PLANO DE TRABALHO

Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT,
Capítulo XX do Edital 03, Lote 07, item 10 do PER
Rodovias BR-116/376 PR e BR-101 SC
Trecho Curitiba – Florianópolis

PROJETO 04
SGP/ALS_05 REV.00

RISCOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS EM TALUDES RODOVIÁRIOS: DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE MAPEAMENTO E GERENCIAMENTO DIGITAL DE INFORMAÇÕES PARA A BR-376, TRECHO DA SERRA DO MAR (PR-SC) – FASE 3

RELATÓRIO FINAL

MARÇO/2019

SUMÁRIO

1 CONCESSIONÁRIA 3

2 DESCRIÇÃO DO PROJETO 3

2.1 TÍTULO DO PROJETO 3

2.2 OBJETIVO 3

2.2.1 Objetivo Geral 3

3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

4 JUSTIFICATIVA 4

5 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO 6

5.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS 6

5.2 ETAPAS 7

6 RELATÓRIO FINAL 11

6.1 VISITAS AO SÍTIO DE ESTUDO 11

6.1.1 Visitas BR-376/PR 11

6.1.1 Visitas BR-101/SC 14

6.2 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS 16

6.2.1 Monitoramento BR-376/PR 16

6.2.2 Monitoramento BR-101/SC 62

6.3 IMPLANTAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DE GERENCIAMENTO DE DADOS 94

6.3.1 Modificações em campo 94

6.3.2 Visualização dos dados 98

6.4 REAVALIAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO 102

6.4.1 Definição da área de estudo 102

6.4.2 Plano de investigação geológico-geotécnica 107

6.4.3 Interpretação dos resultados do plano de investigação geotécnica 120

6.4.4 Análises de estabilidade 138

6.5 ANÁLISE CRÍTICA INTEGRADA 150

6.5.1 Limiares pluviométricos 150

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 168

7.1 MONITORAMENTO GEOTÉCNICO 168

7.1.1 BR-376/PR 168

7.1.2 BR-101/SC 169

7.2 IMPLANTAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DE GERENCIAMENTO DOS DADOS 170

7.3 REAVALIAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO 171

7.4 LIMIARES PLUVIOMÉTRICOS 173

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 174

1 CONCESSIONÁRIA

Autopista Litoral Sul

2 DESCRIÇÃO DO PROJETO

2.1 TÍTULO DO PROJETO

Riscos geológico-geotécnicos em taludes rodoviários: desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento digital de informações para a BR-376/PR, trecho da Serra do Mar (PR-SC) – FASE 3.

2.2 OBJETIVO

2.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da presente pesquisa consistiu em aperfeiçoar técnicas de mapeamento de riscos a partir de resultados de investigação geotécnica e do aprimoramento de limiares pluviométricos e de técnicas de aquisição de dados do monitoramento implantado nas etapas iniciais das pesquisas desenvolvidas no trecho da Serra do Mar da BR-376/PR e no Morro do Boi (BR-101/SC).

3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram objetivos específicos desta pesquisa:

- Ampliar a série histórica de leituras dos sensores instalados no Morro do Boi (km 140+700 m da BR-101/SC) e no trecho da Serra do Mar da BR-376/PR para reavaliar os critérios de segurança consolidados nas etapas iniciais da pesquisa;

- Automatizar a coleta de dados do sistema de monitoramento instalado no Morro do Boi, permitindo o acesso aos dados remotamente de toda a instrumentação;

- Implementar uma plataforma de gerenciamento de dados de todo o monitoramento implantado ao longo do trecho de concessão da Autopista Litoral Sul nas etapas iniciais de pesquisa, permitindo o acesso às informações de forma simplificada para fins operacionais;

- Aprofundar o entendimento da estratigrafia presente em áreas definidas como de maior risco nas fases iniciais da pesquisa ao longo do trecho compreendido entre os km 667 e 669 da BR-376/PR através de campanhas de investigação geotécnica de campo;

- Reavaliar as condicionantes geotécnicas e o índice de suscetibilidade em áreas de maior risco da BR-376/PR com base nos resultados de investigação geotécnica;

- Analisar criticamente toda a série histórica do monitoramento, buscando o aperfeiçoamento dos parâmetros de alerta definidos nas fases iniciais da pesquisa;

4 JUSTIFICATIVA

Desastres naturais recentes envolvendo movimentos de massa como os que afetaram o Vale do Itajaí (Santa Catarina) em 2008 ou a região da Serra do Mar Paranaense ao longo na BR-376/PR (entre os kms 661 e 671, aproximadamente) em 2011 ilustram a importância de se ampliar o entendimento sob os aspectos que influenciam o comportamento das encostas situadas nesses locais.

Como consequência desses e de outros eventos, investimentos a partir de iniciativas públicas e privadas vêm sendo realizados. No âmbito científico, destaca-se uma pesquisa iniciada em março de 2011 sob responsabilidade da Autopista Litoral Sul, cujo objetivo principal consistiu em aumentar o nível de segurança na operação de rodovias situadas em áreas da Serra do Mar sujeitas a escorregamentos. O estudo contemplou, dentre outras etapas, o planejamento e implantação de um conjunto de instrumentos de monitoramento no Morro do Boi (km 140+700 m da BR-101/SC). Diversos sensores foram instalados, envolvendo o monitoramento tanto de parâmetros

geotécnicos e ambientais (poropressões positivas e negativas, deslocamentos horizontais e precipitações), como variações no carregamento dos grampos e deslocamentos na tela metálica da estrutura de contenção existente. O monitoramento, que teve início em 2012, tem permitido o desenvolvimento de diversos trabalhos técnico-científicos (e.g. Sestrem, 2012; Sestrem e Kormann, 2013; González, 2013; Kormann *et al.,* 2013, 2014 e 2016; Pretto *et al.,* 2013; Pretto, 2014; Sestrem *et al.,* 2015 e 2016).

Em uma nova pesquisa, intitulada “Riscos geológico-geotécnicos em taludes rodoviários: desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento digital de informações para a BR-376/PR, trecho da Serra do Mar (PR-SC)” e iniciada em 2013, o trabalho de monitoramento foi intensificado com a instalação de estações pluviométricas em seis pontos da região em estudo. Como parte dos resultados obtidos, novos trabalhos foram publicados (Kormann *et al.,* 2013; Millan, 2015; Vaz, 2014; Victorino, 2015; Victorino *et al.,* 2015; González, 2017).

O conhecimento adquirido ao longo do desenvolvimento dessas pesquisas permitiu correlacionar a influência de agentes ambientais, tais como as precipitações pluviométricas, com mudanças no comportamento do terreno e da estrutura de contenção existente no km 140+700 m da BR-101/SC. Um modelo para a previsão de ocorrência de movimentos de massa a partir de escorregamentos pretéritos documentados também foi elaborado, possibilitando a delimitação de cenários pluviométricos associados à ações preventivas para controle ou interrupção de tráfego. A aplicação dessa ferramenta, em conjunto com dados recentes de pluviometria e mapas de suscetibilidade, representa um importante instrumento de gestão da operação rodoviária implantado inicialmente no trecho da Serra do Mar da BR-376/PR e na sequência para a área do Morro do Boi.

Resultados obtidos com a ampliação da série histórica ao longo da Fase 2 de monitoramento mostraram que a representatividade desses modelos está diretamente relacionada com a existência de informações detalhadas sobre a distribuição espacial dos movimentos de massa e dos eventos de chuva a eles associados, reforçando a importância da ampliação dessas séries históricas com a continuidade do monitoramento. Visitas mensais aos locais monitorados ilustraram a importância da

realização de procedimentos de manutenção preventivos nos equipamentos de medição e armazenamento de dados, garantindo a representatividade dos dados e um bom funcionamento dos mesmos.

Com base no contexto descrito nos parágrafos precedentes, propôs-se o aperfeiçoamento das técnicas de análise dos dados obtidos com o sistema de monitoramento a partir da automação da transmissão das leituras dos instrumentos instalados na encosta do Morro do Boi (BR-101/SC). Em complemento a isso, uma reavaliação do nível de suscetibilidade em uma área classificada como de maior risco na região de Serra do Mar situada ao longo da BR-376/PR foi realizada com base em resultados de investigação geotécnica. A interpretação e utilização desses resultados, em conjunto com uma plataforma de gerenciamento de informações contemplando todos os instrumentos instalados nas etapas iniciais da pesquisa, permitiram aperfeiçoar os parâmetros de alerta propostos e representaram a motivação para o desenvolvimento da presente pesquisa.

5 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

5.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

Propôs-se com a presente pesquisa o aprofundamento do conhecimento gerado no projeto em epígrafe, mediante a aplicação de novas técnicas de investigação geotécnica, particularmente geofísicas, e melhorias no sistema de aquisição de dados implantado no trecho de estudo, incluindo a ampliação da série histórica de monitoramento. Foram previstas visitas mensais para aquisição de leituras e verificação do sistema de monitoramento instalado no trecho da Serra do Mar da BR-376/PR e também no Morro do Boi (km 140+700 m da BR-101/SC). Na BR-376/PR, uma área inicialmente classificada como de maior suscetibilidade foi reavaliada por meio de campanhas de investigação geotécnica envolvendo métodos diretos (sondagens a percussão, rotativas e penetrômetro dinâmico leve) e indiretos (ensaios geofísicos) para mapeamento do subsolo. No Morro do Boi, a automação da transmissão das leituras de

todos os sensores permitiu o acesso a essas informações de forma rápida e simplificada. O estudo contemplou ainda a implantação de uma ferramenta para gerenciamento *online* de todas as informações obtidas com os instrumentos de ambas as áreas objeto da presente pesquisa, otimizando a etapa de processamento e interpretação dos resultados. Uma análise crítica dos resultados obtidos por meio da ampliação da série histórica e em conjunto com novas análises desenvolvidas ao longo da pesquisa permitiu o aperfeiçoamento de critérios de alerta preestabelecidos.

5.2 ETAPAS

De forma sucinta, foram propostas as seguintes etapas:

1. Visitas ao sítio de estudo, participações em eventos e reuniões
2. Processamento e análise dos dados
3. Implantação de uma plataforma de gerenciamento de dados
4. Reavaliação de áreas de risco
5. Análise crítica integrada
6. Capacitação de pessoas
7. Emissão de relatórios

Etapa 1 – Visitas ao sítio de estudo, participações em eventos e reuniões

Foram realizadas visitas mensais para aquisição de leituras e verificação do sistema de monitoramento instalado nas etapas iniciais da pesquisa desenvolvida no trecho da Serra do Mar da BR-376/PR intitulada “Projeto 4 - Riscos geológico-geotécnicos em taludes rodoviários: desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento integrado de informações para a BR-376/PR, trecho da

Serra do Mar (PR-SC)" e do sistema de monitoramento implantado no Morro do Boi (km 140+700 m da BR-101/SC) ao longo da pesquisa intitulada "Projeto 3 - Avaliações de estabilidade e do desempenho de sistemas de proteção de taludes rodoviários em uma encosta litorânea".

Nestas visitas, procedimentos de manutenção preventiva dos instrumentos instalados foram realizados, tais como: inspeção visual, limpeza e desobstrução dos pluviógrafos e verificação do sistema de alimentação de energia de cada estação (painel solar, controlador de carga e baterias).

Etapa 2 – Processamento e análise dos dados

As leituras dos instrumentos obtidas ao longo da Etapa 1 foram processadas e organizadas em séries temporais, alimentando-se e reavaliando-se a segurança dos taludes rodoviários com base nos cenários de chuvas definidos nas etapas iniciais da pesquisa e no monitoramento obtido no período contemplado pela presente pesquisa. As leituras foram interpretadas buscando-se aperfeiçoar o entendimento dos mecanismos plúvio-geotécnico-ambientais que controlam a segurança das encostas monitoradas e realimentando os limiares pluviométricos definidos ao longo das etapas iniciais da pesquisa.

Etapa 3 – Implantação de uma plataforma de gerenciamento de dados

Para que o monitoramento das áreas instrumentadas pudesse ser realizado de forma mais efetiva, foi proposta a automação da coleta de dados do sistema de monitoramento instalado no Morro do Boi, permitindo o acesso remoto aos registros obtidos com toda a instrumentação instalada nas etapas iniciais da pesquisa. Tal procedimento permite realimentar os limiares pluviométricos definidos na etapa inicial da pesquisa bem como gerenciar mecanismos de alerta preestabelecidos. A implantação de uma plataforma de gerenciamento *online* dos dados de todo o monitoramento

implantado ao longo do trecho de concessão da Autopista Litoral Sul nas etapas iniciais de pesquisa permitiu ainda um acesso às informações de forma simplificada e dinâmica.

Etapa 4 – Reavaliação de áreas de risco

Como parte do escopo desenvolvido na etapa inicial da pesquisa intitulada "Projeto 4 - Riscos geológico-geotécnicos em taludes rodoviários: desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento integrado de informações para a BR-376/PR, trecho da Serra do Mar (PR-SC)", algumas áreas foram definidas como de maior suscetibilidade à ocorrência de processos instabilizantes. Propôs-se uma reavaliação das condicionantes geotécnicas e do índice de suscetibilidade com base em uma nova campanha de investigação geotécnica envolvendo técnicas de ensaios geofísicos do tipo eletrorresistividade e sísmica de refração e, ainda, sondagens mistas e com penetrômetro dinâmico leve, para reavaliação do índice de suscetibilidade em uma área considerada como de maior criticidade. A experiência adquirida em pesquisas já iniciadas (Morro do Boi/SC e Serra Pelada/SP), em conjunto com outros estudos relacionados ao tema (e.g. Braga *et al.,* 1999; Israil e Pachauri, 2003; Samouëlian *et al.,* 2005; Cosenza *et al.,* 2006; Sudha *et al.,* 2009), fundamentaram a aplicabilidade da combinação entre essas duas técnicas de ensaio, proporcionando o mapeamento e entendimento da estratigrafia ao longo de áreas de maior extensão.

Etapa 5 – Análise crítica integrada

Análises críticas dos resultados obtidos ao longo da pesquisa foram desenvolvidas, buscando-se revisar diretrizes e metodologias para o gerenciamento de riscos definidas nas fases iniciais da pesquisa com base na ampliação da série histórica da instrumentação e em informações e conclusões obtidas nas etapas 3 e 4.

Etapa 6 – Capacitação de pessoas

Esta etapa se refere à participação no Workshop de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico, promovido anualmente pela Agência Nacional de Transportes – ANTT.

