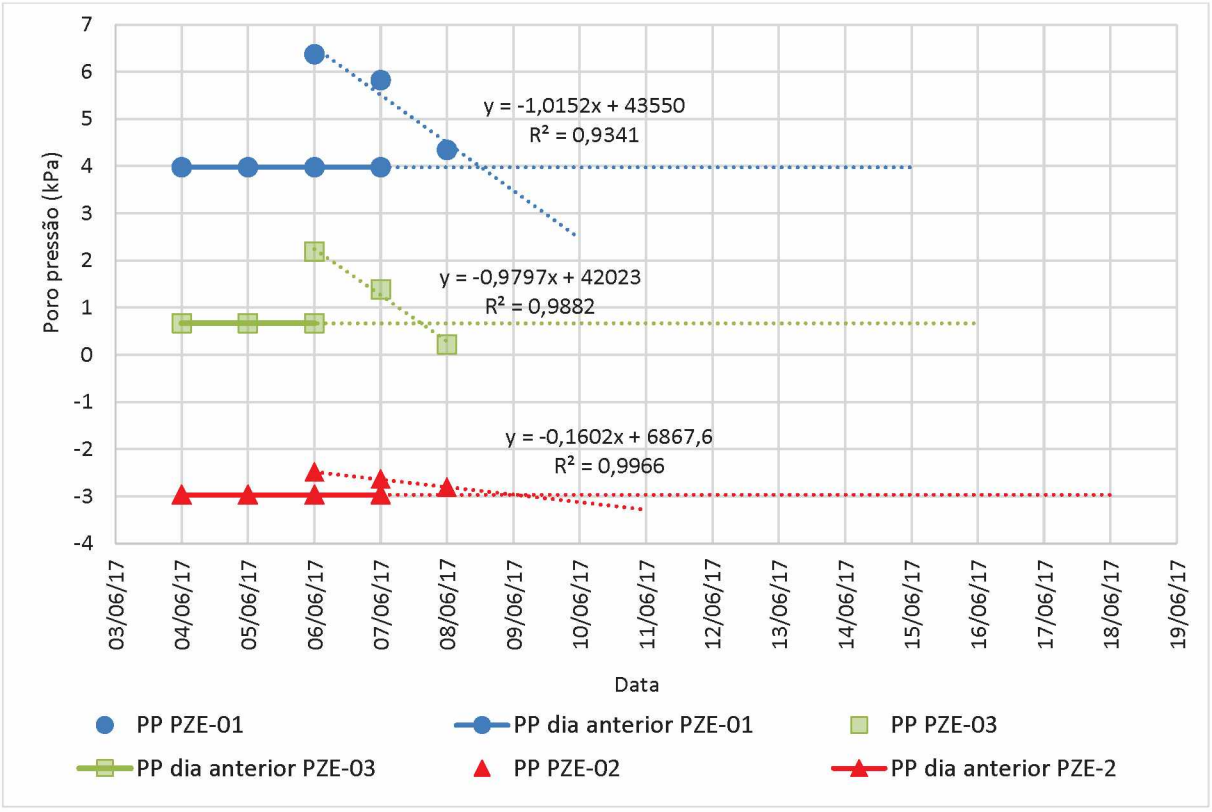
Eventos 7 e 7A – 18/05/2017 a 02/07/2017 – Ilha 2



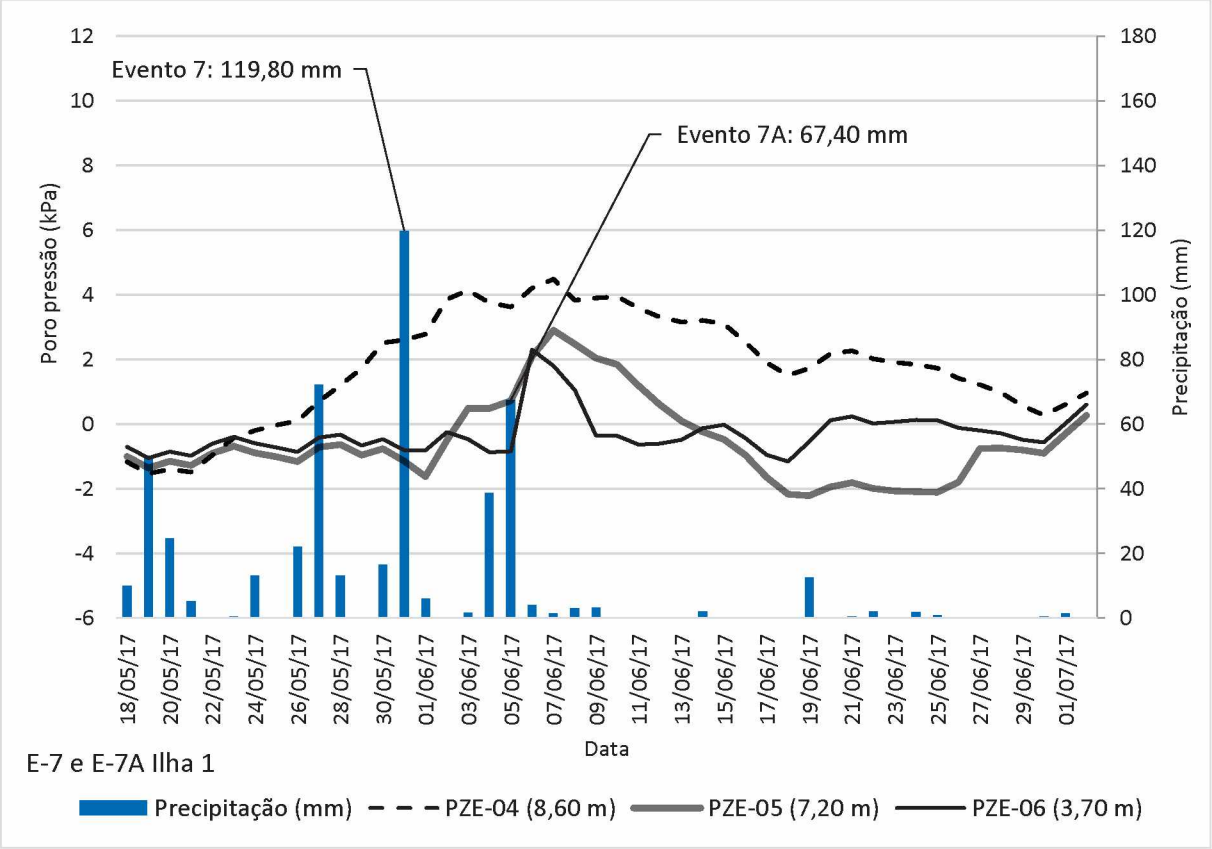
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 7 na Ilha 2



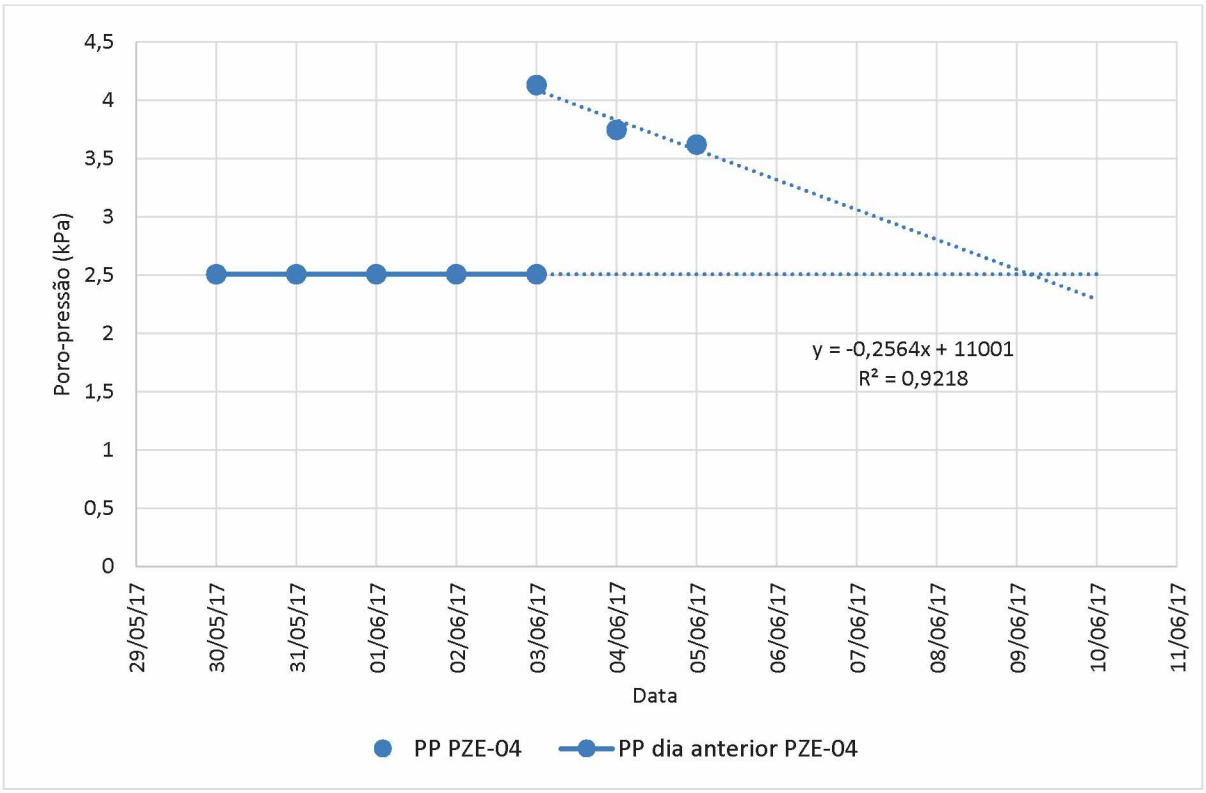
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 7A na Ilha 2



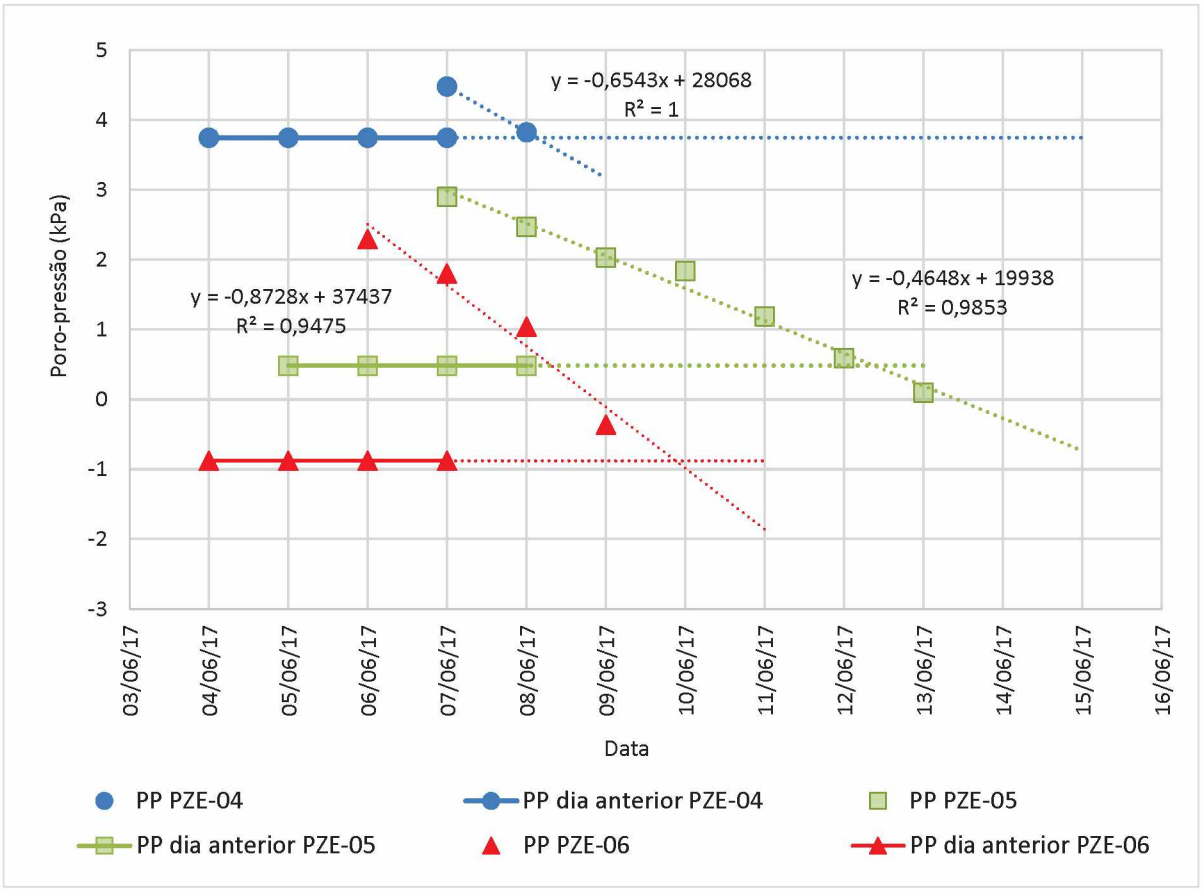
Eventos 7 e 7A – 18/05/2017 a 02/07/2017 – Ilha 1