Etapa 7 – Emissão de relatórios

Os resultados parciais obtidos em cada etapa de trabalho foram apresentados em relatórios semestrais de acompanhamento e os resultados da pesquisa encontram-se consolidados neste relatório final.

6 RELATÓRIO FINAL

O presente projeto envolveu o monitoramento e ampliação da série histórica de equipamentos instalados na etapa inicial de duas pesquisas em áreas distintas. Nos itens subsequentes são apresentadas as atividades desenvolvidas ao longo do mesmo, estando os dados classificados em dois grupos:

- BR-376/PR – compreende as informações do monitoramento instalado ao longo do Projeto 4 - Riscos geológico-geotécnicos em taludes rodoviários: desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento integrado de informações para a BR-376/PR, trecho da Serra do Mar (PR-SC).
- BR-101/SC – compreende as informações do monitoramento instalado ao longo do Projeto 3 - Avaliações de estabilidade e do desempenho de sistemas de proteção de taludes rodoviários em uma encosta litorânea.

6.1 Visitas ao sítio de estudo

6.1.1 Visitas BR-376/PR

Visitas mensais ao sítio de estudo foram realizadas ao longo do desenvolvimento do presente projeto. Tais atividades tiveram como objetivo a manutenção preventiva dos instrumentos instalados, envolvendo procedimentos como: inspeção visual, limpeza e desobstrução dos seis pluviógrafos instalados em campo e verificação do correto funcionamento do sistema de alimentação de energia das estações, além do preenchimento da coluna d'água dos tensiômetros.

Durante as atividades realizadas cabe salientar problemas técnicos identificados e as respectivas soluções adotadas:

- Substituição de todos os modems (Figura 1), atualização de *firmware* de todos os *dataloggers* e rotação dos equipamentos buscando-se um melhor

sinal em campo para tratar falhas de transmissão dos dados dos pluviógrafos;

- Retirada de um vespeiro na caixa do *datalogger* do pluviógrafo P6;
- Manutenção dos tensiômetros com retirada de transdutores e *dataloggers* para calibração em laboratório e substituição de manômetros;
- Manutenção de tensiômetros danificados por ações de vandalismo e quebra do dispositivo de preenchimento do tubo;
- Troca de *dataloggers* e cartão SD (Figura 1) visando a implantação da plataforma de gerenciamento de dados;
- Reinstalação do tensiômetro TENS-03 para substituição do dispositivo de preenchimento do tubo, danificado em campo durante uma atividade de manutenção do equipamento.

Como consequência dessas ocorrências, alguns instrumentos apresentaram interrupção de leituras em períodos específicos, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo dos períodos de interrupção de leituras do sistema de monitoramento da BR-376/PR

Instrumento	Período	Motivo
P1 (km 660+570 m)	07/11/2017 a 13/11/2017	Retirada datalogger de campo (calibração)
P2 (km 667+900 m)	07/11/2017 a 13/11/2017	Retirada datalogger de campo (calibração)
P3 (km 669+300 m)	17/05/2018	Problemas técnicos
P4 (km 676+800 m)	17/05/2018 a 20/05/2018	Problemas técnicos
P6 (km 662+000 m)	26/09/2017 a 13/11/2017	Retirada datalogger de campo (calibração)
Tensiômetros - TENS-01 e TENS-02	07/11/2017 a 13/11/2017	Retirada datalogger de campo (calibração)
Tensiômetro – TENS-03	05/03/18 a 15/10/18	Quebra reservatório de água, retirada equipamento de campo, calibração em laboratório e troca do tubo
Tensiômetro – TENS-04	13/11/17 a 31/12/2018	Equipamento vandalizado



(a)



(b)



(c)

Figura 1 - (a) Troca de modem dos pluviógrafos; (b) Novo *datalogger* instalado; (c) Troca da caixa do novo *datalogger* e instalação de painel solar

6.1.1 Visitas BR-101/SC

Visitas mensais ao monitoramento implantado no Morro do Boi localizado na BR-101/SC também foram realizadas ao longo do projeto. Assim como descrito anteriormente, tais atividades tiveram como intuito a aquisição dos dados das leituras (*datalogger* de leitura integrada e pluviógrafo), a inspeção visual da área de estudo e a execução de procedimentos de manutenção.

Dentre as atividades realizadas, observaram-se, também, dificuldades operacionais das quais se citam:

- Desobstrução do pluviógrafo (Figura 2) mediante limpeza de vegetação;
- Troca da central de alarme e chip de celular na casa de leituras;
- Manutenção da porta da casa de leituras com troca das dobradiças e vedação da mesma buscando impedir a entrada de insetos e outros animais (Figura 2);
- Realocação do pluviógrafo e atualização do sistema de modo a compatibilizar suas leituras com a plataforma de gerenciamento de dados.

Assim como descrito para a BR-376/PR, como consequência dessas ocorrências alguns instrumentos apresentaram a interrupção das leituras em períodos específicos, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo dos períodos de interrupção de leituras do sistema de monitoramento da BR-101/SC (Morro do Boi)

Instrumento	Período	Motivo
Pluviógrafo	01/01/2017 a 12/01/2017	Obstrução
	17/01/2018 a 22/01/2018	Obstrução
	13/03/2018 a 01/04/2018	Obstrução
	16/05/2018 a 17/05/2018	Problemas técnicos
	16/06/2018 a 19/06/2018	Problemas técnicos
	27/06/2018 a 03/07/2018	Problemas técnicos
Strain Gage (Barra 4)	09/06/2017 a 04/10/2017	Problemas técnicos
Crackmeter (CRA-07)	05/05/2018 a 21/05/2018	Problemas técnicos
Datalogger Integrado	27/06/2018 a 03/07/2018	Problemas técnicos



(a) (b)

Figura 2 - (a) Obstrução do pluviógrafo; (b) Visão geral após manutenção na porta da casa de leituras e vedação das frestas

6.2 Processamento e análise dos dados

Apresenta-se a seguir o processamento de dados provenientes da instrumentação instalada na BR-376/PR e BR-101/SC. As análises objetivaram ampliar o entendimento sobre o comportamento geológico-geotécnico, hidrológico e pluviométrico dos locais em estudo.

6.2.1 Monitoramento BR-376/PR

Propôs-se o monitoramento de aspectos geológico-geotécnicos, hidrológicos e ambientais por meio de um plano de instrumentação concebido e implantado ao longo da BR-376/PR, entre os km 644+000 m e km 680+000 m. As medições realizadas e processadas identificaram variações de poropressão, do nível do lençol freático e de eventos pluviométricos. Foram avaliados dados provenientes de seis pluviógrafos, quatro tensiômetros e medidores de nível d'água estão distribuídos ao longo da BR-376/PR. Nos itens subsequentes são apresentadas as séries históricas contendo as leituras desses instrumentos entre janeiro de 2017 e dezembro de 2018.

6.2.1.1 Pluviógrafos

Como parte do monitoramento implantado no trecho da Serra do Mar da BR-376/PR, tem-se 6 (seis) pluviógrafos (Figura 3) cujos registros e transmissão dos dados são feitos de maneira automatizada. Desta forma, as leituras desses instrumentos foram obtidas regularmente de modo remoto (*online*). As informações dos pluviógrafos encontram-se detalhadas na Tabela 3. Cabe salientar que esses sensores foram instalados ao longo de diferentes altitudes/cotas do trecho da Serra do Mar, buscando assim identificar diferentes comportamentos e eventos de chuva ao longo de sua extensão.

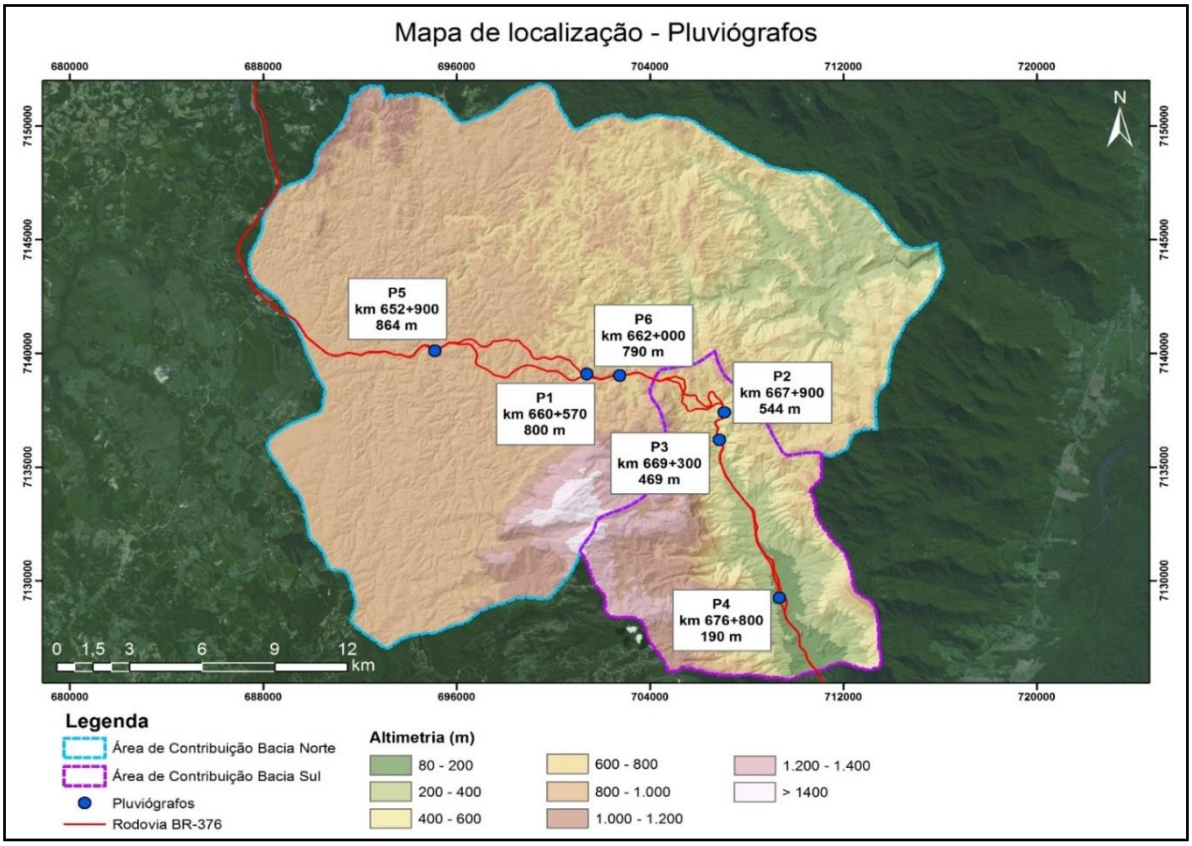


Figura 3 - Localização dos pluviógrafos ao longo da BR-376

Tabela 3 - Pluviógrafos instalados na BR-376: resumo das principais características

Instrumento	Identificação *datalogger*	Coordenadas		Cota (m)	km	Pista	Início da operação
P1	5G0E2968	701387E	7139099S	800	660+570 m	Sul – LD	12/03/2014
P2	5G0E2969	707073E	7137405S	544	667+900 m	Norte - LD	12/03/2014
P3	5G0E2971	706862E	7196189S	469	669+300 m	Sul – LD	27/02/2014
P4	5G0E2970	709353E	7129240S	190	676+000 m	Sul – LE	28/02/2014
P5	5G0D2249	695105E	7140121S	864	652+900 m	Sul – LD	09/09/2014
P6	5G0D2250	702744E	7139033S	790	662+000 m	Sul – LD	09/09/2014

6.2.1.1.1 Metodologia de preenchimento de falhas dos registros dos pluviógrafos

O preenchimento de falhas dos dados pluviométricos teve por objetivo estabelecer a continuidade da série histórica dos instrumentos de modo a obter uma análise mais consistente da sazonalidade regional bem como a previsibilidade da ocorrência de eventos de chuva significativos. Além disso, o uso dessa técnica representa o

estabelecimento de uma relação mais eficiente entre a precipitação e os registros de movimentos de massa por meio dos limiares pluviométricos críticos.

Cumming *et al.* (2007) descrevem que, em análises estatísticas, o aumento da amostra promove o encontro de médias que tendem a se aproximarem cada vez mais do valor real. Com isso, são apresentados neste relatório os dados pluviométricos preenchidos pela metodologia desenvolvida. Na sequência, os procedimentos adotados para tal são descritos de forma detalhada.

Primeiramente, buscou-se avaliar a existência de uma correlação linear entre os diversos pluviógrafos (P1 a P6) e a estação pluviométrica de Itararé, que possui dados anteriores à instalação daqueles equipamentos na região. A análise considerou os respectivos pluviógrafos de cada bacia hidrográfica (Norte e Sul) de forma individual, respeitando recomendações da Agência Nacional de Águas (ANA, 2012). Além disso, no que tange à estação de Itararé, a correlação foi realizada somente com o P3, por este ser o pluviógrafo mais próximo da mesma.

Ressalta-se que a estação de Itararé foi incluída nas análises para que os dados de precipitação anteriores a 2014 pudessem ser estimados. Dessa forma, foi possível obter a correlação com movimentações de massa registradas também nesse período.

Para o desenvolvimento dessa metodologia, utilizou-se o conceito de coeficiente de correlação de Pearson. Segundo Benesty *et al.* (2009), tal parâmetro representa a relação entre a covariância entre as variáveis e a multiplicação entre os desvios padrão de cada uma delas. Possui um intervalo de dados que varia de -1 a 1 e indica a existência de uma relação linear entre as variáveis, seja ela indireta ou diretamente proporcional, respectivamente.

Uma vez estabelecida a existência da correlação, Benesty *et al.* (2009) apontam que mais comumente utiliza-se esse coeficiente elevado ao quadrado, variando entre 0 e 1 e denominado de coeficiente de determinação, para que possa ser definido o grau da relação linear entre as variáveis, ou seja, alto, médio ou baixo.

A Tabela 4 apresenta os resultados dos coeficientes de correlação linear de Pearson obtidos com auxílio do *software* de tratamento estatístico de código aberto, WEKA, desenvolvido pela Universidade de Waikato (2010), na Nova Zelândia.

Tabela 4 - Correlação linear entre os pluviógrafos

Variável dependente	Variável independente	Variável independente	Correlação de Pearson
P6	P5	P1	0.88
P6	P1	-	0.85
P6	P5	-	0.82
P1	P5	P6	0.87
P1	P6	-	0.85
P1	P5	-	0.81
P5	P6	P1	0.85
P5	P6	-	0.83
P5	P1	-	0.81
P3	P2	P4	0.92
P3	P4	-	0.84
P3	P2	-	0.88
P2	P3	P4	0.89
P2	P3	-	0.89
P2	P4	-	0.76
P4	P2	P3	0.84
P4	P3	-	0.84
P4	P2	-	0.77
P3	ITA(*)		0.54

(*) Estação pluviométrica de Itararé

Com base na Tabela 4, nota-se a existência de fortes relações entre as precipitações registradas nas diversas estações, com exceção da correlação entre P3 e Itararé. Isso ocorre devido ao curto período de registro simultâneo entre os dois locais (entre os meses de abril de 2014 e abril de 2015).

Além disso, é possível concluir que entre os pluviógrafos instalados no trecho, a melhor correlação foi observada quando a variável dependente é o pluviógrafo P3 e as independentes são P2 e P4, ou seja, coeficiente igual a 0,92. Já o valor mínimo

alcançado foi na correlação entre os pluviógrafos P2 e P4, quando P2 é a respectiva variável dependente da equação (Coeficiente de Pearson igual a 0,76).

Uma vez verificada a existência da correlação linear entre os pluviógrafos, foi possível estabelecer tais parâmetros com base no conceito estatístico de regressão linear. Segundo Sell (2005), a equação matemática obtida por meio desse procedimento pode ser utilizada para estimar valores futuros de uma variável com base em dados medidos pela outra. Quando são correlacionados três pluviógrafos entre si, deve ser considerado o conceito de correlação linear múltipla. As respectivas equações e a definição dessas variáveis estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Tipos de regressão linear adaptadas para a correlação entre dados pluviométricos

Tipo	Função	Variáveis
Simples	$y = ax + b$	y – Variável dependente a – Parâmetro de ajuste x – Variável independente b – Zero
Múltipla	$y = ax_1 + bx_2 + c$	y – Variável dependente a – Parâmetro de ajuste x_1 – Variável independente x_2 – Variável independente c – Zero

É importante salientar que os valores dos coeficientes de b e c, na Tabela 5, foram igualados a zero para permitir que nos dias secos, sem registro de chuva, a correlação permitisse determinar valores nulos para a variável dependente. Além disso, o parâmetro de ajuste a, indica uma forte influência da variável independente sobre a dependente quando este valor é próximo a 1. Quando o parâmetro a é muito próximo à zero, a variável independente causa pouca ou nenhuma influência na variação da variável dependente.

Para a análise de regressão linear, também se utilizou o *software* WEKA. A Tabela 6 apresenta os respectivos valores dos parâmetros encontrados com base na série

histórica de 27/02/2014 a 31/05/2018. Cabe salientar que tais resultados estão diretamente associados ao tamanho da série histórica utilizada.

Tabela 6 - Parâmetros lineares das correlações entre os pluviógrafos

Variável dependente	Variável independente	Variável independente	a	b	c
P6	P5	P1	0.4318	0.5615	0
P6	P1	-	0.8888	0	-
P6	P5	-	0.7424	0	-
P1	P5	P6	0.3985	0.5265	0
P1	P6	-	0.8223	0	-
P1	P5	-	0.8716	0	-
P5	P6	P1	0.4085	0.4061	0
P5	P6	-	0.9194	0	-
P5	P1	-	0.7612	0	-
P3	P2	P4	0.6287	0.3241	0
P3	P4	-	0.6822	0	-
P3	P2	-	0.9601	0	-
P2	P3	P4	0.7616	0.0541	0
P2	P3	-	0.8176	0	-
P2	P4	-	1.0224	0	-
P4	P2	P3	0.119	0.9412	0
P4	P3	-	1.038	0	-
P4	P2	-	0.5738	0	-
P3	ITA(*)		1.0081	0	

(*) Estação pluviométrica de Itararé

6.2.1.1.2 Processamento e análises comparativas

Na sequência são analisados os dados de instrumentação registrados desde o início de operação de cada instrumento até o dia 31/12/2018. O Apêndice 1 apresenta os registros de precipitação acumulados, em 24 horas, para cada um dos instrumentos instalados, juntamente com os dados preenchidos por meio da metodologia de preenchimento de falhas.

Com base na análise dos dados referentes às séries históricas completas é possível concluir que o pluviógrafo P4 registrou eventos pluviométricos de maior intensidade diária, atingindo valores superiores a 200 mm. Os pluviógrafos P2 e P3 apresentaram registros pluviométricos máximos em torno de 150 mm, e o pluviógrafo P6 máximas de aproximadamente 100 mm. Os pluviógrafos P1 e P5 registraram os menores volumes diários, estando os picos em torno de 75 mm.

Com relação ao período compreendido pela Fase 3 deste projeto (janeiro de 2017 a dezembro de 2018), verificou-se que os valores médios diários acumulados se apresentam de forma crescente, no sentido da pista sul (direção Curitiba-Florianópolis), com a localização dos pluviógrafos (Tabela 7). Ainda, observou-se um aumento da precipitação média diária com a redução das altitudes. Tais variações se devem possivelmente à proximidade dos pluviógrafos da região costeira e consequentemente da maior influência das chuvas oriundas do oceano.

Na comparação das precipitações médias diárias registradas entre os períodos chuvosos (novembro a março) e os períodos secos (abril a outubro), o período seco apresentou 21,5% e 20% menos chuvas para os pluviógrafos P5 e P6, respectivamente. Já para os pluviógrafos P1, P2, P3 e P4 o período seco apresentou uma diferença de 40,7%, 37,9%, 36,3% e 36,6% de chuva em relação ao período chuvoso.

Tabela 7 - Valores de precipitação média diária registrados entre janeiro de 2017 e dezembro de 2018, para períodos secos e chuvosos

Média (mm/dia)	P5 km 652+900 m 864 m	P1 km 660+570 m 800 m	P6 km 662+000 m 790 m	P2 km 667+900 m 544 m	P3 km 669+300 m 469 m	P4 km 676+000 m 190 m
Período Chuvoso (Nov. a Mar.)	5,1	5,9	7,0	7,9	9,1	10,1
Período Seco (Abr. a Out.)	4,0	3,5	5,6	4,9	5,8	6,4

Nas Figuras 4 a 6 são apresentadas as leituras de todos os instrumentos entre janeiro de 2017 e dezembro de 2018, com a finalidade de expor em maior detalhe a dinâmica pluviométrica da região nesse período. Os pluviógrafos de forma geral apresentaram picos máximos de precipitação diária nos meses de janeiro e fevereiro, principalmente no ano de 2017, sendo a máxima de aproximadamente 75 mm para os pluviógrafos P1 e P5, de 100 mm para os pluviógrafos P2, P3 e P6 e de 200 mm para o pluviógrafo P4. Nos meses de maio, outubro e dezembro também foram registrados picos de precipitação diária, sendo mais evidente para os pluviógrafos P1, P3, P4 e P6. Nos demais períodos do ano as precipitações diárias foram, em geral, menores do que 50 mm.

Buscou-se ainda interpretar as informações de precipitação em função dos registros anuais acumulados (Figuras 7 e 8). Maack (1981) descreve que as precipitações na região da Serra do Mar são distribuídas ao longo de todo o ano e variam de acordo com a topografia. Ainda segundo o autor, as medidas de precipitação feitas na região litorânea ultrapassam 2000 mm anuais, enquanto nas encostas esses valores chegam a 3500 mm e na região do planalto em torno de 1500 mm. Segundo Soares *et al*. (2005), no estado do Rio de Janeiro, as encostas da Serra do Mar apresentam índice pluviométrico anual acima de 2000 mm, ultrapassando 2500 mm em algumas localidades. No estado de São Paulo, Zipparro *et al*. (2005) descrevem a influência direta do oceano nas condições climáticas da região da Serra do Mar, onde são registrados em torno de 3600 mm por ano na porção litorânea, enquanto que a maiores distâncias do oceano as chuvas anuais estão entre 1300 mm e 1600 mm. Considerou-se neste projeto, para fins de comparação, uma precipitação média anual de 1700 mm, determinada a partir do intervalo de precipitação anual regional de 1400 mm a 2500 mm apresentado na Carta Climática do Paraná do Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR (2017) para a área de estudo.

Em 2017 foram registrados acumulados anuais, em geral, semelhantes ao ano de 2015, sendo este o período mais chuvoso desde o início do monitoramento. Os pluviógrafos P1 e P5 apresentaram em 2017 um acumulado anual entre 1800 mm e 1900 mm, já os pluviógrafos P2, P3, P4 e P6 tiveram medições de precipitação

acumulada anual em torno de 2400 mm a até aproximadamente 3250 mm. Tais medidas estão dentro da faixa de valores descritas acima para a Serra do Mar nos diferentes estados brasileiros, sendo que os pluviógrafos mais distantes da porção litorânea apresentaram os menores acumulados anuais, condizendo também com as características observadas para a região da Serra do Mar no estado de São Paulo. A precipitação média anual (1700 mm) foi atingida pelos pluviógrafos P3, P4 e P6 já no primeiro semestre do ano, enquanto que o pluviógrafo P2 a alcançou no início do segundo semestre e P1 e P5 no final do mesmo.

Ressalta-se também que o ano de 2018 apresentou o menor acumulado anual em relação a toda a série histórica de monitoramento na região para todos os pluviógrafos, desde 2014. Porém, para o pluviógrafo P6 o acumulado anual de 2018 foi similar ao de 2016. Em outubro houve um aumento considerável no acumulado anual registrado para todos os pluviógrafos, sendo este o mês com maior precipitação em 2018. Os pluviógrafos P1 e P5 apresentaram precipitação acumulada anual menor do que 1500 mm e não atingiram a média anual de referência (1700 mm). O pluviógrafo P6 registrou um acumulado anual de aproximadamente 1850 mm e os equipamentos P2, P3 e P4 entre 2000 mm e 2600 mm, alcançando a média anual no segundo semestre de 2018.

Em complemento a isso, foram também realizadas análises comparativas entre os dados de chuva registrados ao longo de um mesmo período (mês) para os anos de 2014 a 2018 (Figuras 9 e 10). Observa-se que no ano de 2017 registros com picos de precipitação (entre 250 mm e 500 mm) nos meses de janeiro e maio para todos os pluviógrafos e julho como o mês mais seco do ano, com exceção do pluviógrafo P6 que apresentou as menores leituras em setembro. Durante 2018, contudo, os volumes máximos foram registrados nos meses de janeiro e outubro (200 mm a aproximadamente 500 mm), e os meses de abril (P5), maio (P6), julho (P1, P2 e P4) e agosto (P3) compreenderam os períodos mais secos.

Machado (2016) descreve em seu estudo precipitações máximas esperadas em 24 horas para tempos de recorrência ou retorno (Tr) de 5, 10, 25, 50 e 100 anos na região da Serra do Mar no litoral do estado do Paraná, por meio de dados obtidos por 3 estações

pluviométricas localizadas nos municípios de Morretes, Antonina e Guaratuba. O autor utilizou intervalos temporais de dados de 75 anos para a estação de Morretes, 33 anos para a estação de Guaratuba e 40 anos para a estação de Antonina. Para um tempo de recorrência de 5 anos, as chuvas esperadas para os 3 municípios são maiores do que 100 mm, com valor máximo de 155,03 mm de chuva para Guaratuba. Em um tempo de retorno de 10 anos foram determinadas chuvas esperadas de aproximadamente 150 mm a até 191,64 mm (Guaratuba). Para os tempos de recorrência de 25, 50 e 100 anos as chuvas esperadas são maiores do que 180 mm.

Tais precipitações máximas encontradas por Machado (2016) foram comparadas com as precipitações máximas registradas pelos pluviógrafos localizados na BR-376/PR. Observa-se que os pluviógrafos P1 e P5, ao longo da série histórica de dados, ou seja, 5 anos, não apresentaram chuvas máximas em 24h iguais ou maiores do que 100 mm. O pluviógrafo P6 apresentou em toda a série uma chuva de aproximadamente 100 mm em 2017. Já para o pluviógrafo P2 foram obtidas precipitações em torno de 100 mm em 2014 e 2017, ou seja, um intervalo de 3 anos, volumes similares aos descritos para 5 anos de recorrência com base em Machado (2016). Os pluviógrafos P2 e P3 registraram chuvas de 150 mm nos anos de 2016 e 2014, respectivamente. Machado (2016) determinou um tempo de recorrência de 10 anos para chuvas de igual intensidade para os municípios de Antonina e Morretes. Por fim, o pluviógrafo P4 apresentou chuvas de 175 mm a 200 mm em 2014 e 2017, desta forma com um intervalo de 3 anos, enquanto que para os municípios estudados por Machado (2016), chuvas similares teriam um tempo de recorrência de 10 a 25 anos.

Ottero *et al*. (2018) também analisaram as precipitações máximas esperadas na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro para tempos de recorrência de 5, 10, 20, 50, 100 e 1000 anos. No geral, foram obtidas chuvas máximas muito similares às definidas por Machado (2016). Para um tempo de retorno de 5 anos são esperadas precipitações com no mínimo aproximadamente 100 mm em 24h. Para um tempo de recorrência de 10 anos as precipitações esperadas são em geral de 150 mm a 193,4 mm, com exceção de 2 municípios que apresentaram chuvas esperadas menores. Para os

tempos de recorrência de 50, 100 e 1000 anos as precipitações máximas esperadas em 24h são maiores do que 185 mm.

Com relação à outras regiões brasileiras, Assad *et al*. (1992) determinaram a precipitação máxima diária para 100 estações localizadas no cerrado brasileiro em um tempo de recorrência de 5 anos. Em 80% dos casos, foram definidas chuvas máximas anuais superiores a 90 mm em 24h. Contudo, diferente do determinado para a região da Serra do Mar por outros autores, as precipitações máximas definidas para o cerrado brasileiro em um tempo de retorno de 5 anos não ultrapassam em geral 110 mm.

Tal comparativo permite reforçar o entendimento de que cada região apresenta um regime pluviométrico específico, em especial áreas de Serra do Mar. Definições em função da recorrência de chuvas na região da BR-376/PR poderão ser realizadas com o aumento da série histórica dos dados. Ottero *et al*. (2018) destaca a importância de série de dados longas para garantir uma melhor análise estatística com a identificação das variações nas tendências de chuva ao longo do tempo. Tucci (1993) também afirma que no estudo de eventos de chuvas o ideal é obter no mínimo 30 anos de dados históricos (Ottero *et al*., 2018).