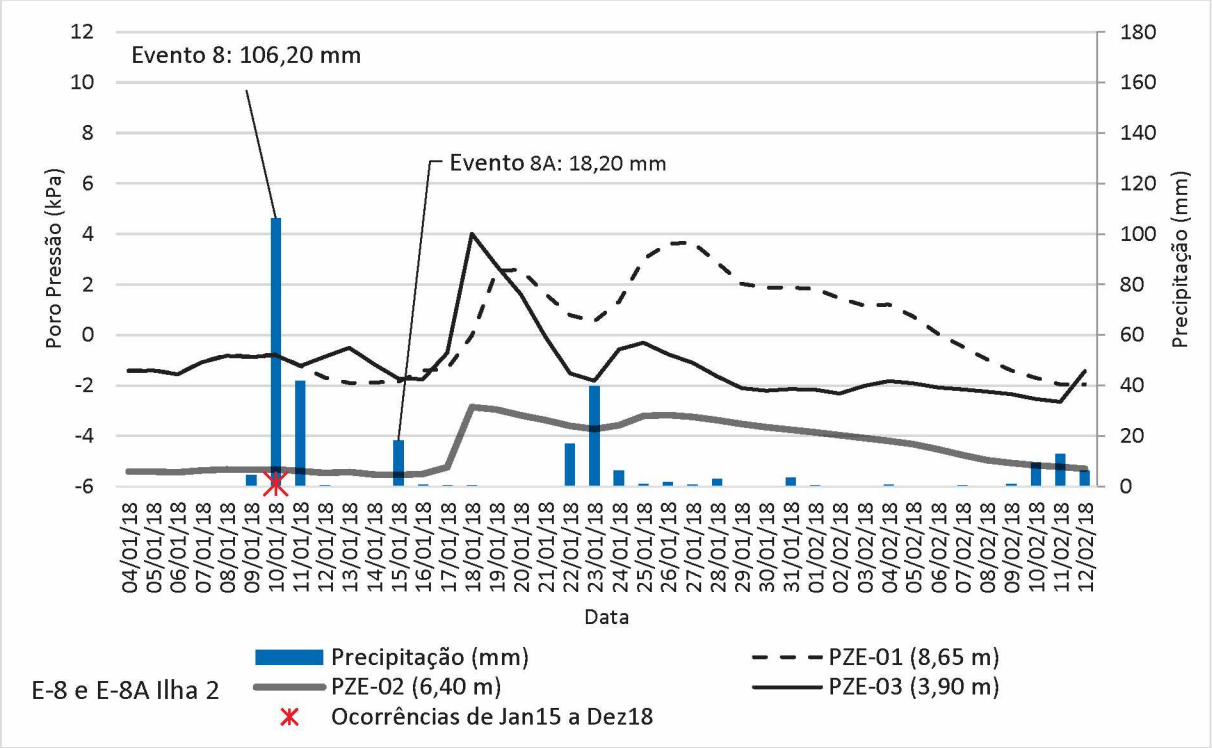
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 7 na Ilha 1



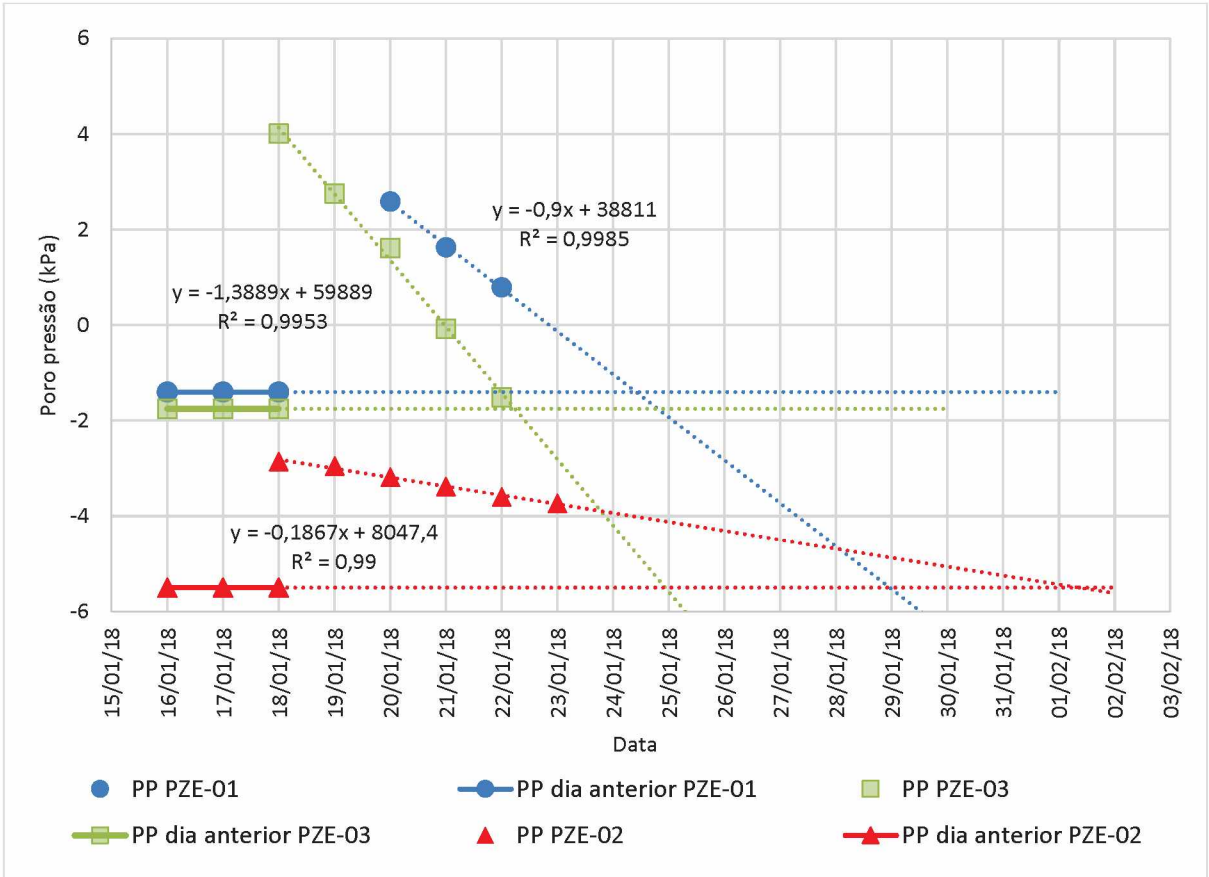
Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 7A na Ilha 1



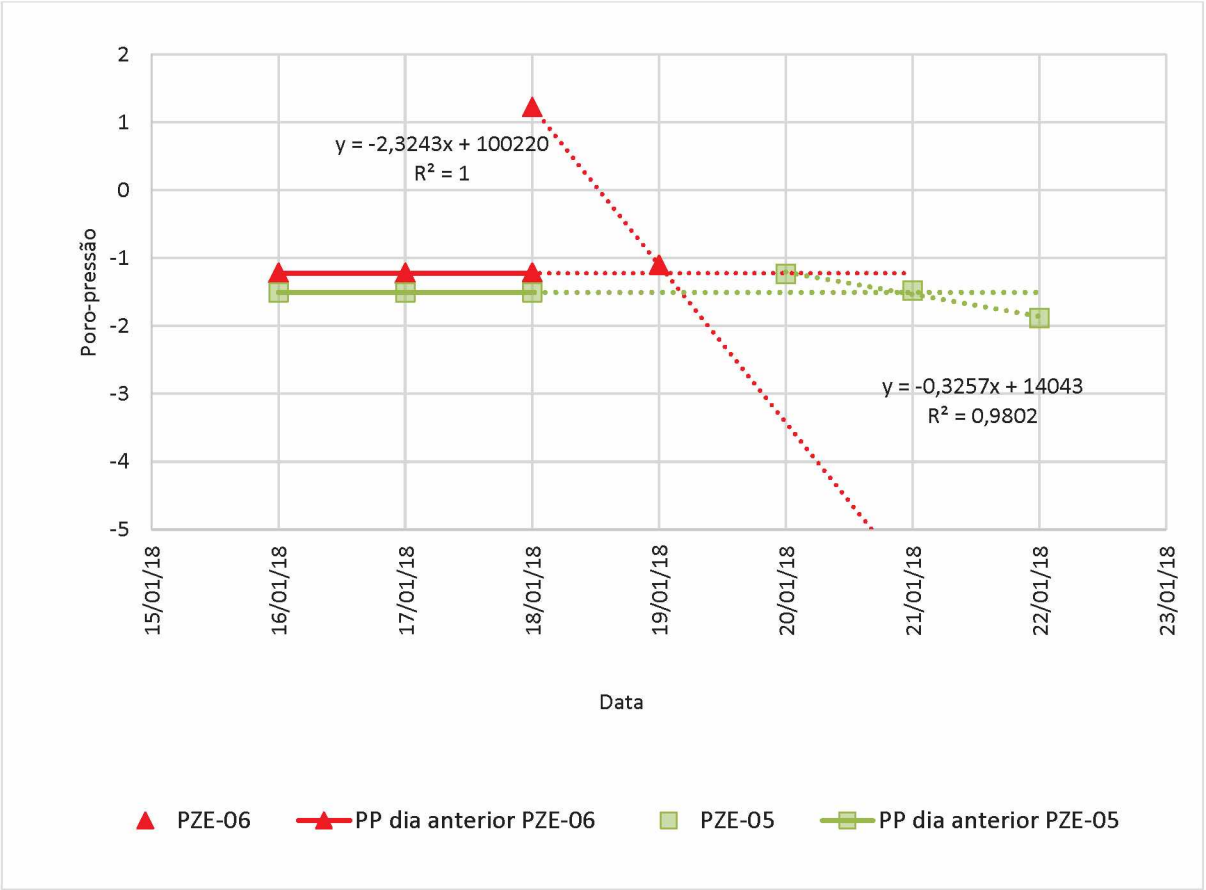
Eventos 8 e 8A – 04/01/2017 a 12/02/2018 – Ilha 2

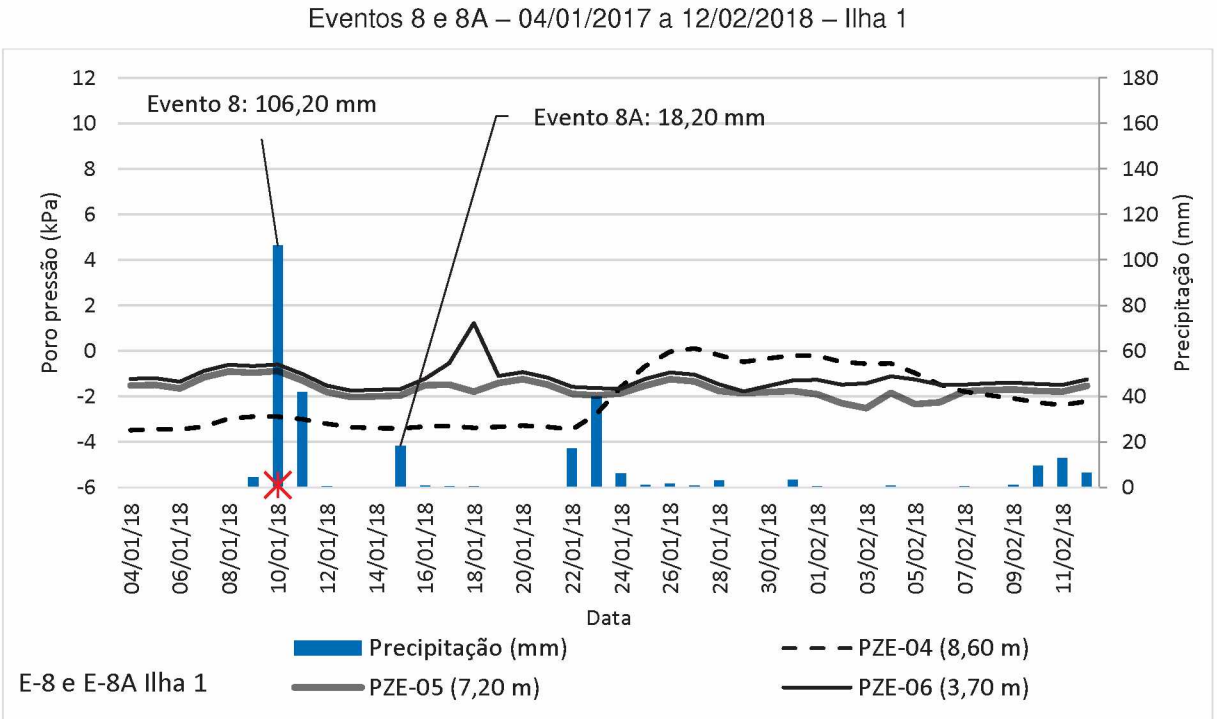


Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 8A na Ilha 2



Análise da dissipação do acréscimo de PP após evento 8A na Ilha 1




Eventos 8 e 8A – 04/01/2017 a 12/02/2018 – Ilha 1
Evento 8: 106,20 mm
Evento 8A: 18,20 mm
Poro pressão (kPa)
Precipitação (mm)
Data
Precipitação (mm)
PZE-04 (8,60 m)
PZE-05 (7,20 m)
PZE-06 (3,70 m)
E-8 e E-8A Ilha 1