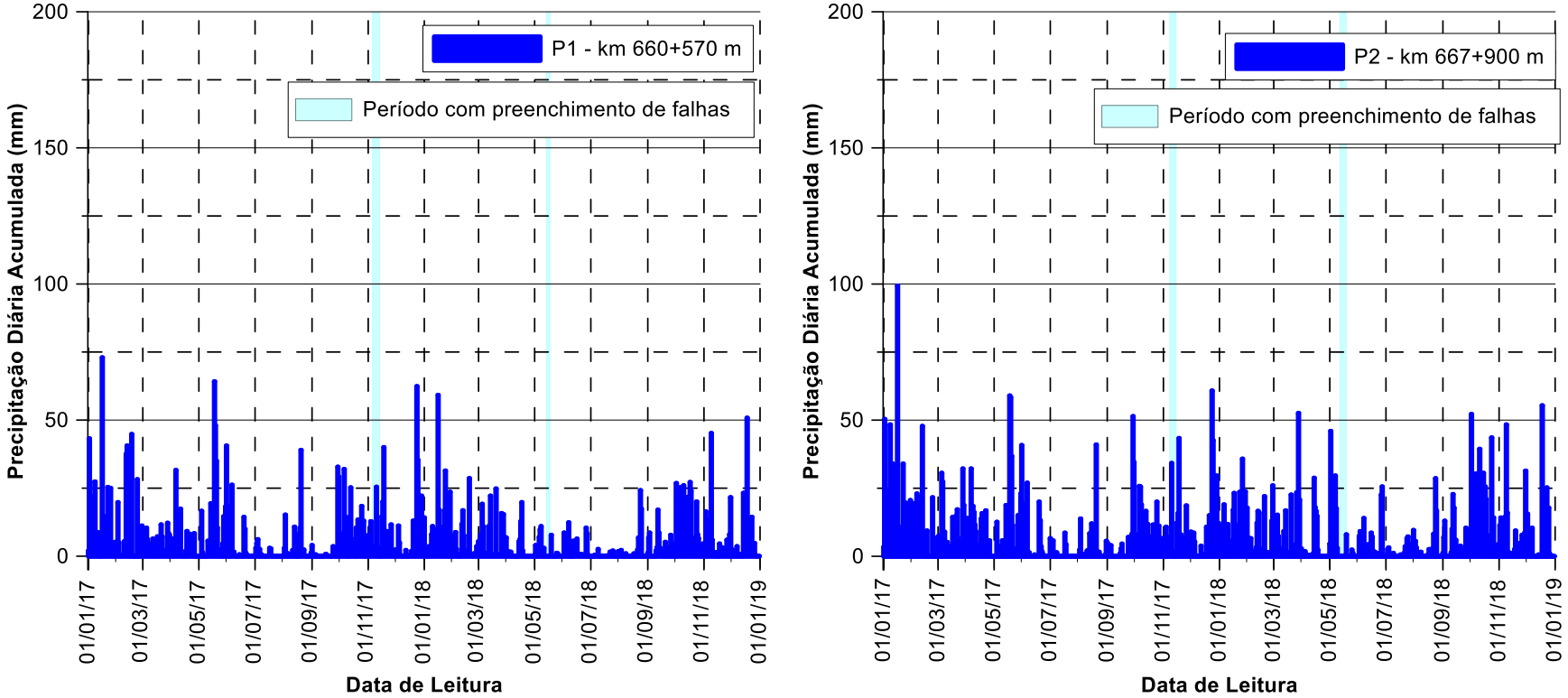


Figura 4 - Dados pluviométricos no período de 01/01/2017 a 31/12/2018 para os pluviógrafos P1 e P2 (mm/24h)

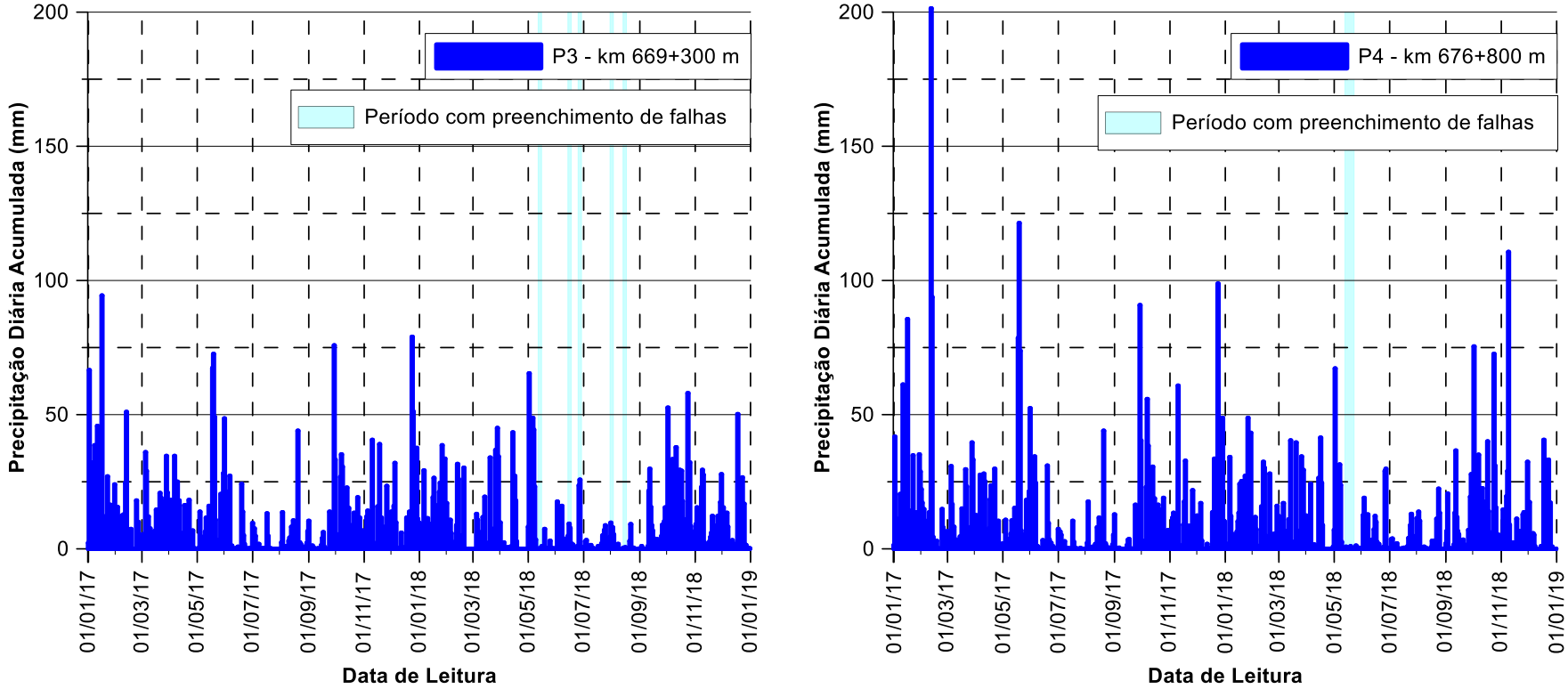


Figura 5 - Dados pluviométricos no período de 01/01/2017 a 31/12/2018 para os pluviógrafos P3 e P4 (mm/24h)

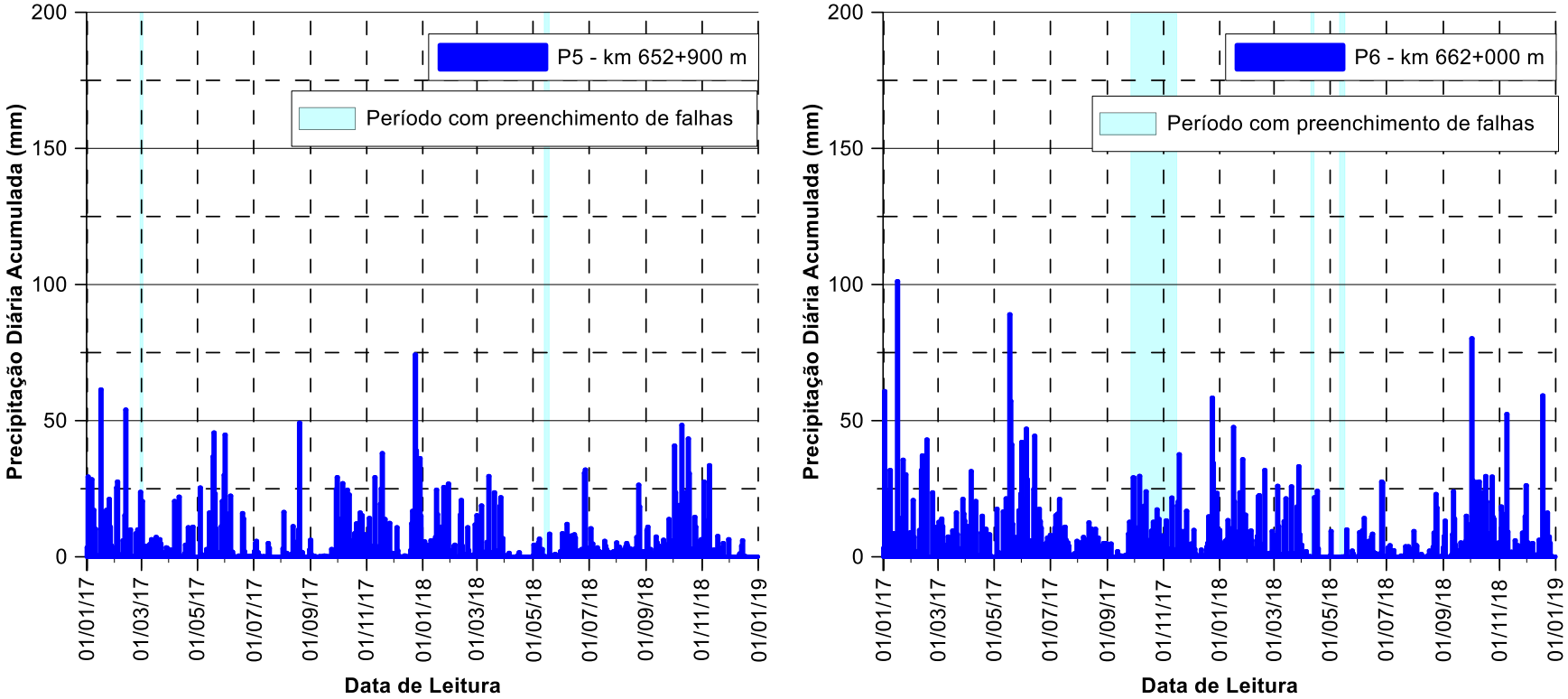


Figura 6 - Dados pluviométricos no período de 01/01/2017 a 31/12/2018 para os pluviógrafos P5 e P6 (mm/24h)

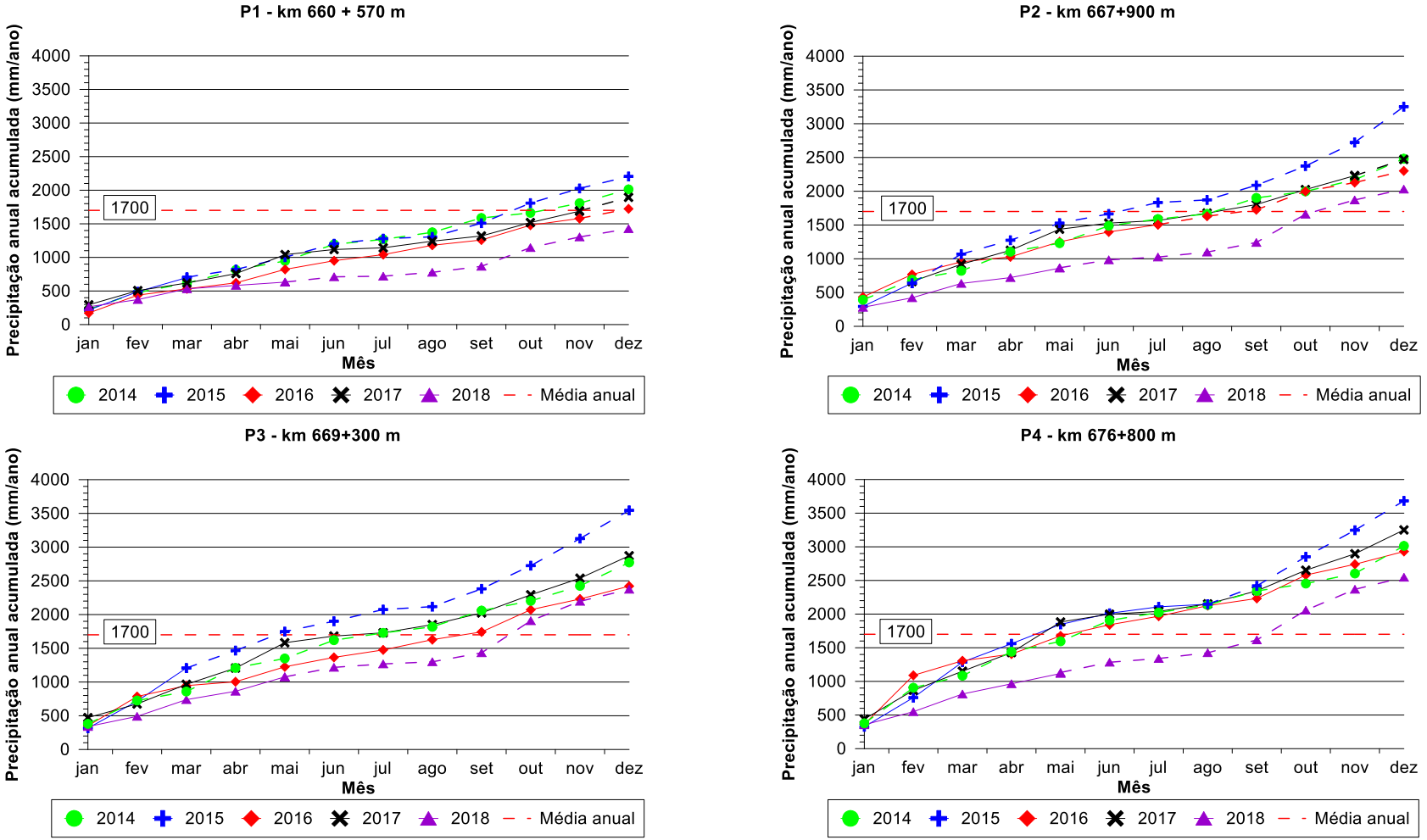


Figura 7 - Precipitação acumulada anual dos pluviógrafos P1 a P4 para os anos de 2014 a 2018, com preenchimento das falhas

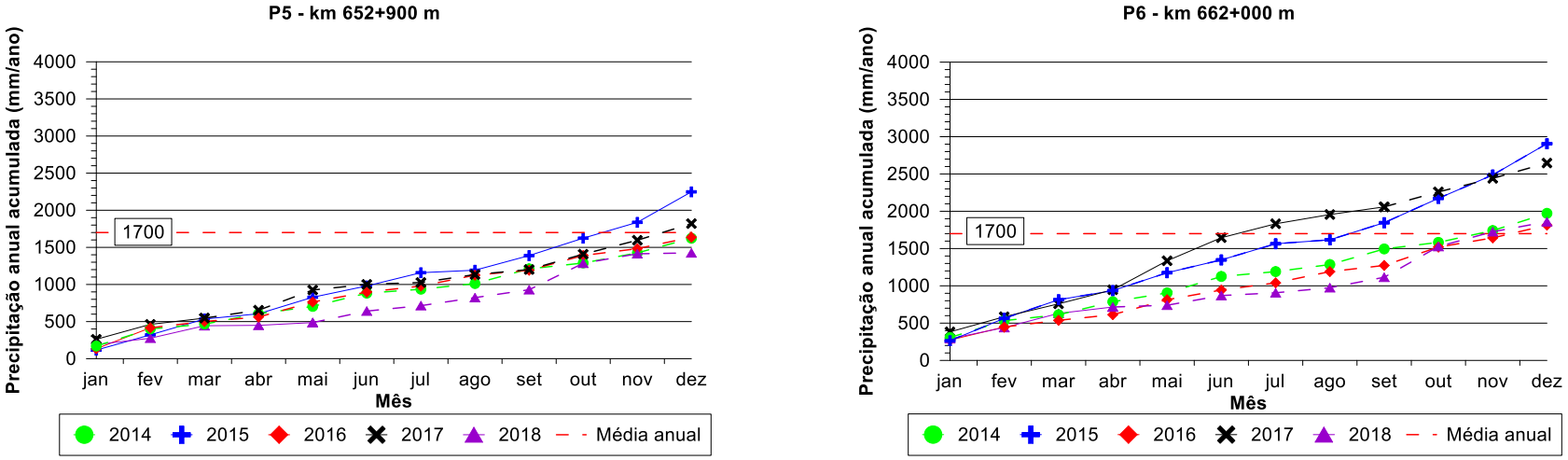


Figura 8 - Precipitação acumulada anual dos pluviógrafos P5 e P6 para os anos de 2014 a 2018, com preenchimento das falhas

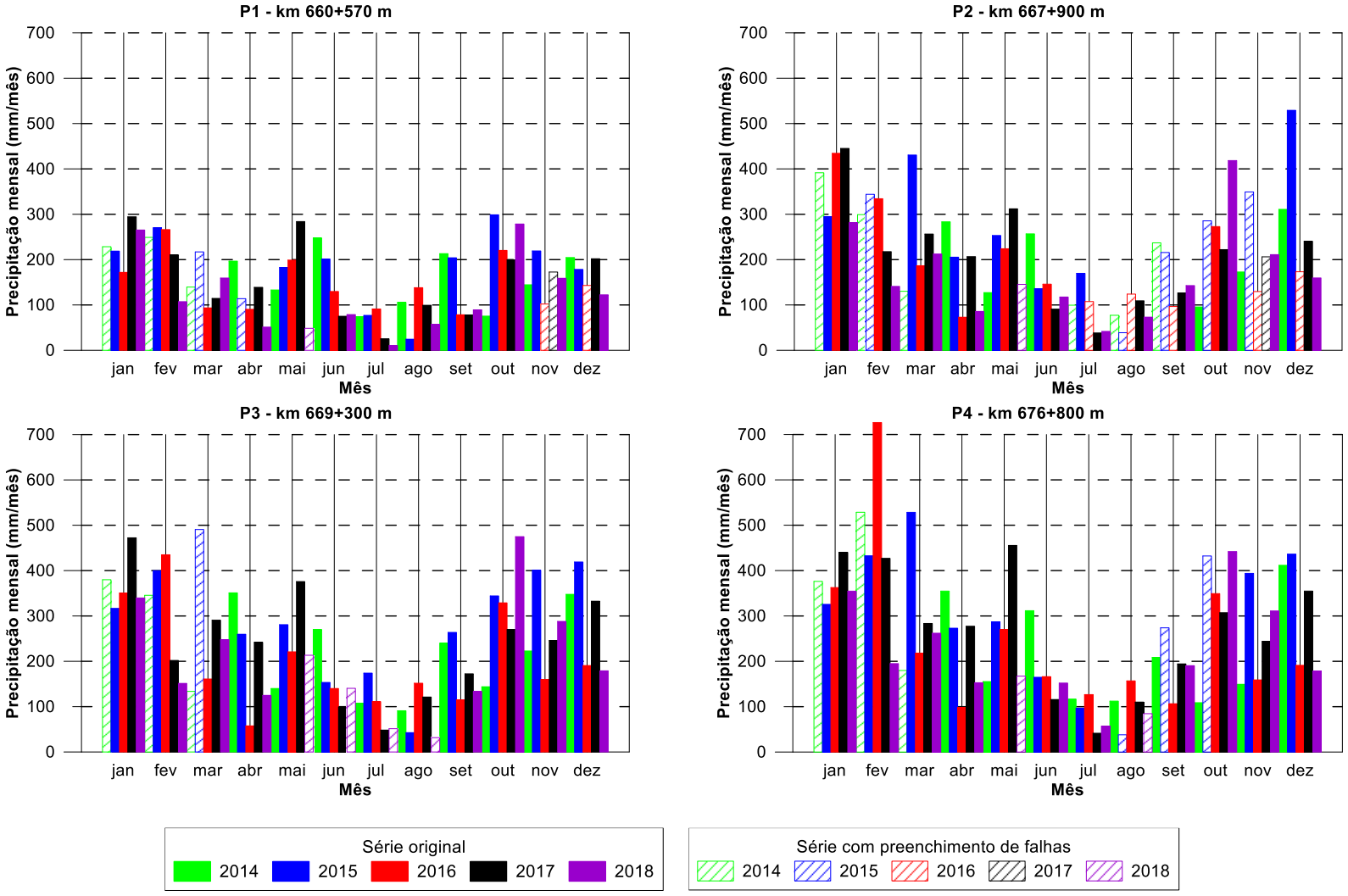


Figura 9 - Dados de precipitação acumulada mensal dos pluviógrafos P1 a P4 para os anos de 2014 a 2018, com preenchimento das falhas

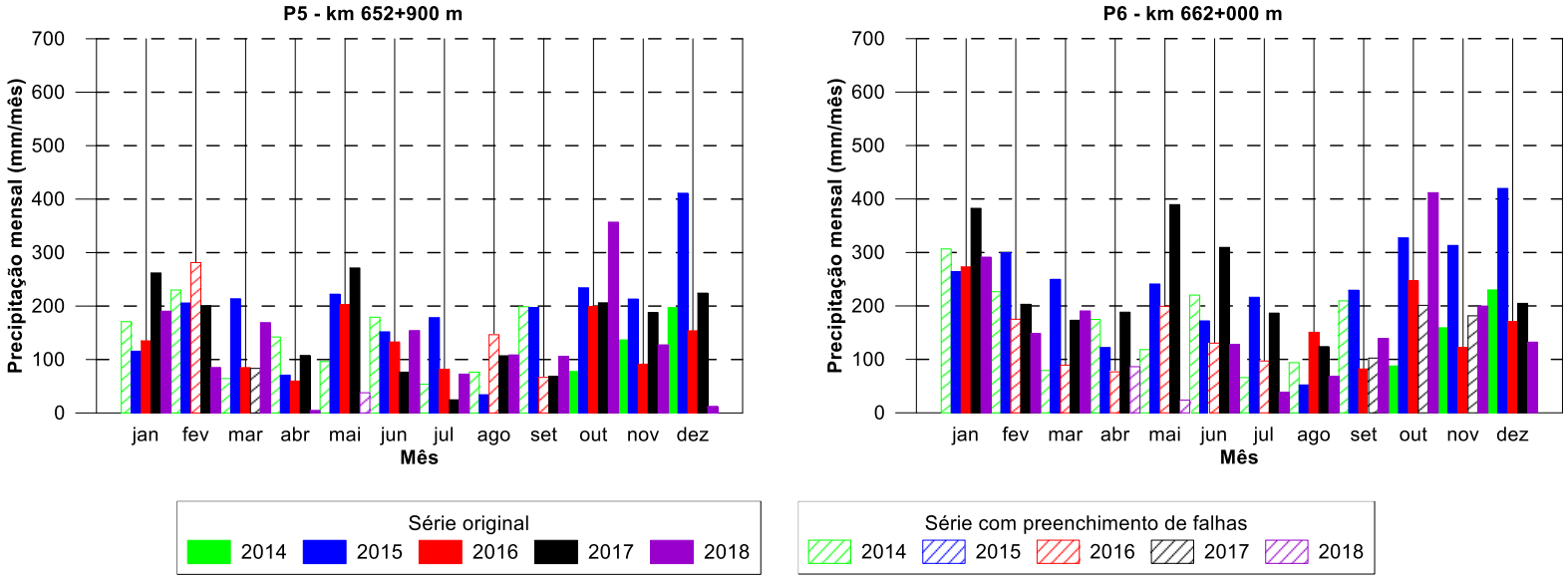


Figura 10 - Dados de precipitação acumulada mensal dos pluviógrafos P5 e P6 para os anos de 2014 a 2018, com preenchimento das falhas

6.2.1.2 Medidores de nível d'água

Com base em informações da concessionária Autopista Litoral Sul, análises de dados referentes ao monitoramento de variações do nível d'água em pontos específicos da rodovia foram elaboradas (Figura 11). A Tabela 8 apresenta informações referentes às coordenadas UTM, altitude, profundidade, início de operação, localização, bacia correspondente e pluviógrafo associado.

Tabela 8 – Informações gerais dos medidores de nível d'água da BR-376/PR

km	Pista	Bacia	MNA	Coordenadas UTM Leste	Coordenadas UTM Sul	Altitude (m)	Prof. (m)	Início	Pluviógrafo associado
657+450	Sul	Norte	01	698424,4	7139266,6	867	10,0	abr/12	P1
			02	698438,7	7139249,1	867	10,0		
			03	698447,1	7139234,8	862	9,5		
			04	698494,1	7139248,2	857	9,0		
658+400	Sul	Norte	01	699332,9	7139373,7	860	5,0	jun/12	P1
			02	699319,7	7139376,5	861	5,0		
			03	699326,3	7139355,2	870	8,0		
			04	699315,4	7139339,1	874	12,0		
663+260	Sul	Norte	01	703847,6	7138866,4	812	15,0	abr/16	P2
			02	703876,3	7138875,5	800	10,0		
			03	703888,5	7138882,4	794			
664+900	Sul	Sul	01	705270,6	7138395,1	727	12,0	set/15	P2
			02	705266,8	7138422,5	727	12,0		
			03	705308,4	7138398,5	718	6,0		
			04	705290,8	7138440,8	718	6,0		
667+120	Norte	Sul	01	706702,3	7138179,7	605	18,0	jan/15	P2
			02	706718,9	7138181,4	600	5,0		
			03	706751,9	7138153,1	610	18,0		
			04	706730,4	7138134,8	590	12,0		
672+400	Sul	Sul	01	708028,8	7133374,6	289	8,5	jun/15	P4
			02	708013,5	7133378,4	298	7,2		

A correlação entre o pluviógrafo associado e cada medidor de nível d'água foi realizada de modo a permitir a relação entre os dados de precipitação e a profundidade do lençol freático, de acordo com os dados da Tabela 9.

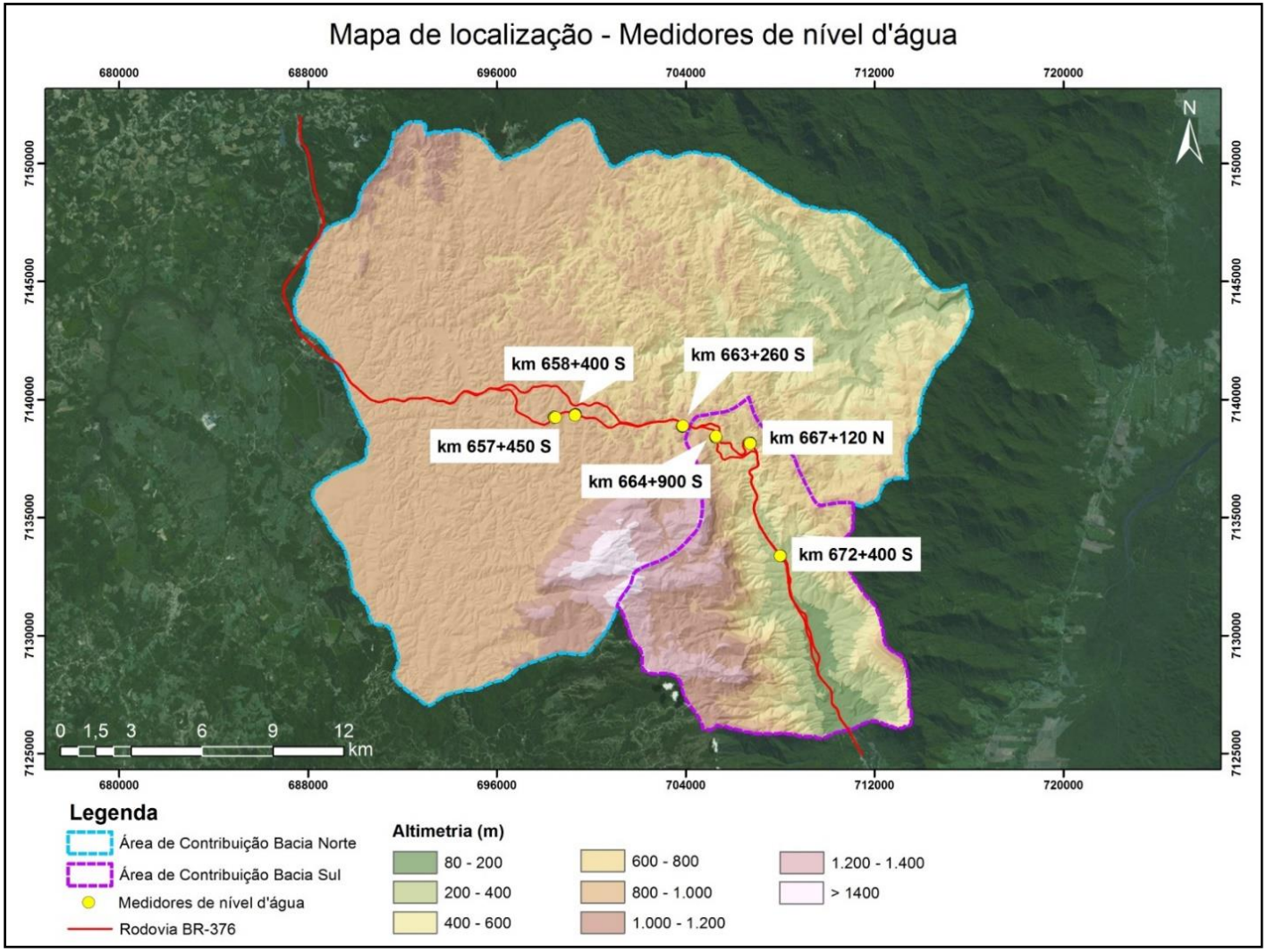


Figura 11 - Localização dos medidores de nível d’água ao longo da BR-376

Tabela 9 – Área de influência dos pluviógrafos

Bacia Hidrográfica	Pluviógrafos	km	Área de influência	
			Início	Fim
Norte	P5	652+900	644+000	657+000
	P1	660+570	656+000	661+000
	P6	662+000	661+000	663+000
Sul	P2	667+900	663+000	669+000
	P3	669+300	668+000	672+000
	P4	676+800	671+000	680+000