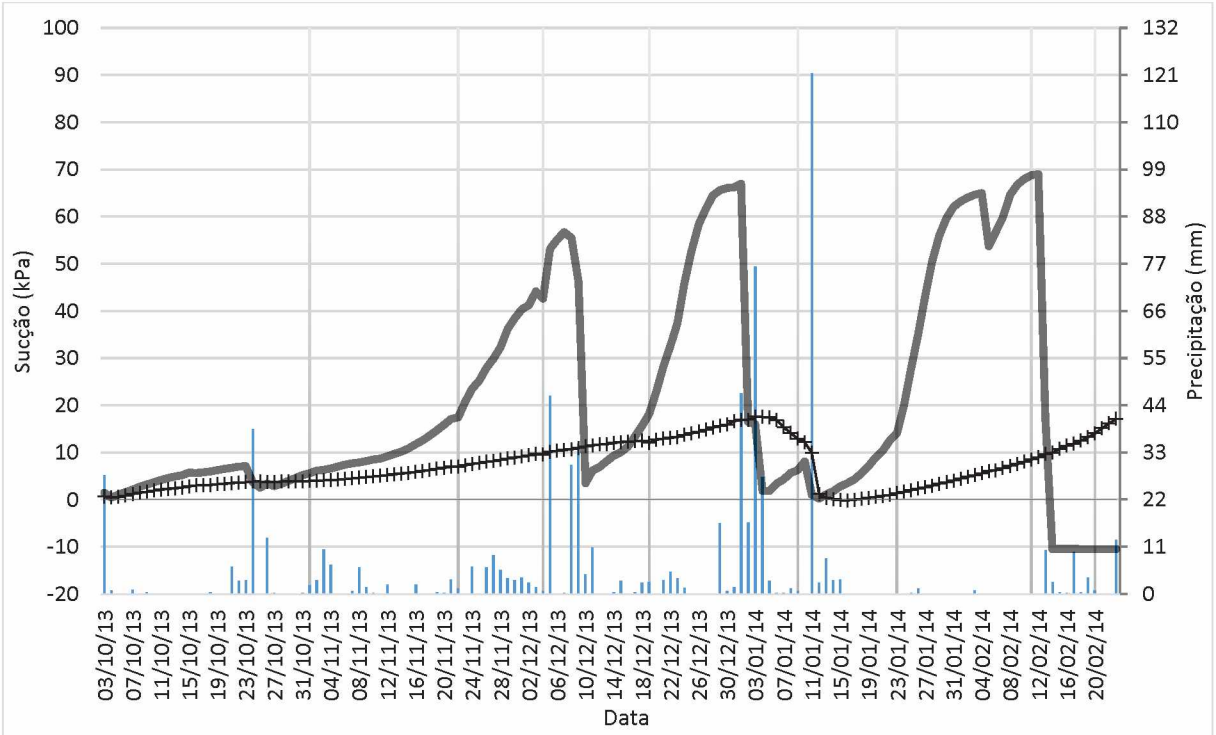
ANEXO 2

Gráficos das análises do desenvolvimento da sucção

I-1

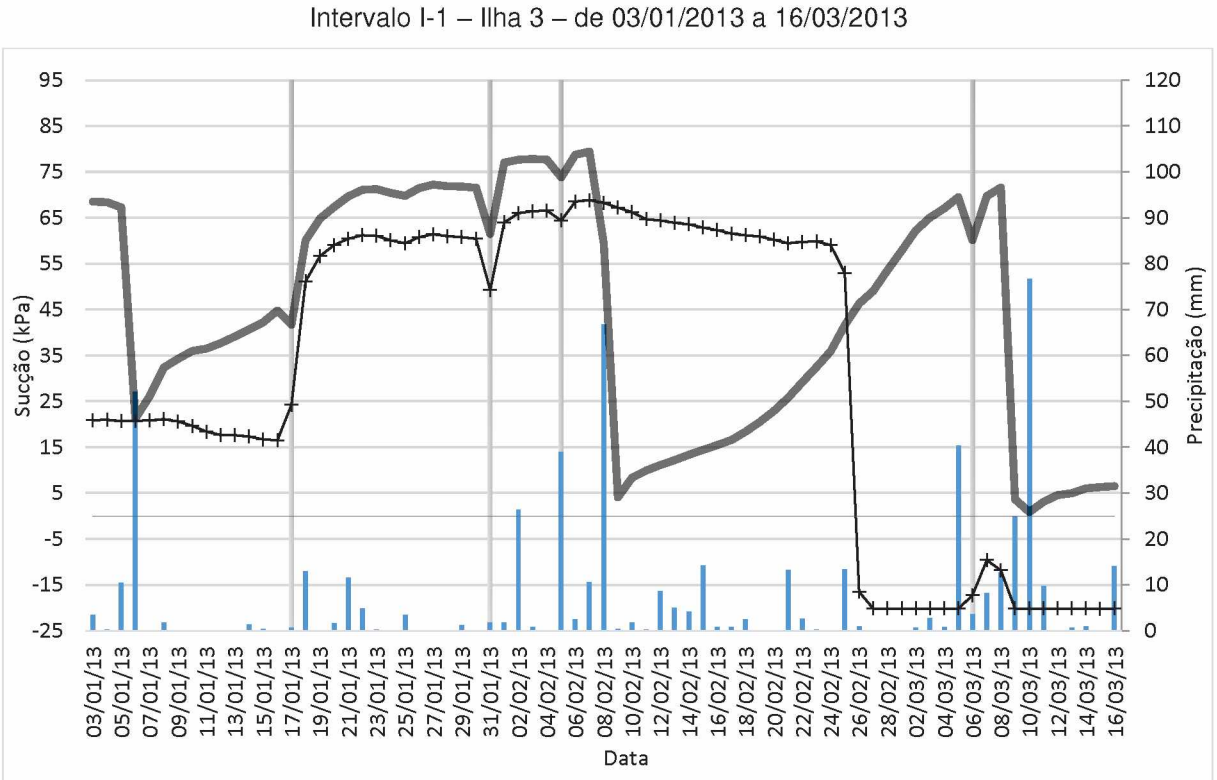
Descarga | Precipitação (mm) | TENS-01 1.00m | TENS-02 2.00m | 0 kPa

Intervalo I-2 – Ilha 3 – de 03/10/2013 a 23/02/2014

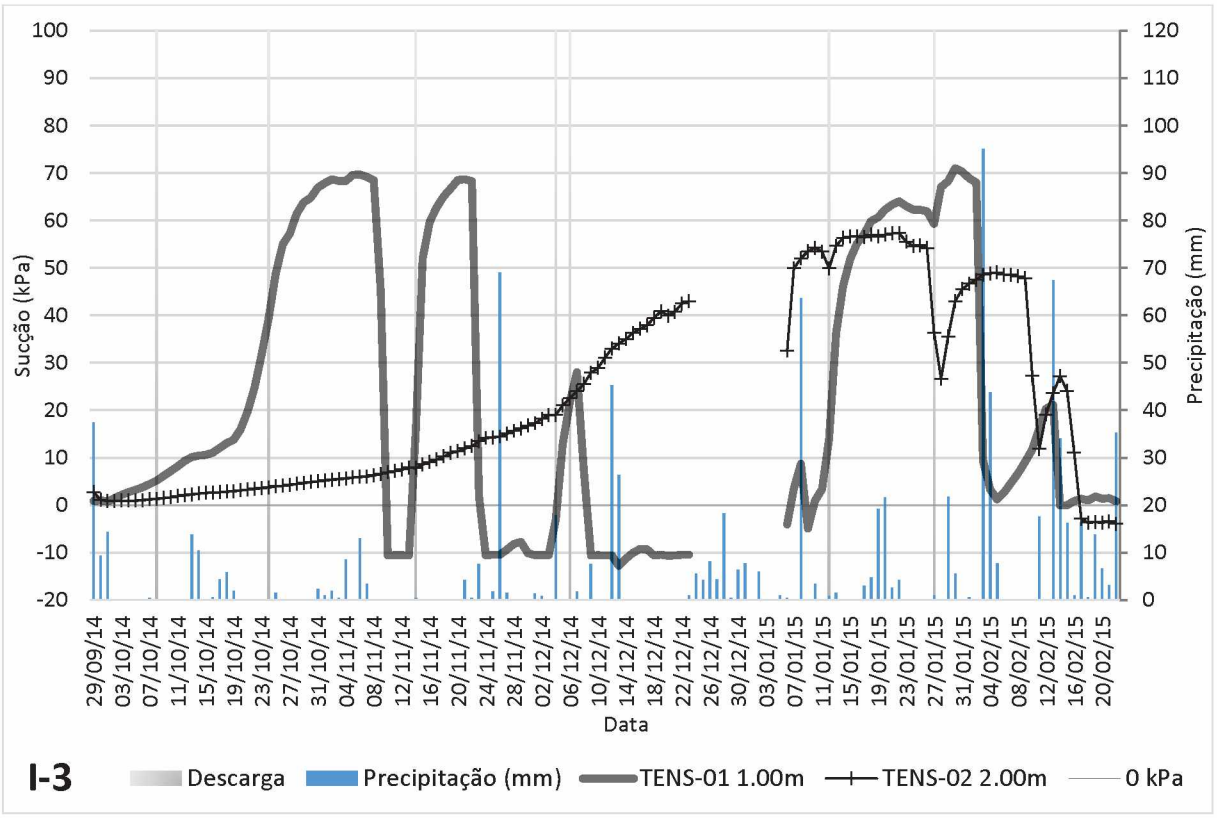


I-2

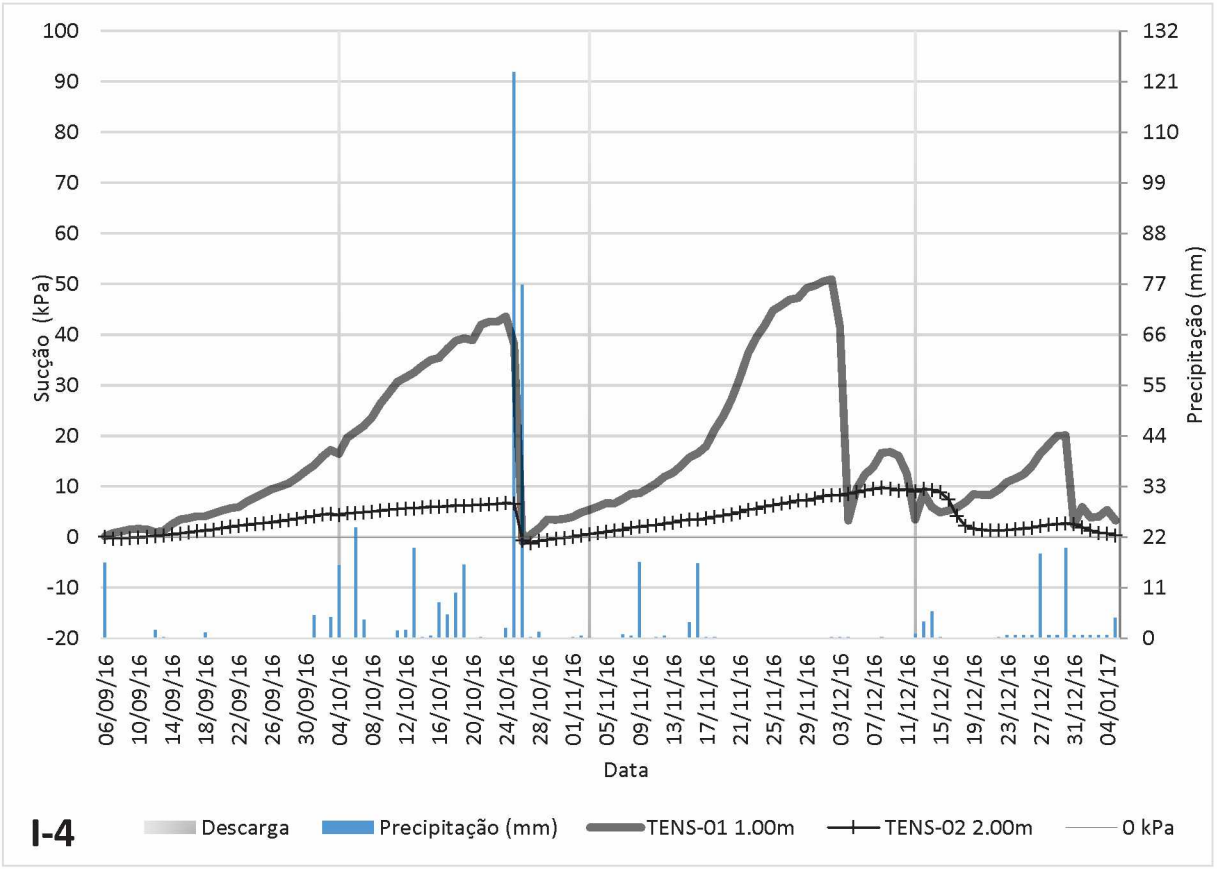
Descarga | Precipitação (mm) | TENS-01 1.00m | TENS-02 2.00m | 0 kPa