Nas Figuras 12 a 16 são apresentadas as plantas e os cortes de cada seção de interesse para análise dos pontos em que estão instalados os medidores de nível d'água e seus respectivos níveis freáticos máximo, médio e mínimo, considerando toda a série histórica de dados.

As maiores variações do nível d'água, entre valores máximos e mínimos, foram identificadas para os medidores localizados no km 657+450 m, km 663+260 m (MNA01), km 664+900 m (MNA01 e MNA02) e km 672+400 m (MNA02) e compreenderam uma ordem de grandeza entre 4 e 5 metros. Nos outros quilômetros, no entanto, as leituras ao longo dos anos apresentaram variações menores que 3 metros.

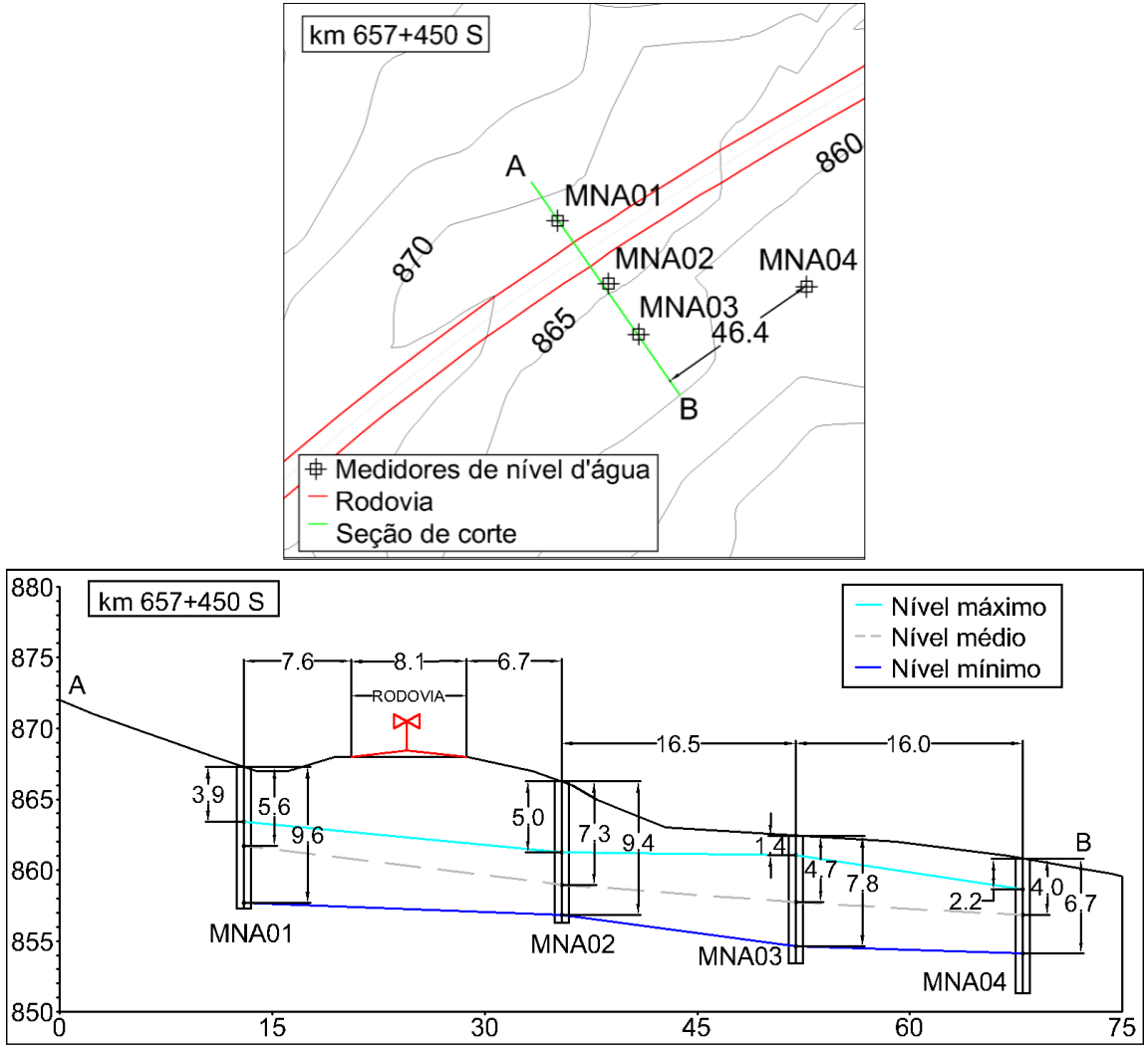


Figura 12 - Planta (acima) e seção (abaixo) dos medidores de nível d'água instalados no km 657+450 m

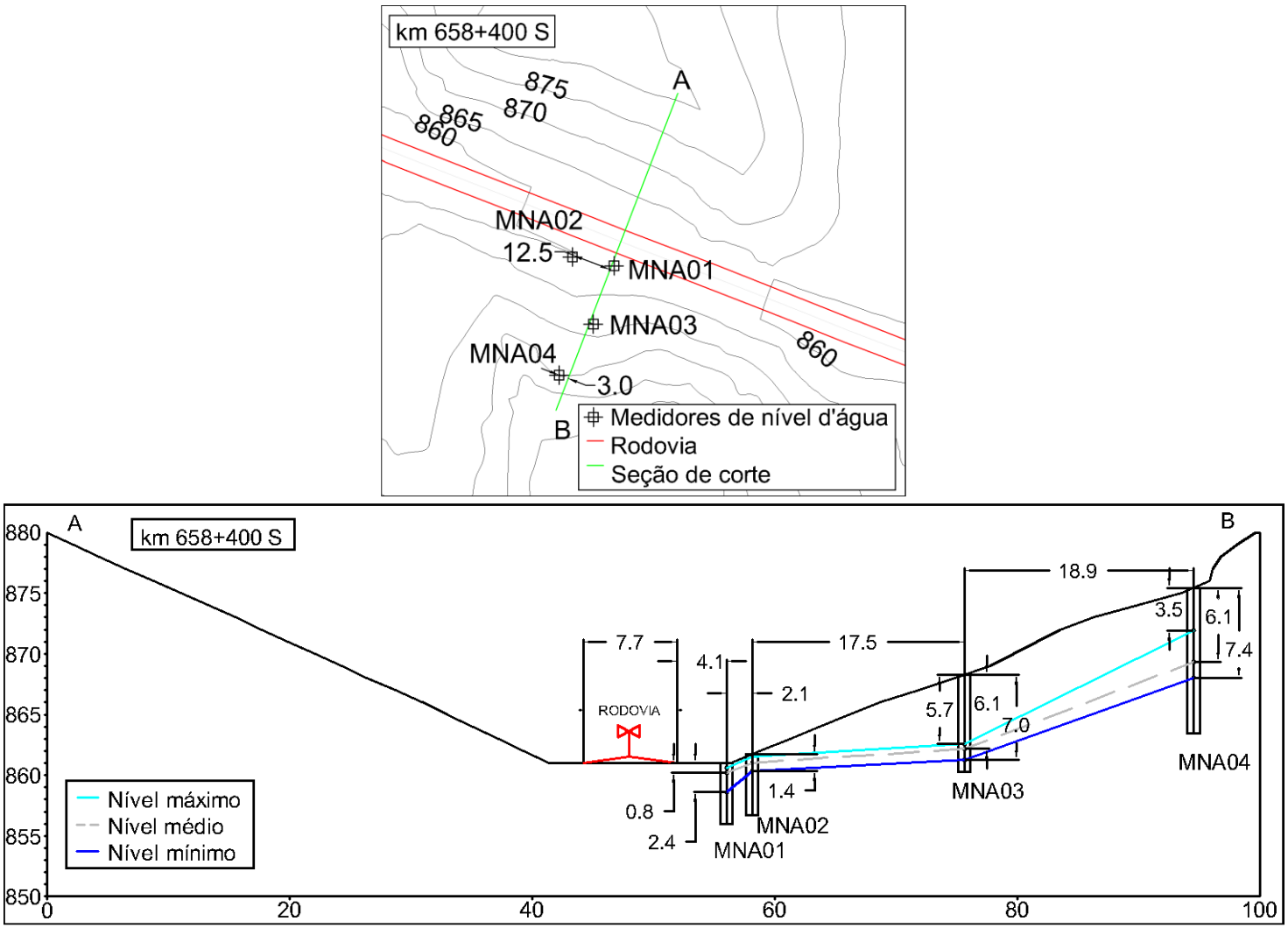
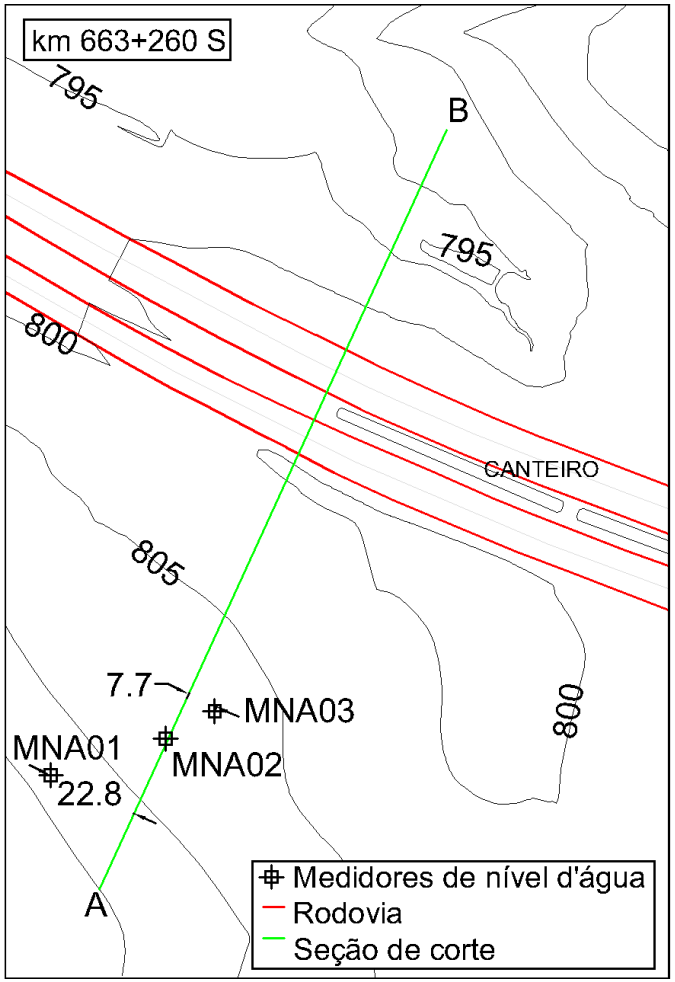


Figura 13 - Planta (acima) e seção (abaixo) dos medidores de nível d'água instalados no km 658+400 m


km 663+260 S
795
B
795
800
CANTEIRO
805
7.7
MNA03
MNA01
MNA02
22.8
800
A
Medidores de nível d'água
Rodovia
Seção de corte

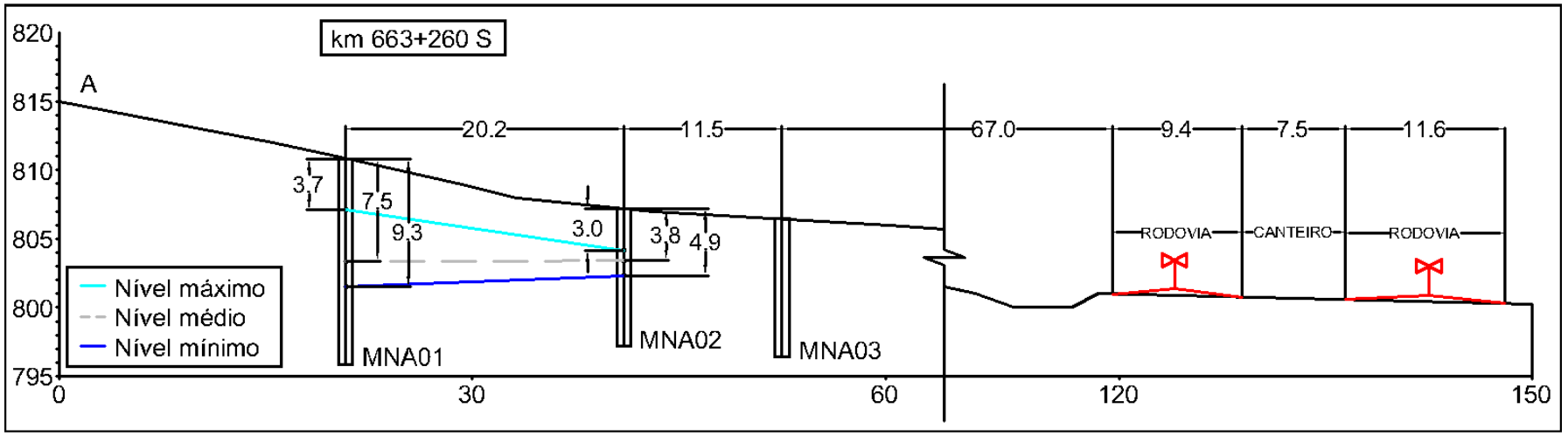


Figura 14 - Planta (acima) e seção (abaixo) dos medidores de nível d'água instalados no km 663+260 m