Intervalo I-1 – Ilha 3 – de 03/01/2013 a 16/03/2013
Sucção (kPa)
95
85
75
65
55
45
35
25
15
5
-5
-15
-25
Precipitação (mm)
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
03/01/13
05/01/13
07/01/13
09/01/13
11/01/13
13/01/13
15/01/13
17/01/13
19/01/13
21/01/13
23/01/13
25/01/13
27/01/13
29/01/13
31/01/13
02/02/13
04/02/13
06/02/13
08/02/13
10/02/13
12/02/13
14/02/13
16/02/13
18/02/13
20/02/13
22/02/13
24/02/13
26/02/13
28/02/13
02/03/13
04/03/13
06/03/13
08/03/13
10/03/13
12/03/13
14/03/13
16/03/13
Data

Intervalo I-3 – Ilha 3 – de 29/09/2014 a 22/02/2015

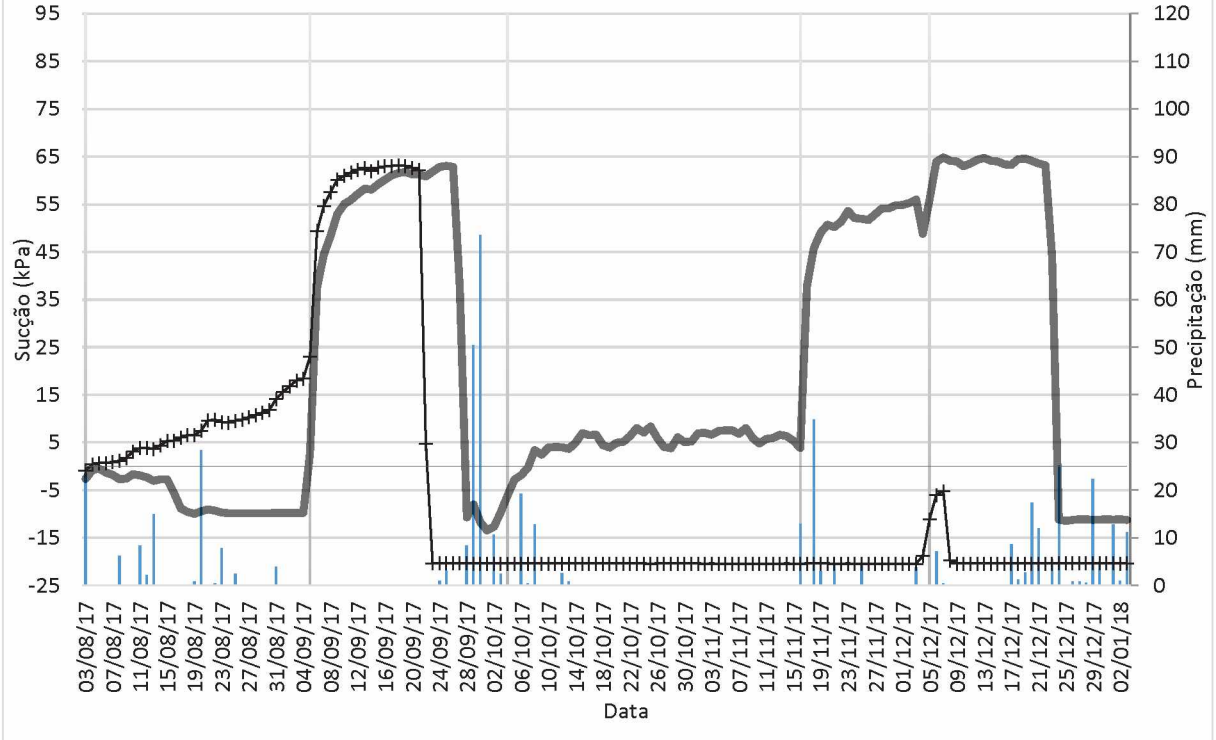


Intervalo I-4 – Ilha 3 – de 06/09/2016 a 05/01/2017



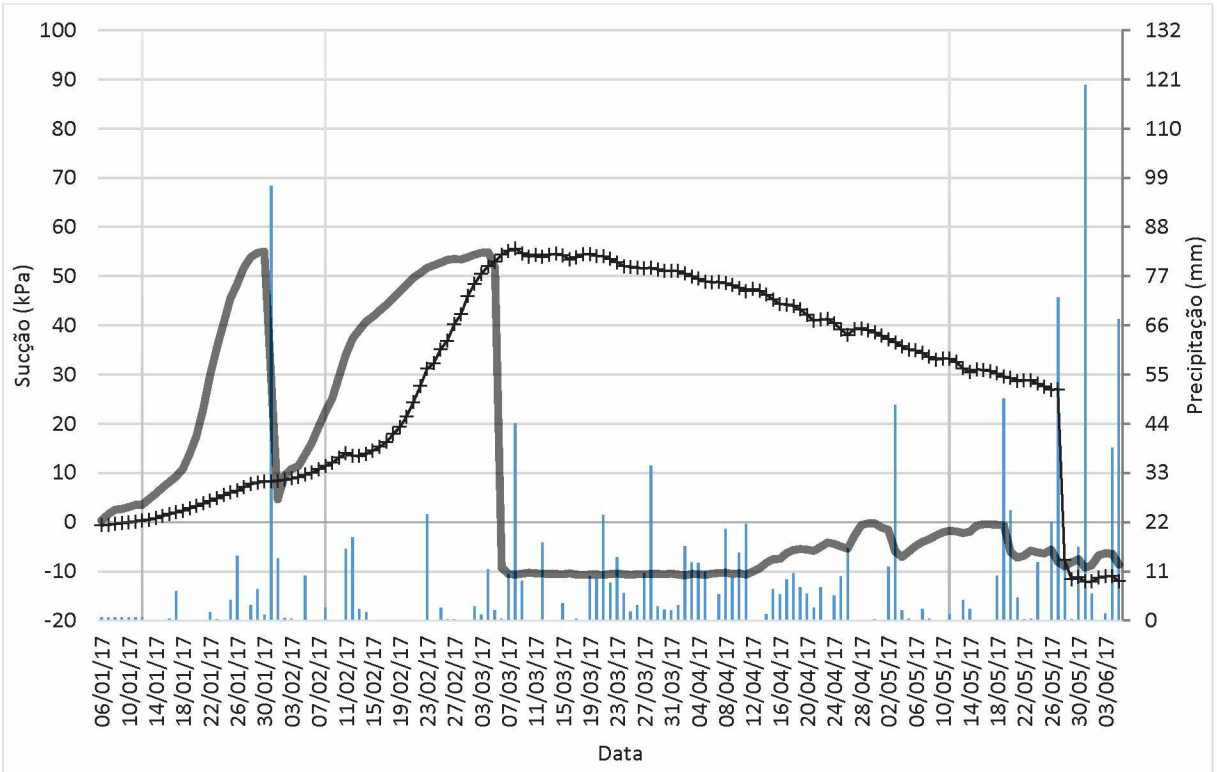
I-5 Descarga Precipitação (mm) TENS-01 1.00m TENS-02 2.00m 0 kPa

Intervalo I-6 – Ilha 3 – de 03/08/2017 a 03/01/2018



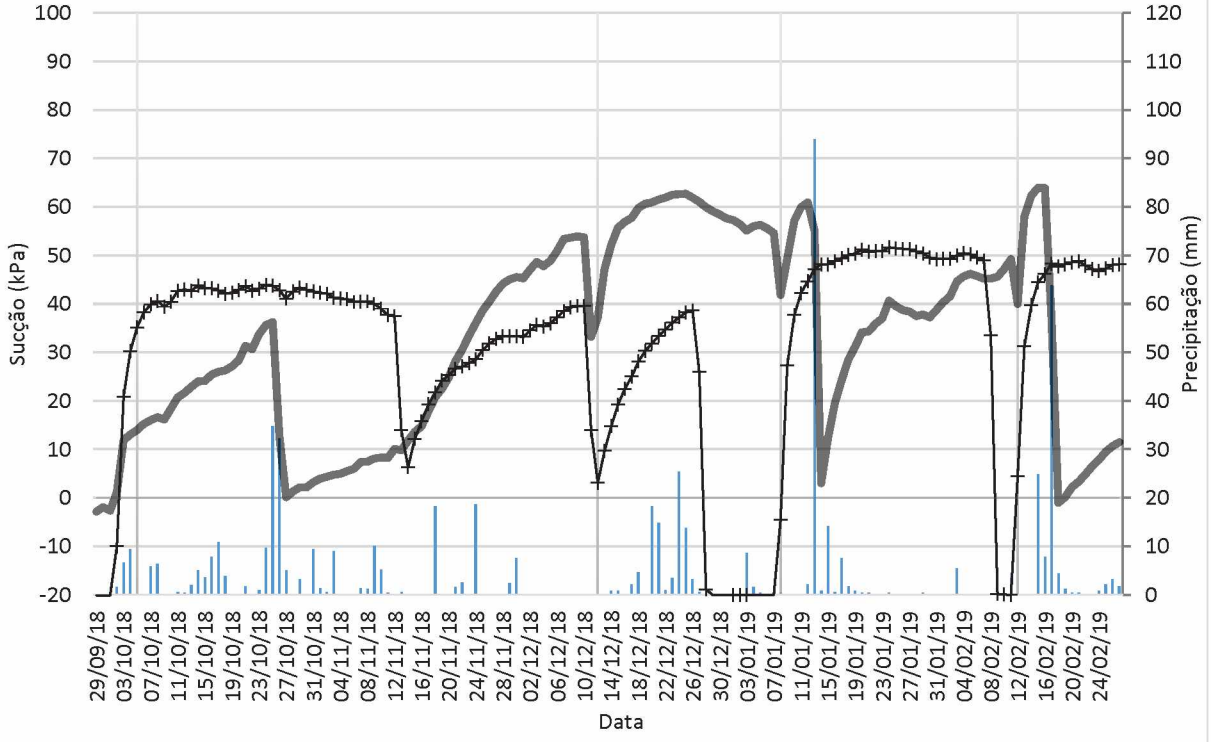
I-6 Descarga Precipitação (mm) TENS-01 1.00m TENS-02 2.00m 0 kPa

Intervalo I-5 – Ilha 3 – de 06/01/2017 a 05/06/2017

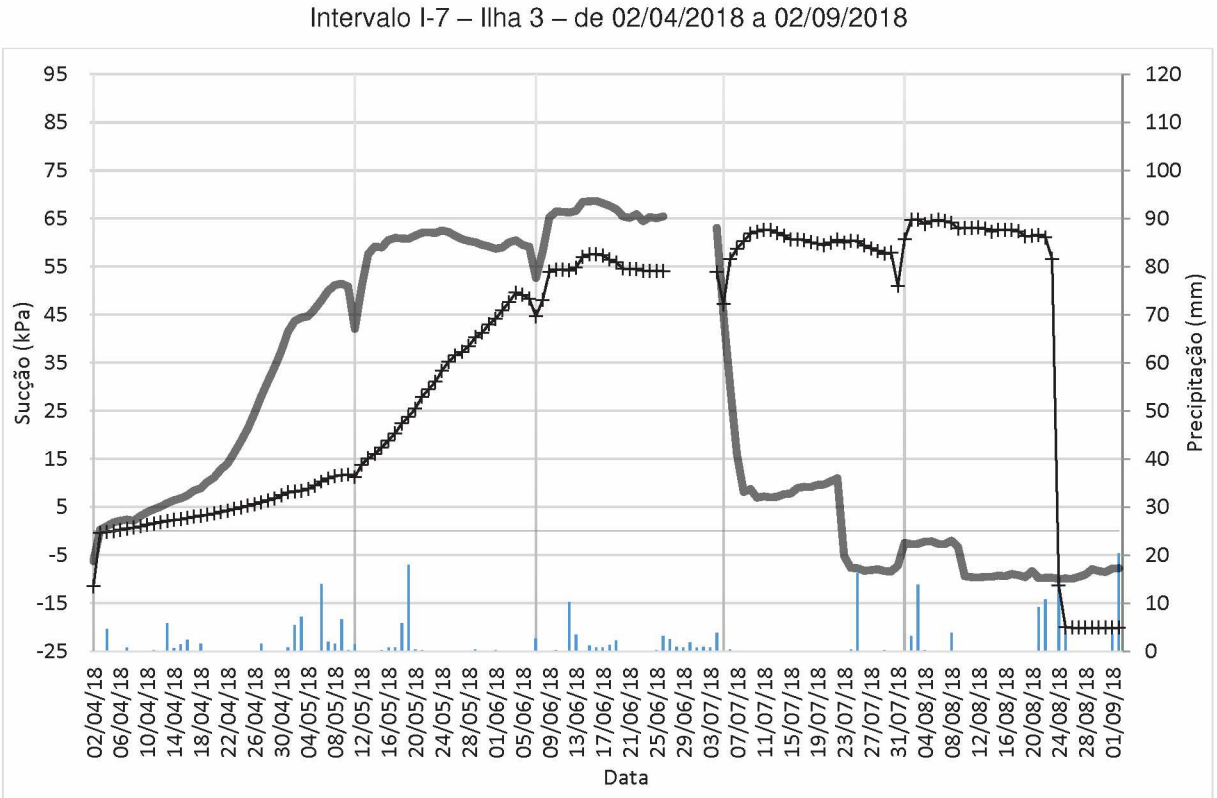


I-7 Descarga Precipitação (mm) TENS-01 1.00m TENS-02 2.00m 0 kPa

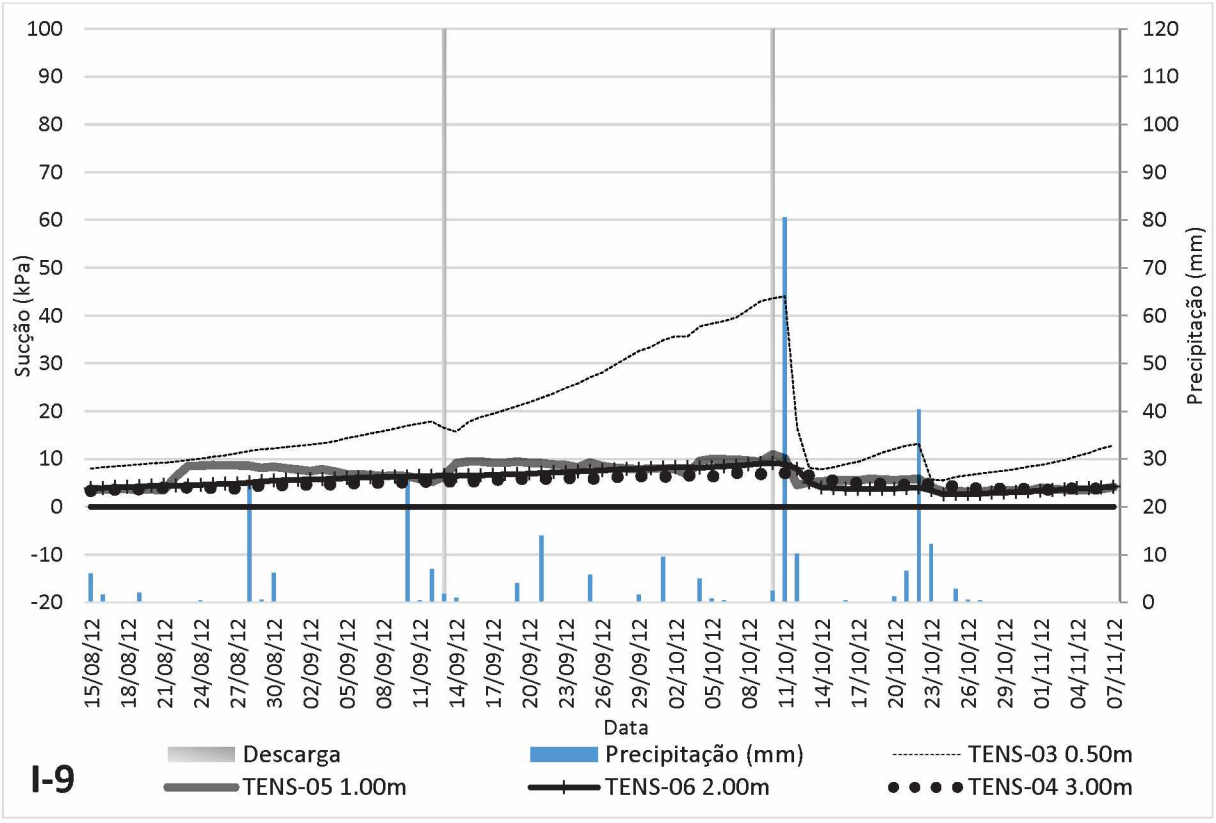
Intervalo I-8 – Ilha 3 – de 29/09/2018 a 27/02/2019



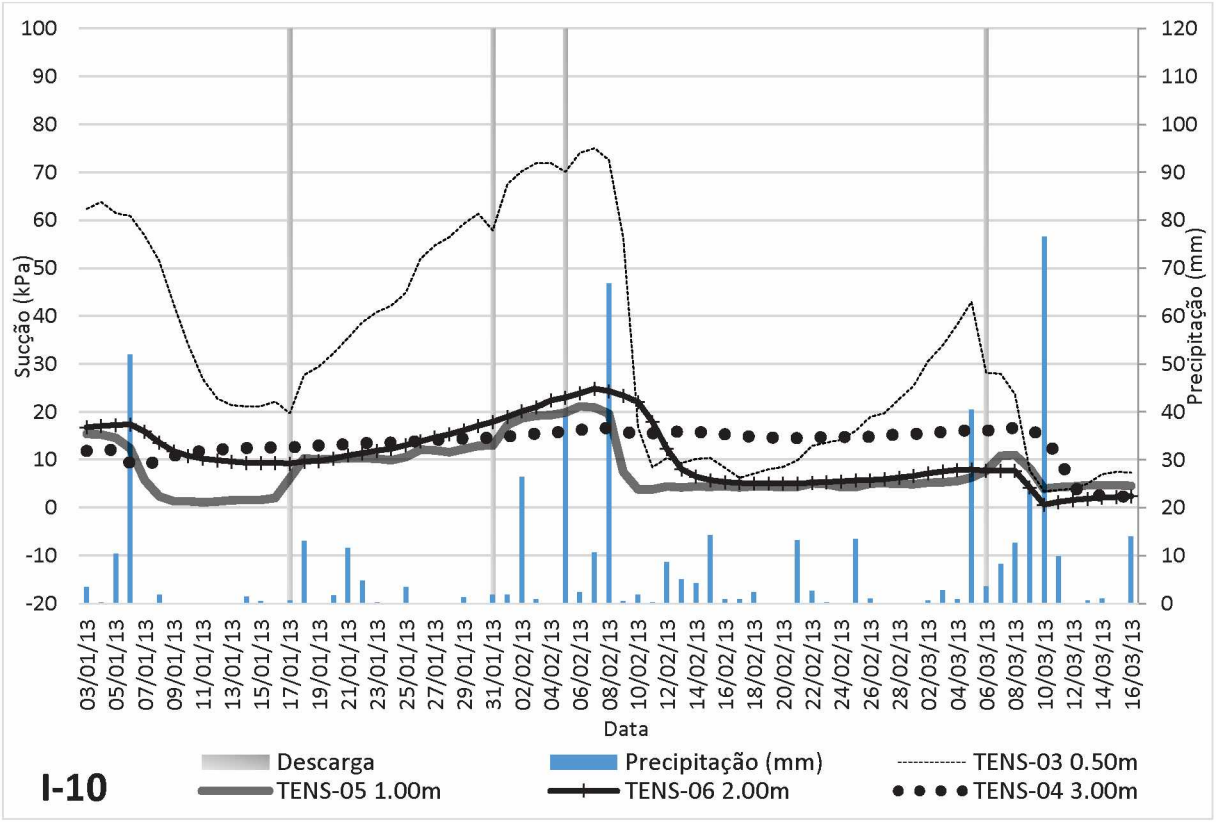
I-8 Descarga Precipitação (mm) TENS-01 1.00m TENS-02 2.00m 0 kPa


Intervalo I-7 – Ilha 3 – de 02/04/2018 a 02/09/2018
Sucção (kPa)
Precipitação (mm)
Data
95
85
75
65
55
45
35
25
15
5
-5
-15
-25
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
02/04/18
06/04/18
10/04/18
14/04/18
18/04/18
22/04/18
26/04/18
30/04/18
04/05/18
08/05/18
12/05/18
16/05/18
20/05/18
24/05/18
28/05/18
01/06/18
05/06/18
09/06/18
13/06/18
17/06/18
21/06/18
25/06/18
29/06/18
03/07/18
07/07/18
11/07/18
15/07/18
19/07/18
23/07/18
27/07/18
31/07/18
04/08/18
08/08/18
12/08/18
16/08/18
20/08/18
24/08/18
28/08/18
01/09/18

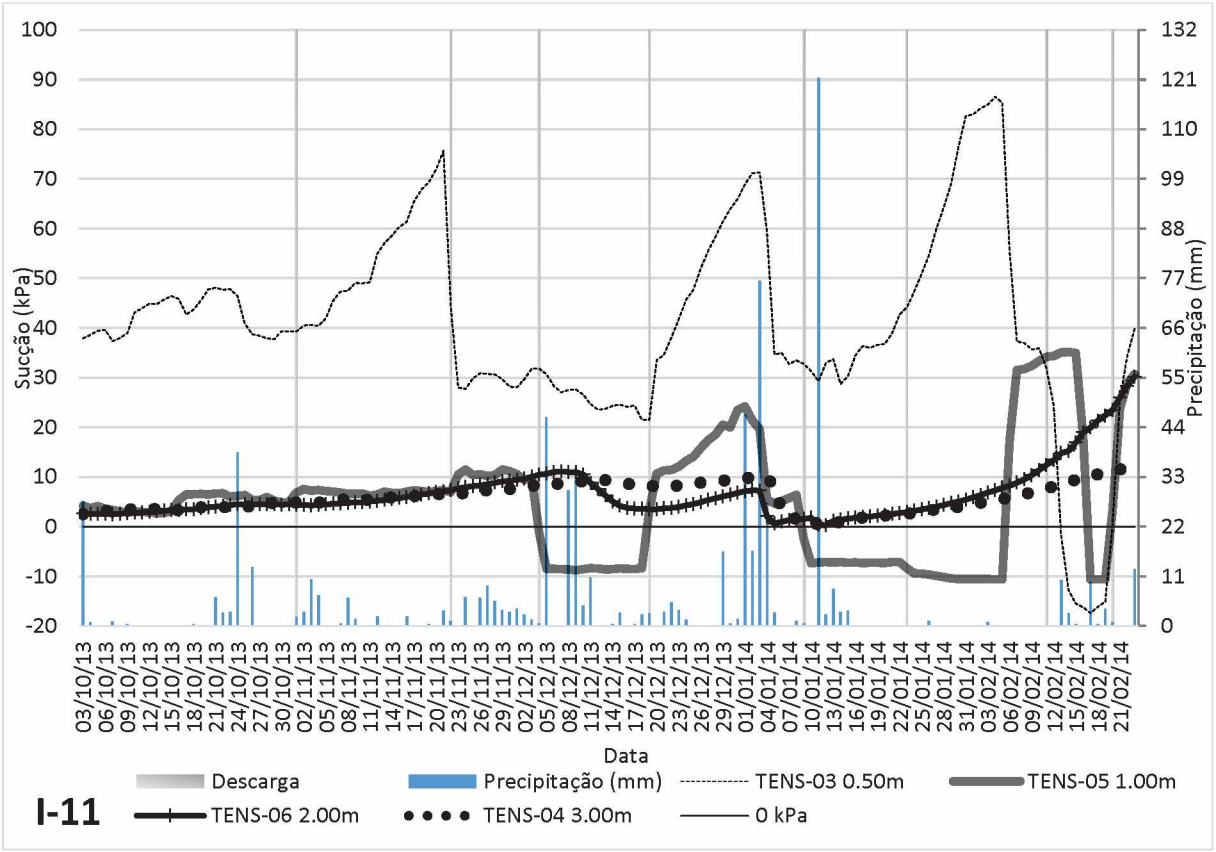
Intervalo I-9 – Ilha 2 – de 15/08/2012 a 07/11/2012



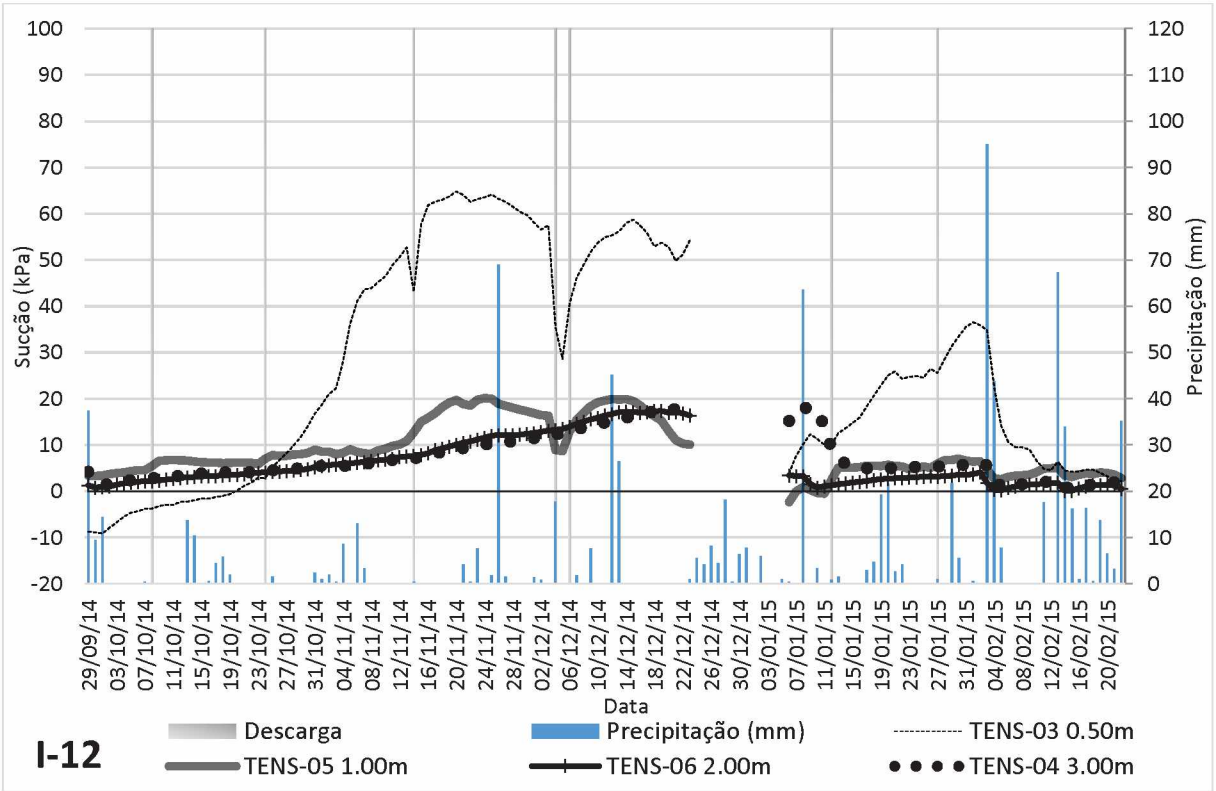
Intervalo I-10 – Ilha 2 – de 03/01/2013 a 16/03/2013