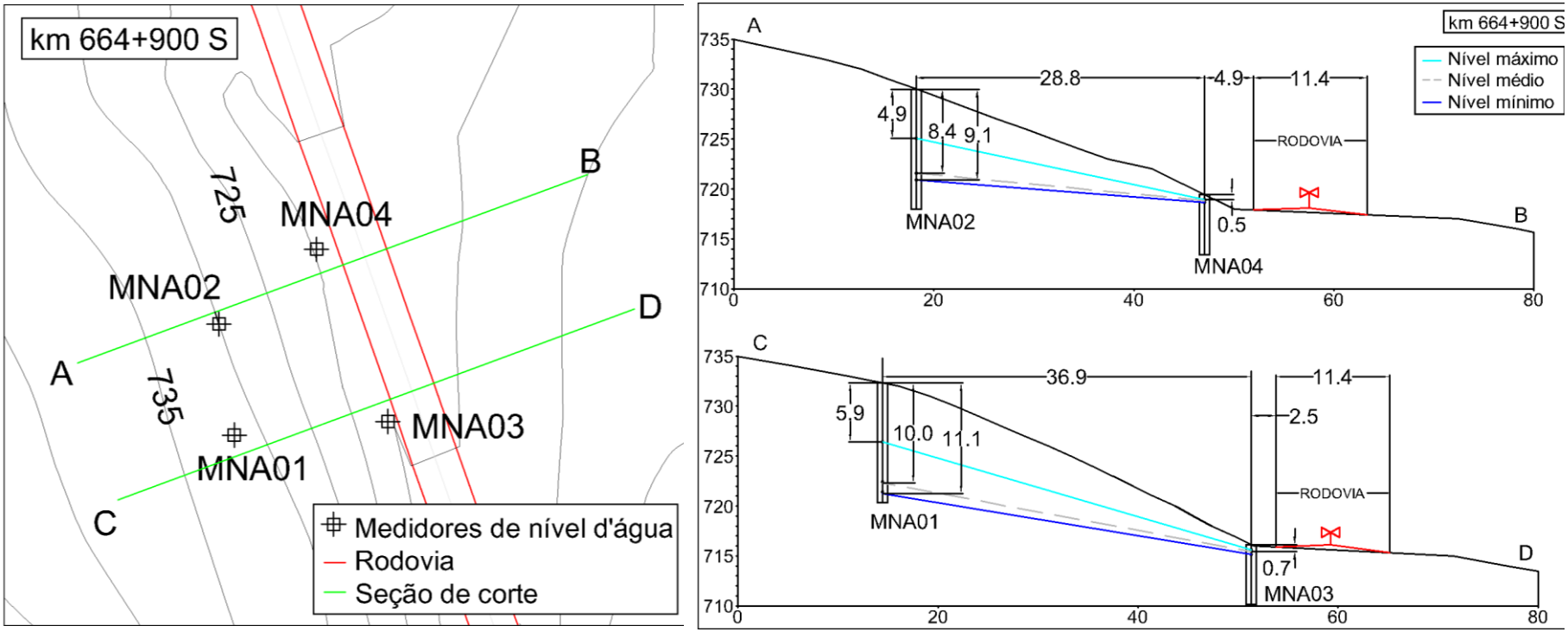


Figura 15 - Planta (à esquerda) e seções (à direita) dos medidores de nível d'água instalados no km 664+900 m

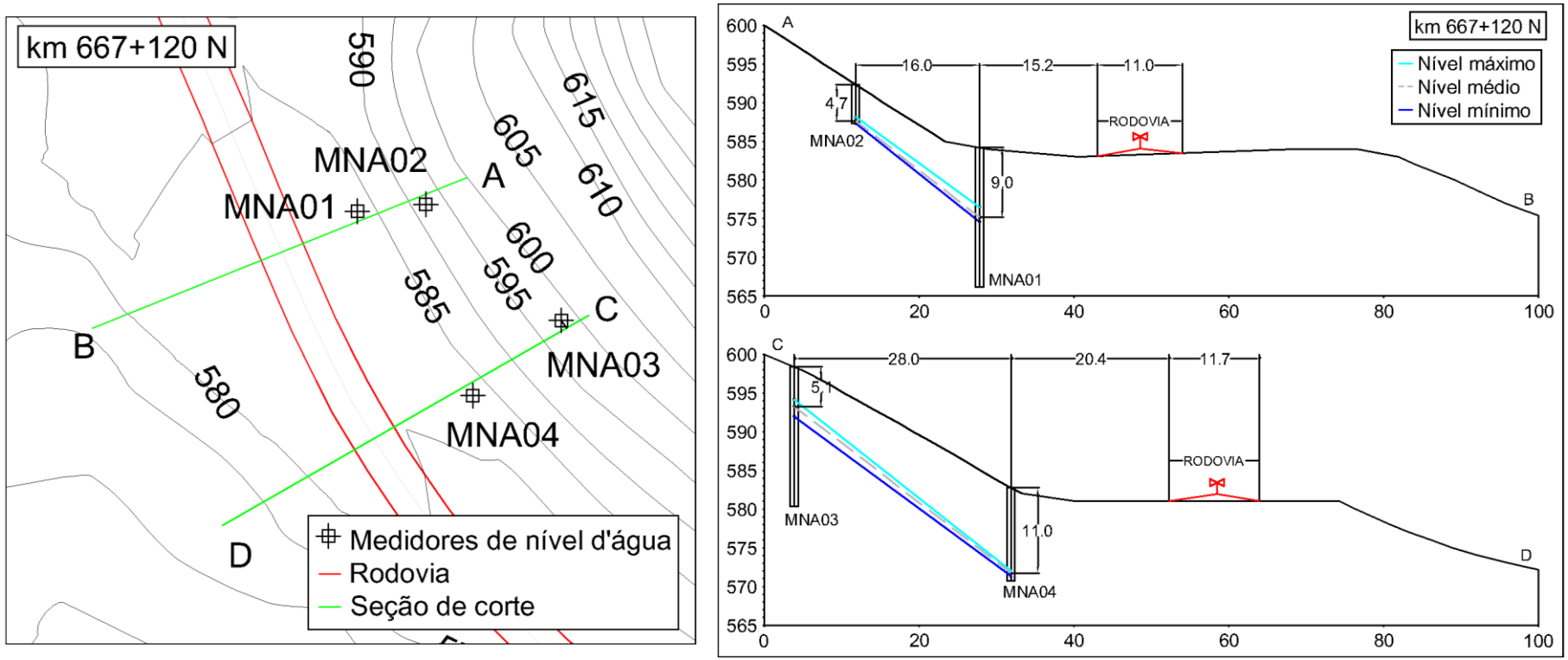


Figura 16 - Planta (à esquerda) e seções (à direita) dos medidores de nível d'água instalados no km 667+120 m

Nas Figuras 17 a 22 são apresentados os gráficos dos dados provenientes dos medidores de nível d'água em conjunto com as precipitações registradas pelos pluviógrafos P1, P2 e P4.

Os medidores localizados no km 657+450 m apresentaram variações de nível d'água ao longo de toda série histórica, principalmente quando comparados com os medidores localizados nos km 658+400 m, km 664+900 m e km 667+120 m. Durante o período de janeiro de 2017 a dezembro de 2018 foram observados três picos de elevação (2 a 5 metros) do nível d'água entre os meses de fevereiro e março e durante o mês de novembro de 2018. De março a outubro de 2018 o nível d'água em todos os medidores diminuiu de 4 para 6 metros ao longo do tempo. Este rebaixamento do lençol freático (aumento da profundidade) foi coincidente com a redução do volume precipitado nestes meses.

No km 658+400 m, os medidores MNA-01, MNA-02 e MNA-03 não apresentaram uma variação do nível d'água significativa e mantiveram-se constantes em torno de 1,5 m, 0,5 m e 6,0 m de profundidade (MNA-01, MNA-02 e MNA-03, respectivamente). Já o medidor MNA-04 durante o ano de 2017 apresentou nível d'água constante em 7 m. No início do ano de 2018, contudo, o medidor MNA-04 registrou uma variação de nível d'água da ordem de 3 metros, em um período onde as precipitações diárias registradas eram de aproximadamente 60 mm. Após estes eventos, em um período com precipitações diárias mais baixas (da ordem de 25 mm), o nível d'água voltou a ficar constante em 7,4 metros de profundidade até o final do ano.

O medidor MNA-02 do km 663+260 m apresentou variação do nível d'água máxima de 2 metros desde janeiro de 2017 e no ano de 2018 de aproximadamente 1 metro. Já o medidor MNA-01 apresentou maiores variações do lençol freático ao longo de toda série histórica dos dados, atingindo 6 metros de profundidade. Entre janeiro de 2017 e dezembro de 2018 o medidor MNA-02 registrou leituras entre 3,5 metros e 9 metros de profundidade.

No km 664+900 m, o nível d'água não foi identificado entre os meses de agosto de 2017 a março de 2018 no medidor MNA-01. Nos demais meses, neste instrumento, assim como no medidor MNA-02, o lençol freático não apresentou variações significativas (1 metro), sendo registrado em torno de 10,5 metros e 8,5 metros, respectivamente. É possível notar que, para o mesmo período, a variação do lençol freático para ambos medidores acompanhou os registros de precipitação acumulada diária registrada pelo pluviógrafo correspondente. O lençol freático nos medidores MNA-03 e MNA-04 não apresentou variações significativas, sendo registrado em torno de 1 metro de profundidade.

No km 667+120 m, os medidores MNA-02 e MNA-04 se apresentaram secos desde outubro de 2017. O medidor MNA-04 registrou uma leitura de nível d'água em novembro de 2018 em 11,4 metros de profundidade. Entre janeiro de 2017 e dezembro de 2018 o lençol freático nos medidores MNA-01 e MNA-03 foi identificado em maiores profundidades, com variações em torno de 1,5 metros que podem ser associadas aos períodos com menores registros de precipitação acumulada diária, em geral menor do que 30 mm.

O lençol freático registrado nos medidores MNA-01 e MNA-02 do km 672+400 m apresentou comportamento semelhante de janeiro de 2017 a dezembro de 2018, sob influência das precipitações registradas, com uma variação de aproximadamente 2 metros e profundidade em torno de 4 a 6 metros.

As análises dos medidores de nível d'água indicaram, no geral, uma baixa variação da profundidade do lençol freático nos taludes localizados ao longo da BR-376/PR. Este comportamento já foi observado e descrito por Wolle e Carvalho (1989, *apud* Victorino, 2015) para as encostas da Serra do Mar do estado de São Paulo. Sestrem *et al*. (2015) também descreveram um comportamento semelhante para as variações de nível d'água no Morro do Boi, relacionando à ausência das grandes variações do lençol freático com a ocorrência de famílias de fraturas no substrato rochoso, que são responsáveis pela permeabilidade secundária e controlam o nível do lençol freático nesta encosta.

Outros trabalhos também destacam o controle do fluxo de água por meio da presença de estruturas geológicas: Silva *et al*. (2016) relatam em seu trabalho que para a Região da Serra do Mar no estado do Rio de Janeiro, município de Nova Friburgo, ocorre percolação de água em fraturas de alívio e estágios avançados de intemperização, indicando que a estrutura do embasamento rochoso afeta as condições hidrológicas da encosta estudada. Neste estudo também foram identificadas fraturas tectônicas e saídas de água freática no afloramento avaliado, sendo comprovadas ainda por meio de amostras de rochas obtidas por meio de sondagens rotativas que evidenciaram o comportamento das famílias de fraturas como condutoras de água. Os autores também destacam outros trabalhos que abordam a influência das fraturas no fluxo da água em subsuperfície (Avelar e Coelho-Netto, 1992; Haught e Tromp-van Meerveld, 2011; Brönnimann *et al*., 2013). Gabrielli *et al*. (2012) também constatou que zonas fortemente fraturadas localizadas até 2 metros abaixo da interface solo-rocha influenciavam na condução de fluxos laterais rápidos (Silva *et al*., 2016).