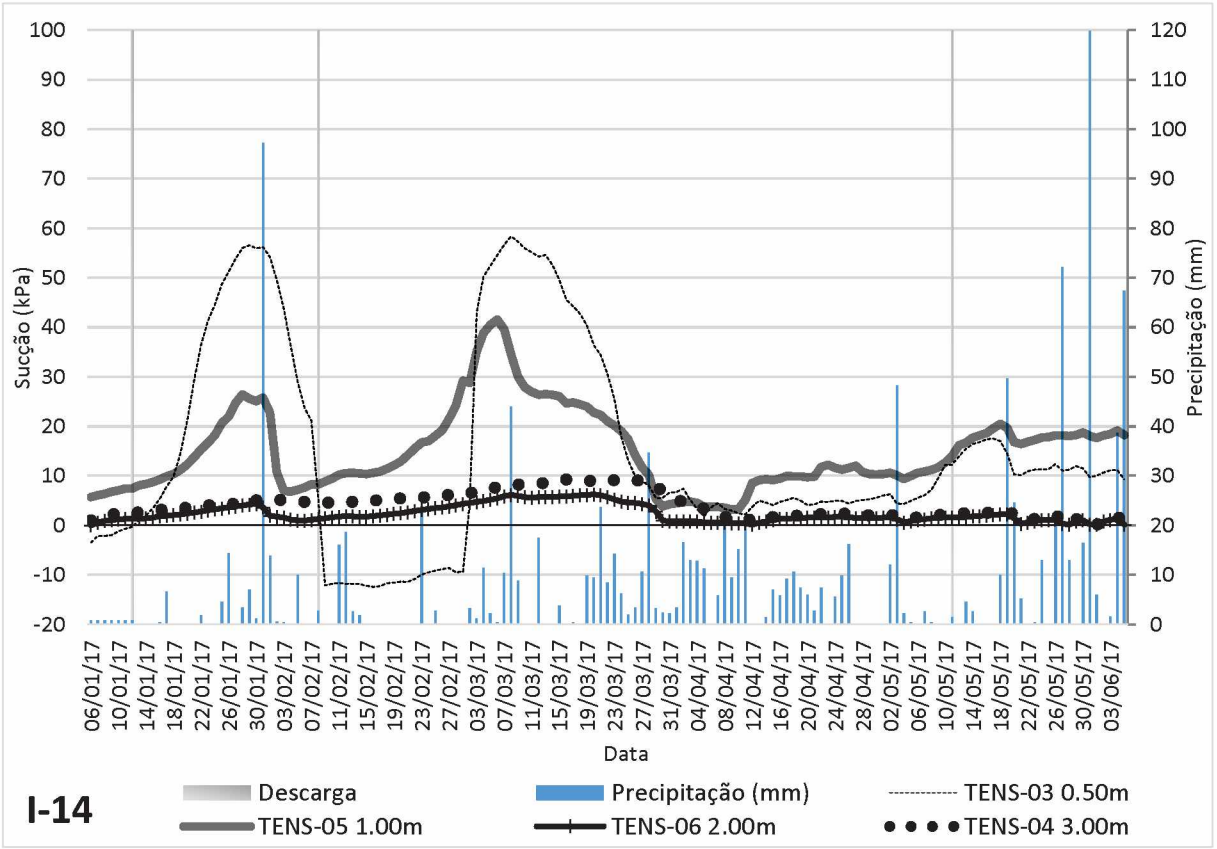
Intervalo I-11 – Ilha 2 – de 03/10/2013 a 23/02/2014



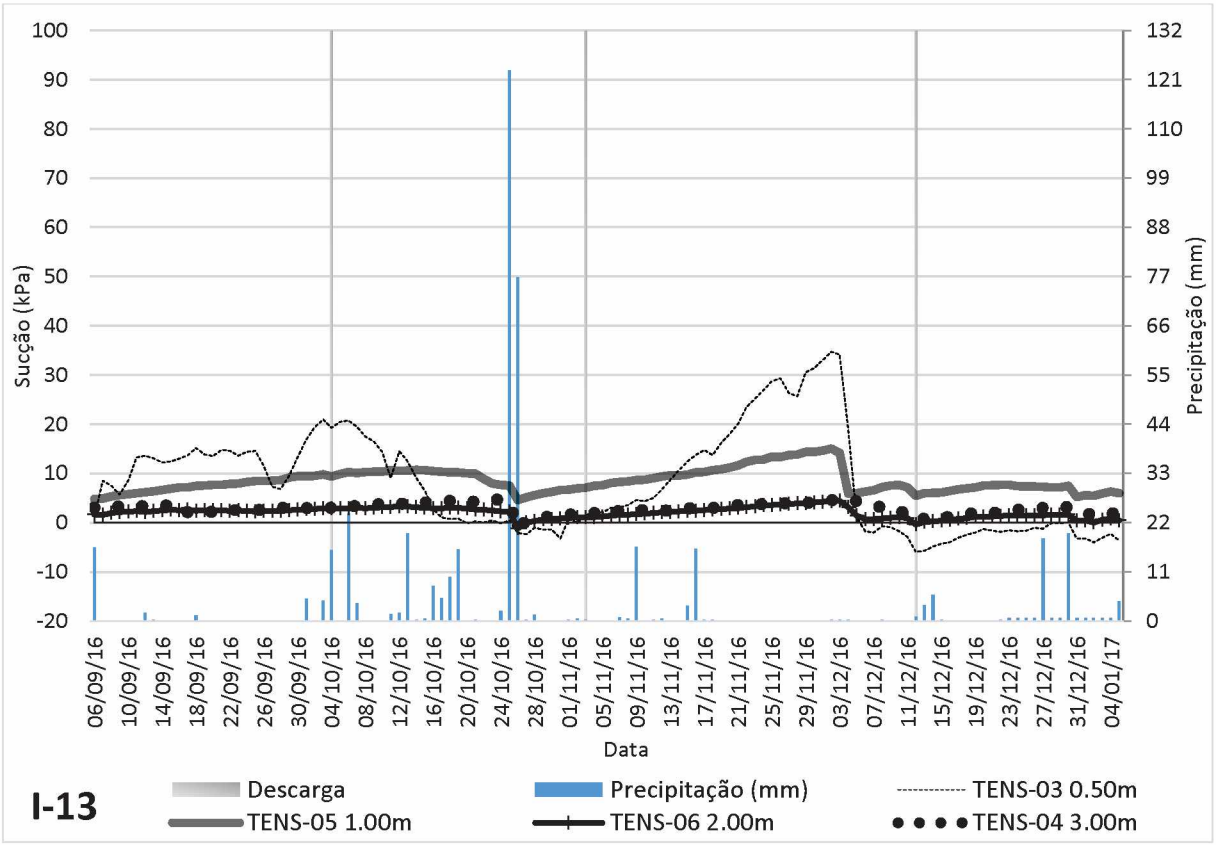
Intervalo I-12 – Ilha 2 – de 29/09/2014 a 22/02/2015



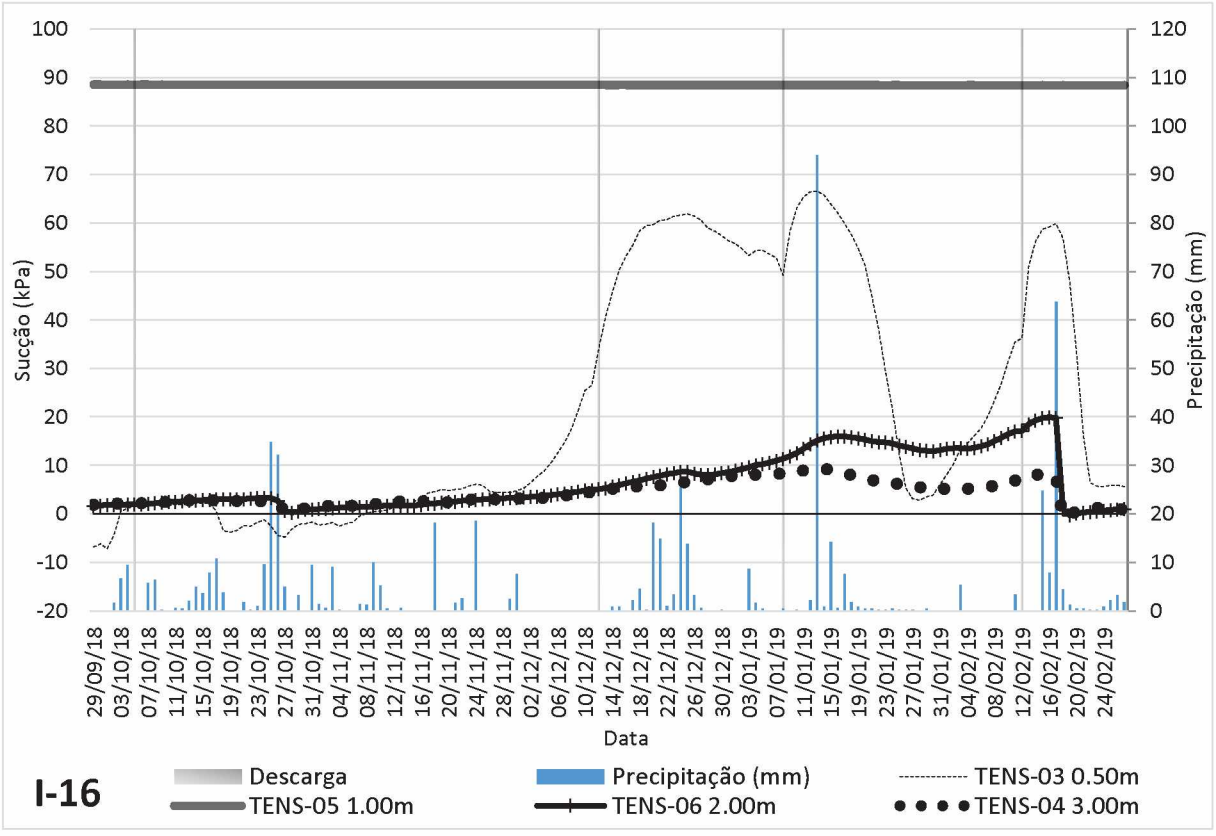
Intervalo I-14 – Ilha 2 – de 06/01/2017 a 05/06/2017



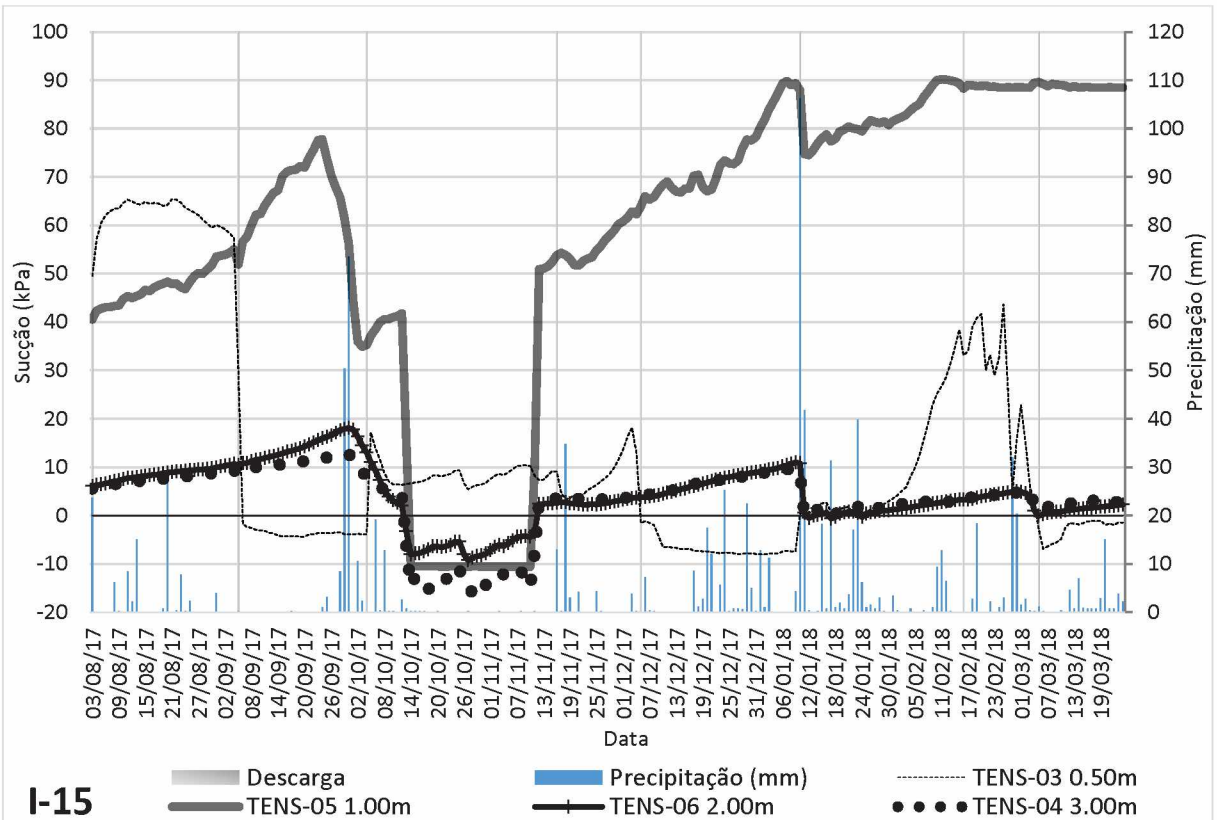
Intervalo I-13 – Ilha 2 – de 06/09/2016 a 05/01/2017



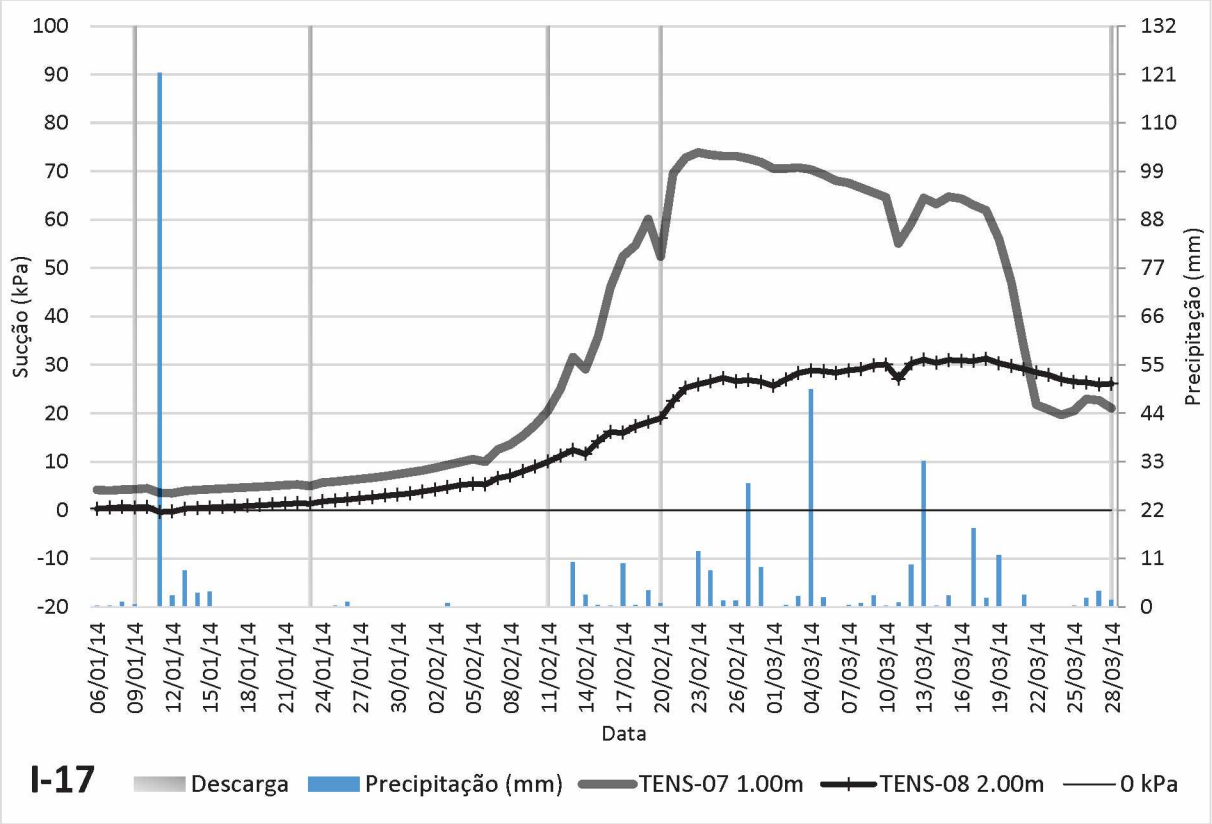
Intervalo I-16 – Ilha 2 – de 29/09/2018 a 27/02/2019



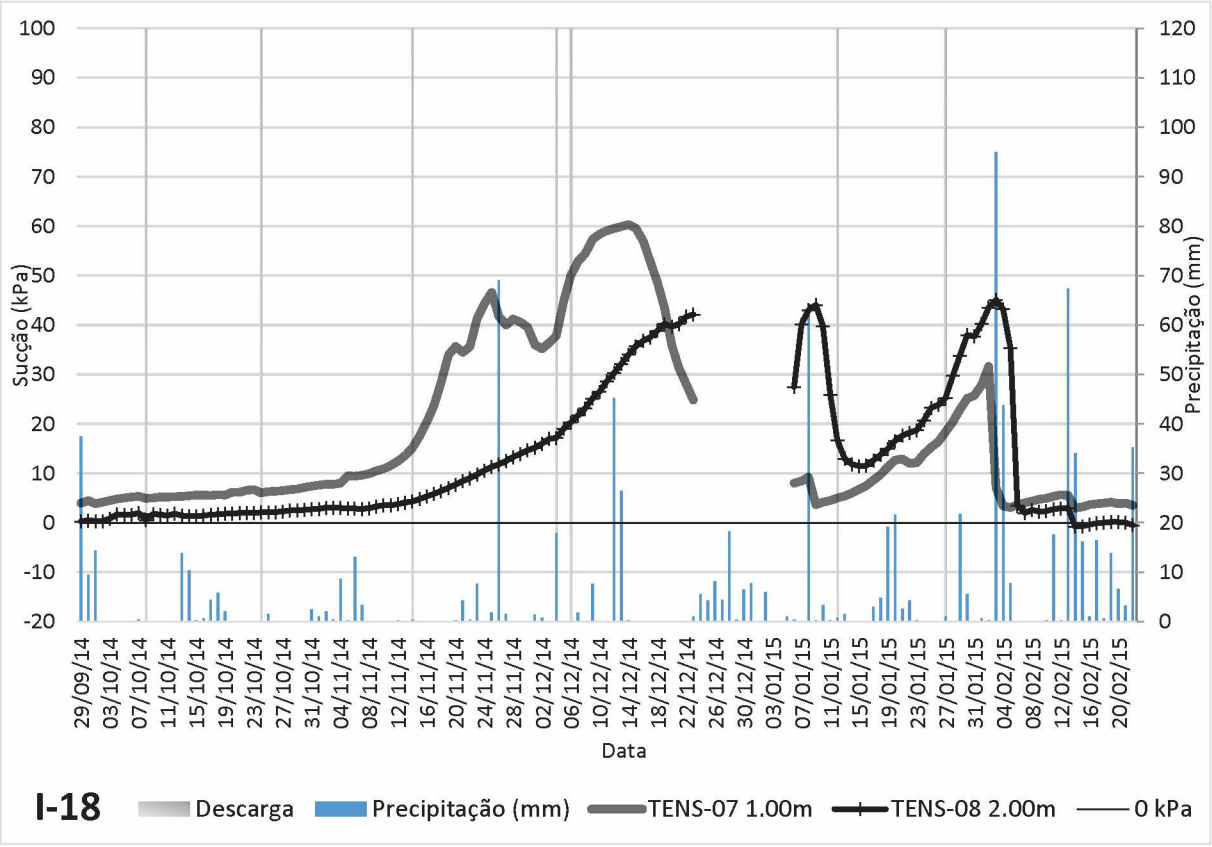
Intervalo I-15 – Ilha 2 – de 03/08/2017 a 24/03/2018



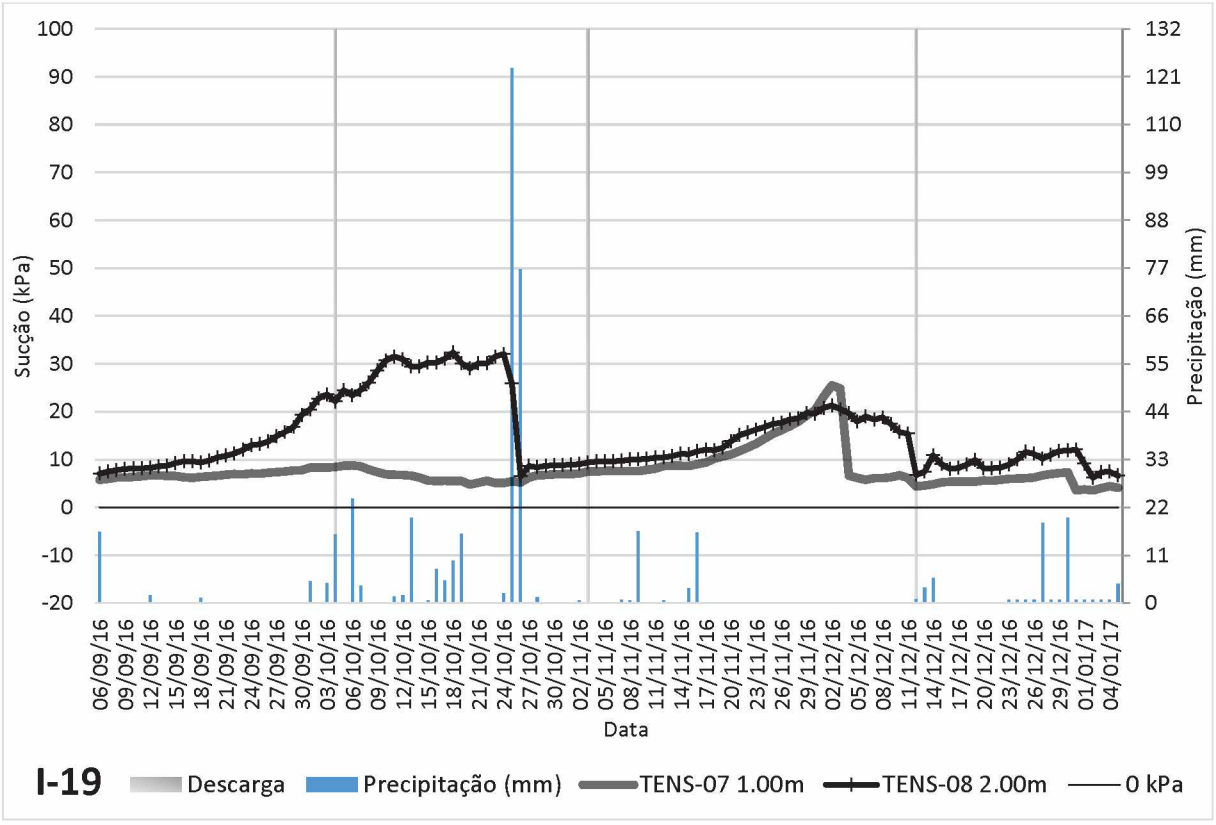
Intervalo I-17 – Ilha 1 – de 06/01/2014 a 28/03/2014



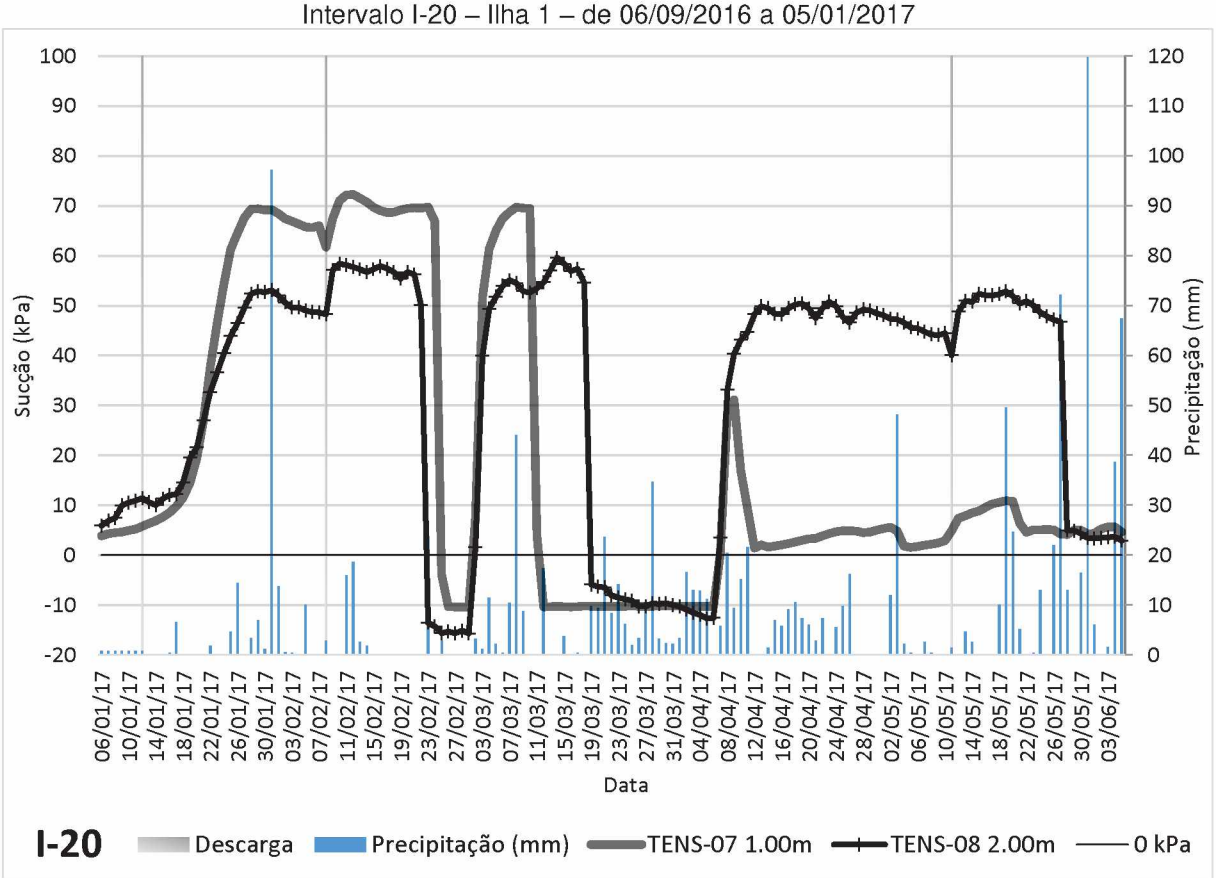
Intervalo I-18 – Ilha 1 – de 29/09/2014 a 22/02/2015



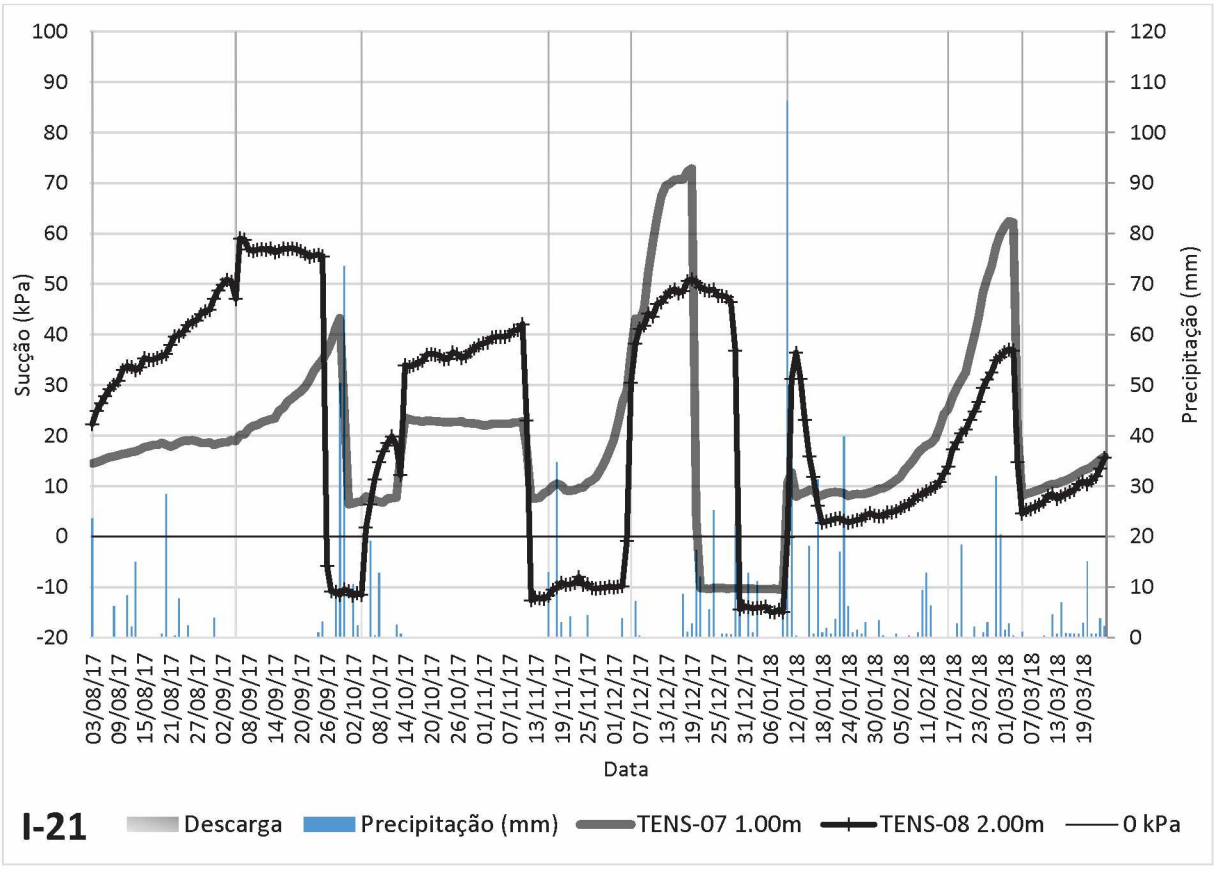
Intervalo I-19 – Ilha 1 – de 06/09/2016 a 05/01/2017



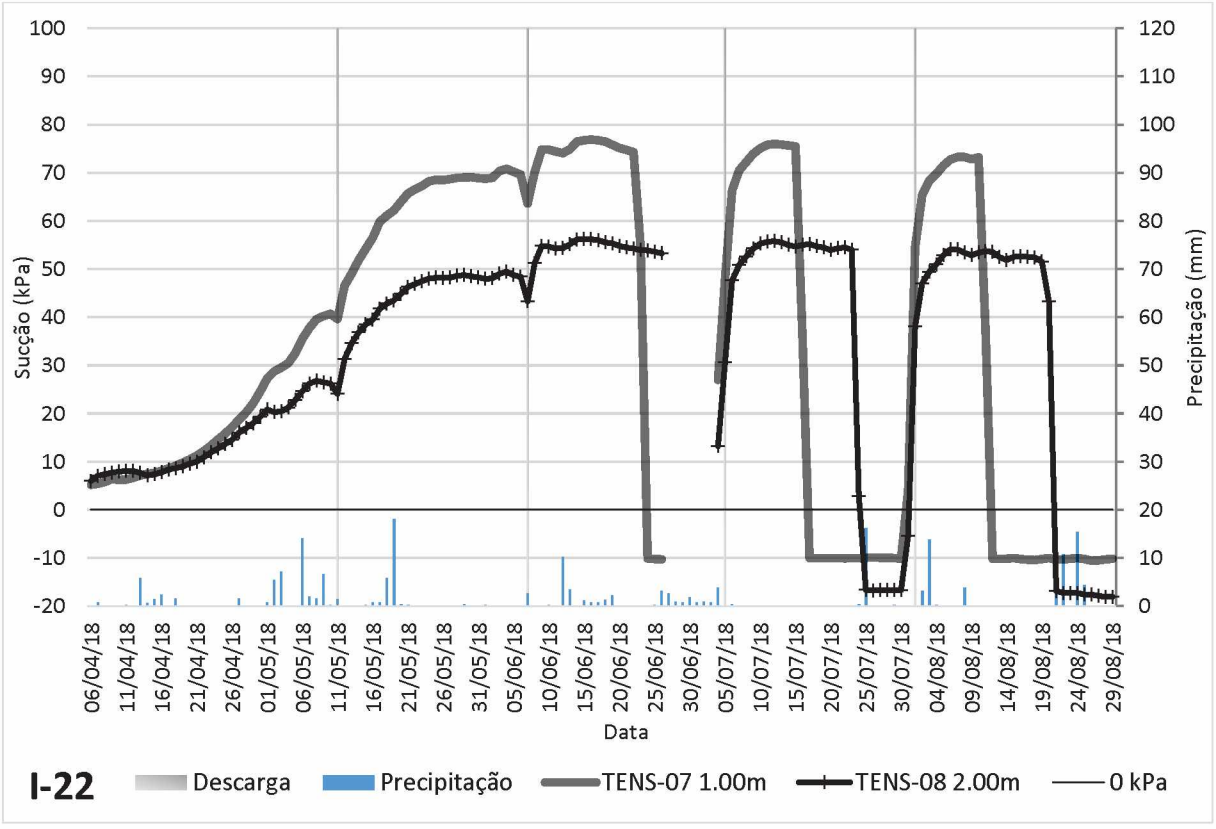
Intervalo I-20 – Ilha 1 – de 06/09/2016 a 05/01/2017

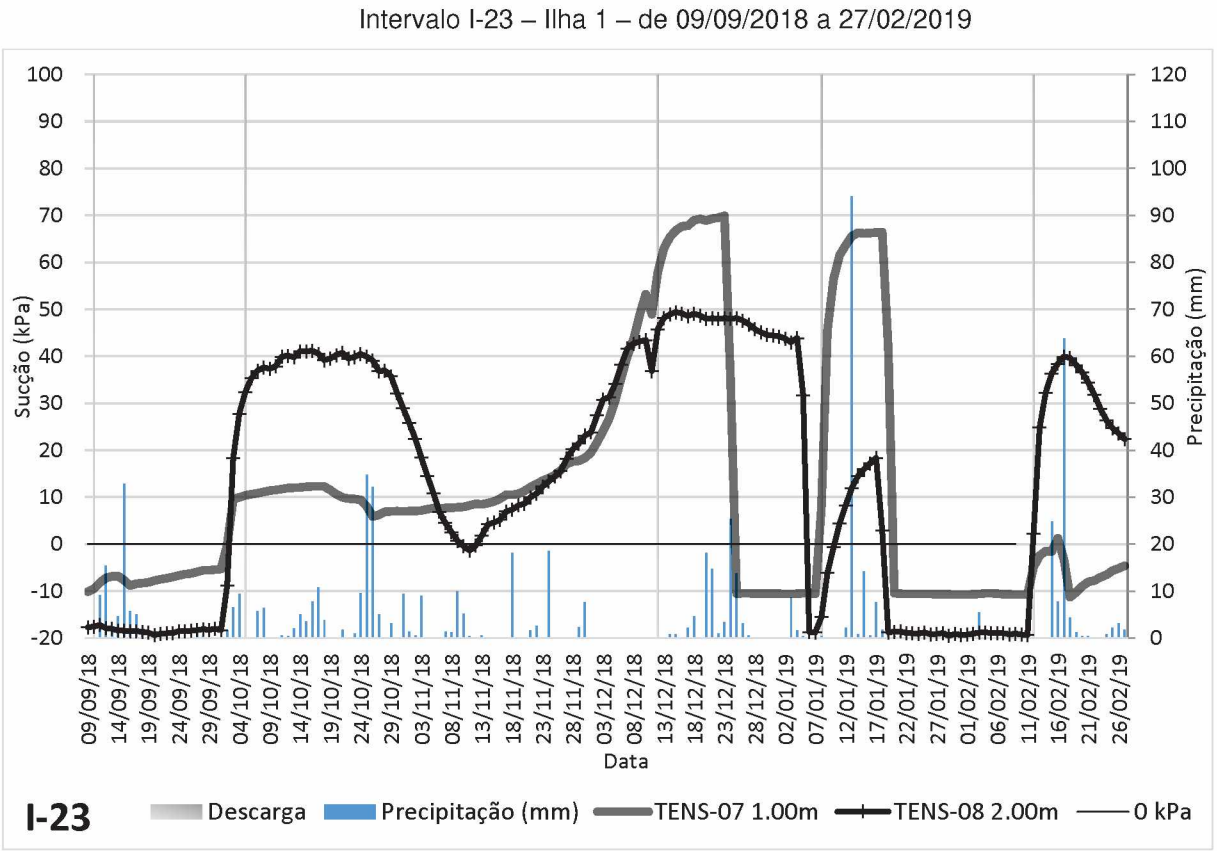


Intervalo I-21 – Ilha 1 – de 04/08/2017 a 24/03/2018



Intervalo I-22 – Ilha 1 – de 06/04/2018 a 29/08/2018




Intervalo I-23 – Ilha 1 – de 09/09/2018 a 27/02/2019
Sucção (kPa)
Precipitação (mm)
Data
I-23
Descarga
Precipitação (mm)
TENS-07 1.00m
TENS-08 2.00m
0 kPa