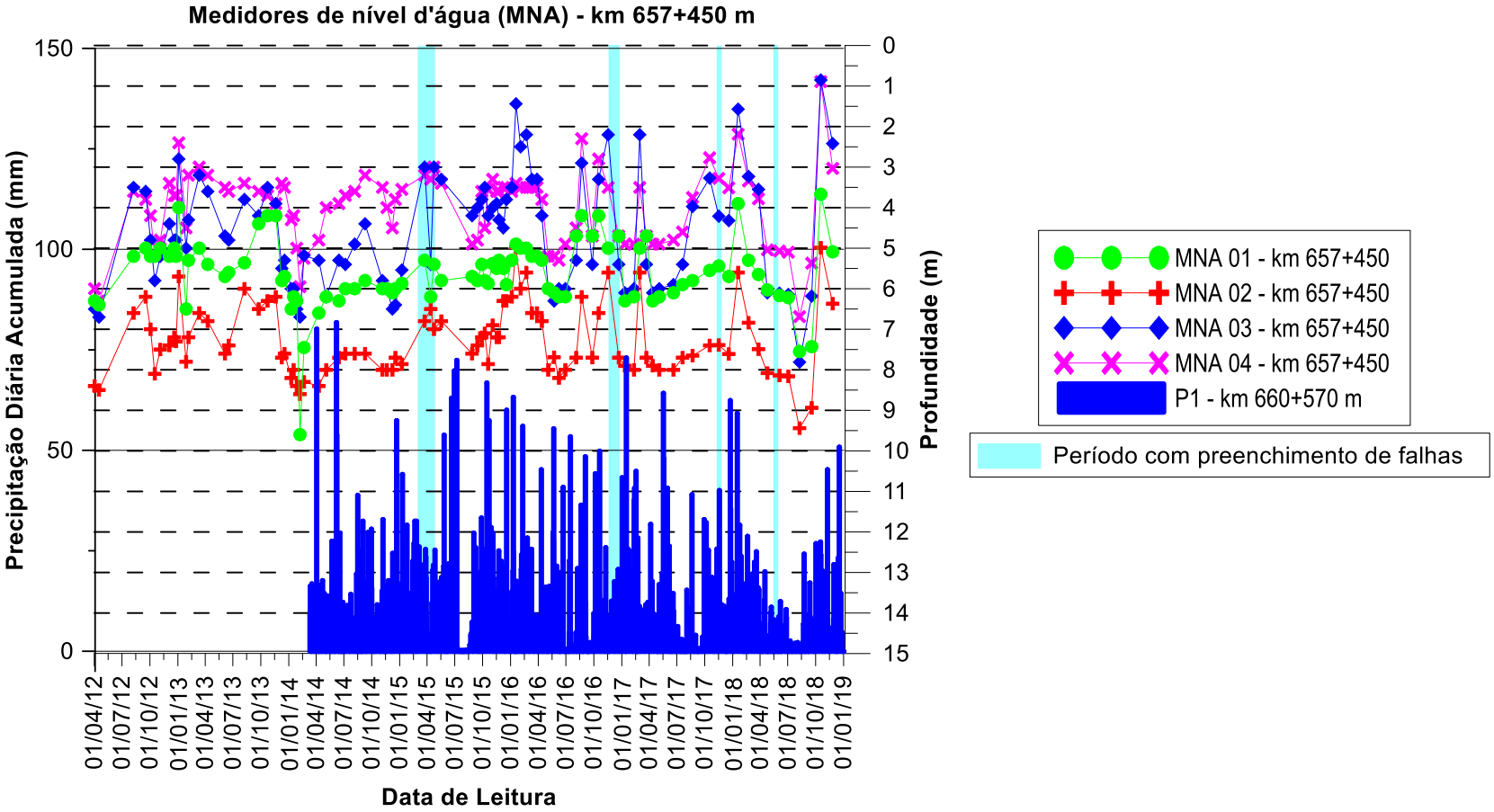


Figura 17 - Dados dos medidores de nível d'água do km 657+450 m e precipitação com preenchimento das falhas

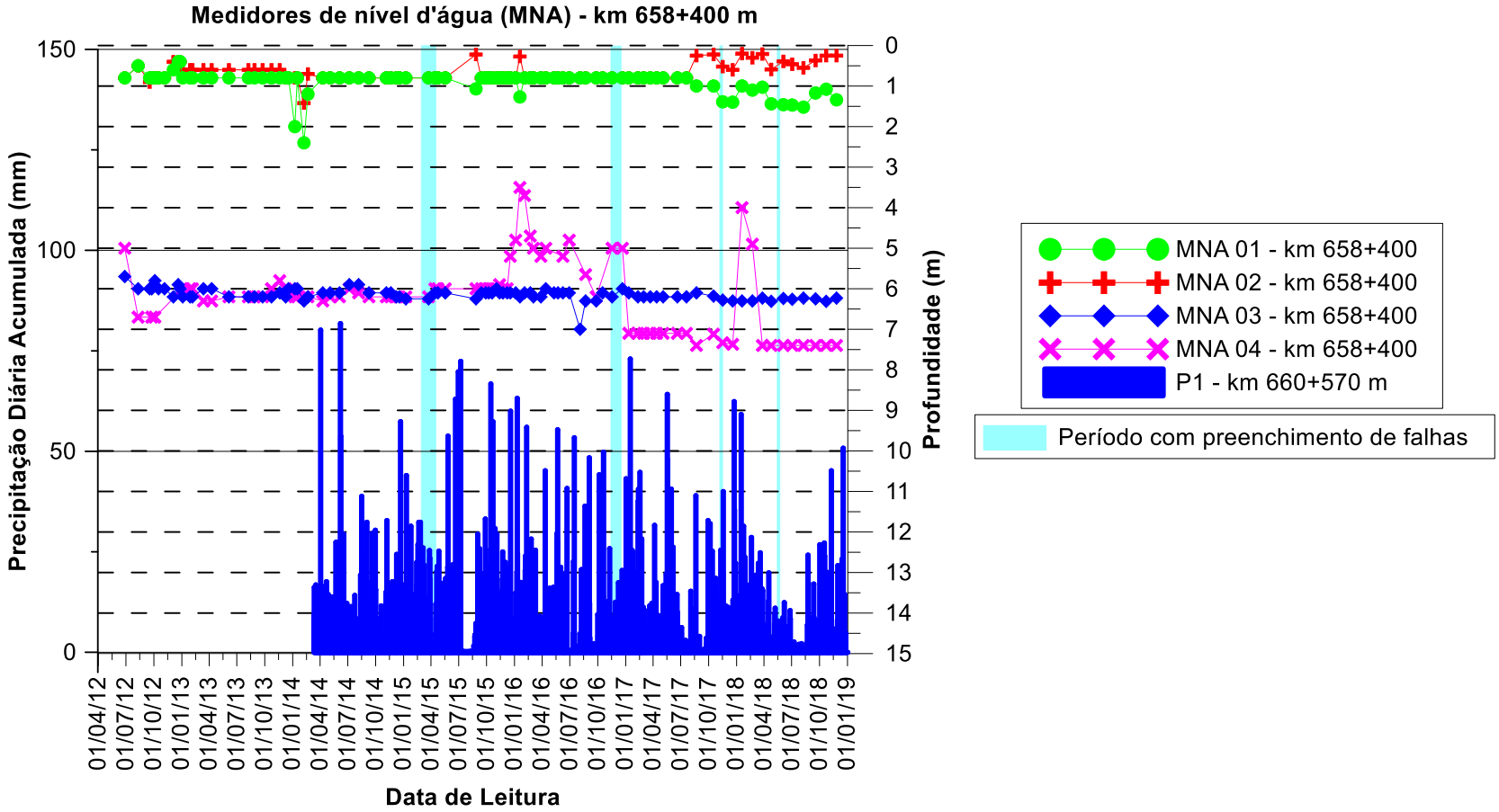


Figura 18 - Dados dos medidores de nível d'água do km 658+400 m e precipitação com preenchimento das falhas

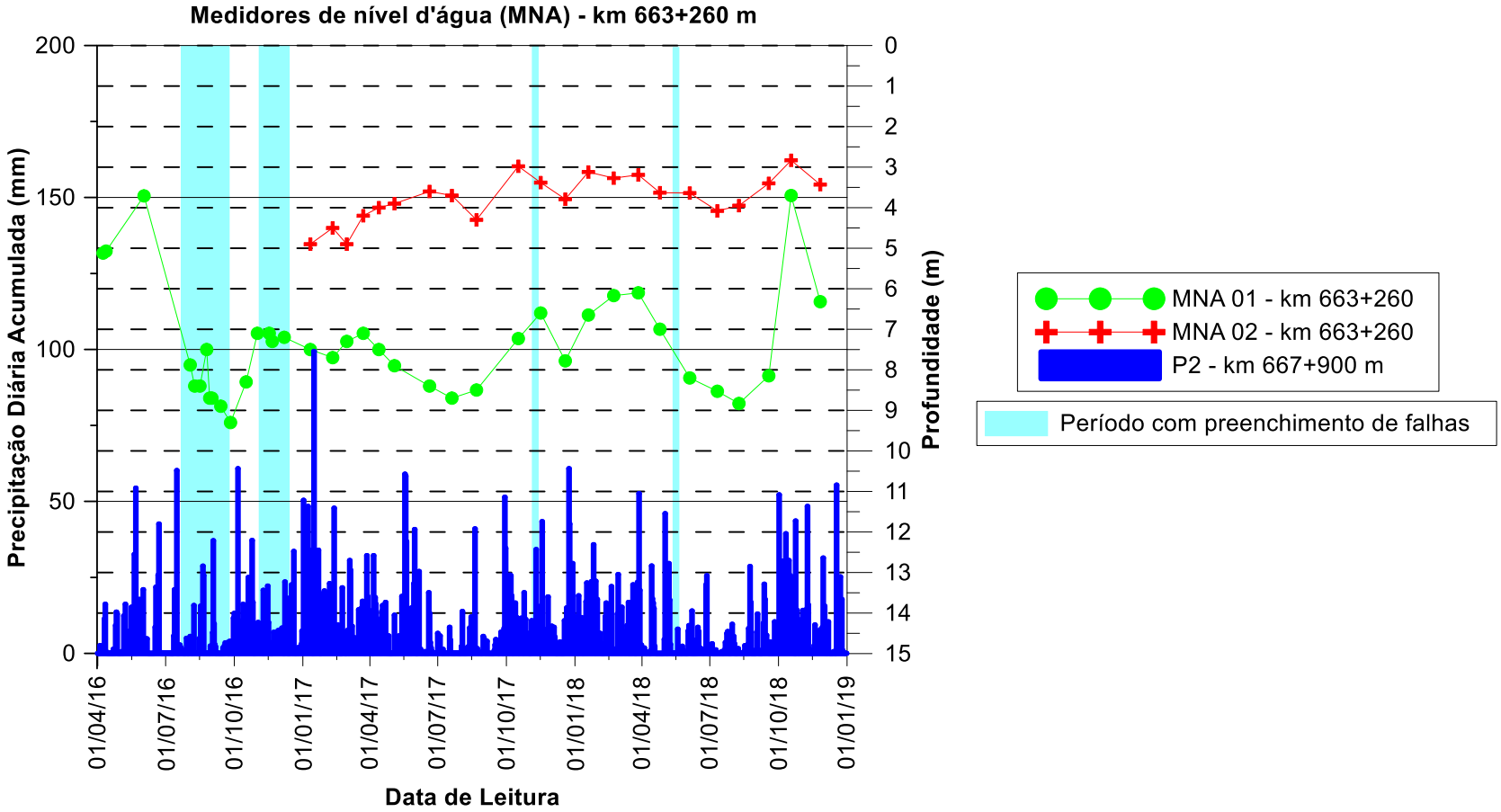


Figura 19 - Dados dos medidores de nível d'água do km 663+260 m e precipitação com preenchimento das falhas

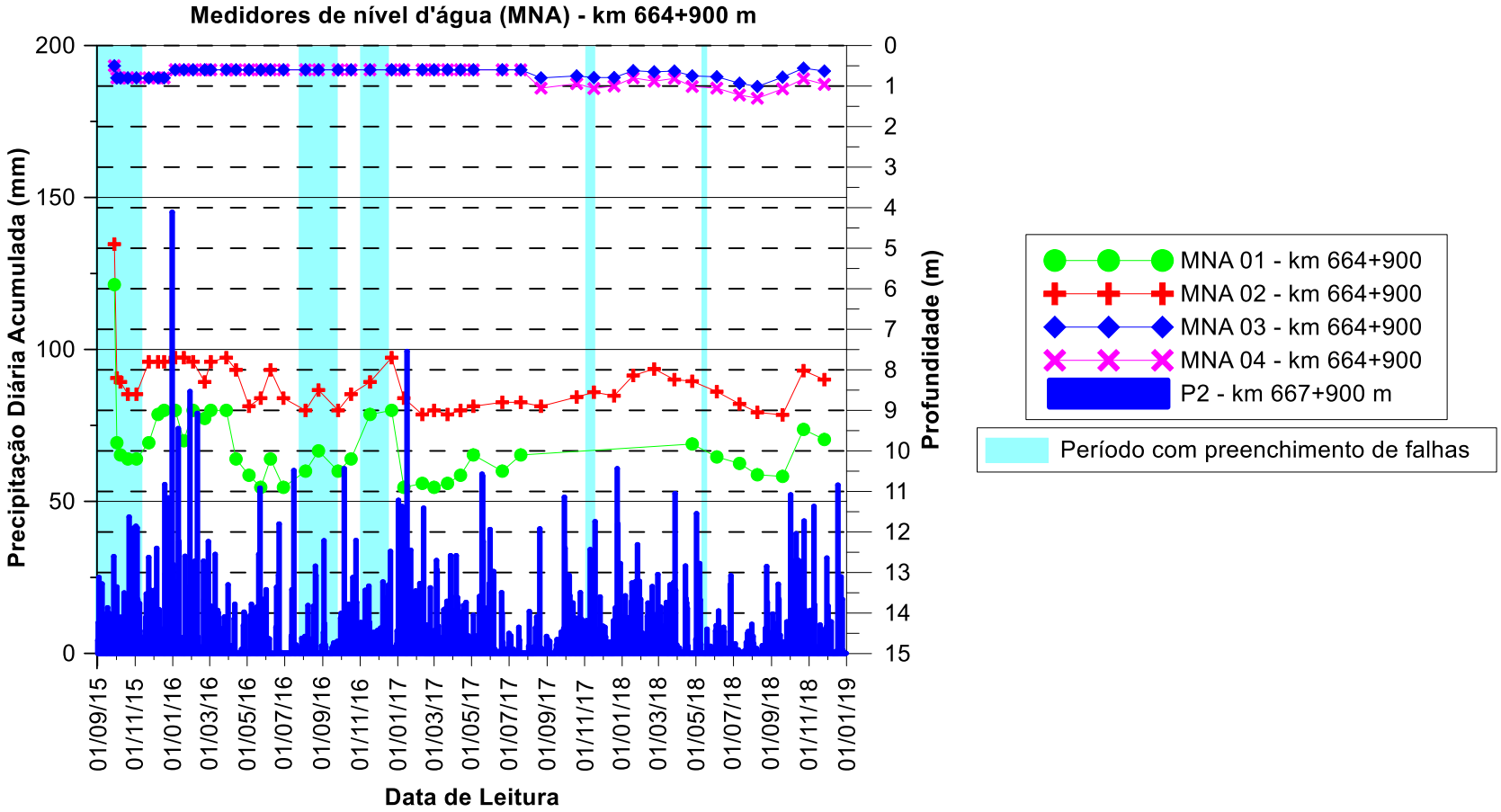


Figura 20 - Dados dos medidores de nível d'água do km 664+900 m e precipitação com preenchimento das falhas

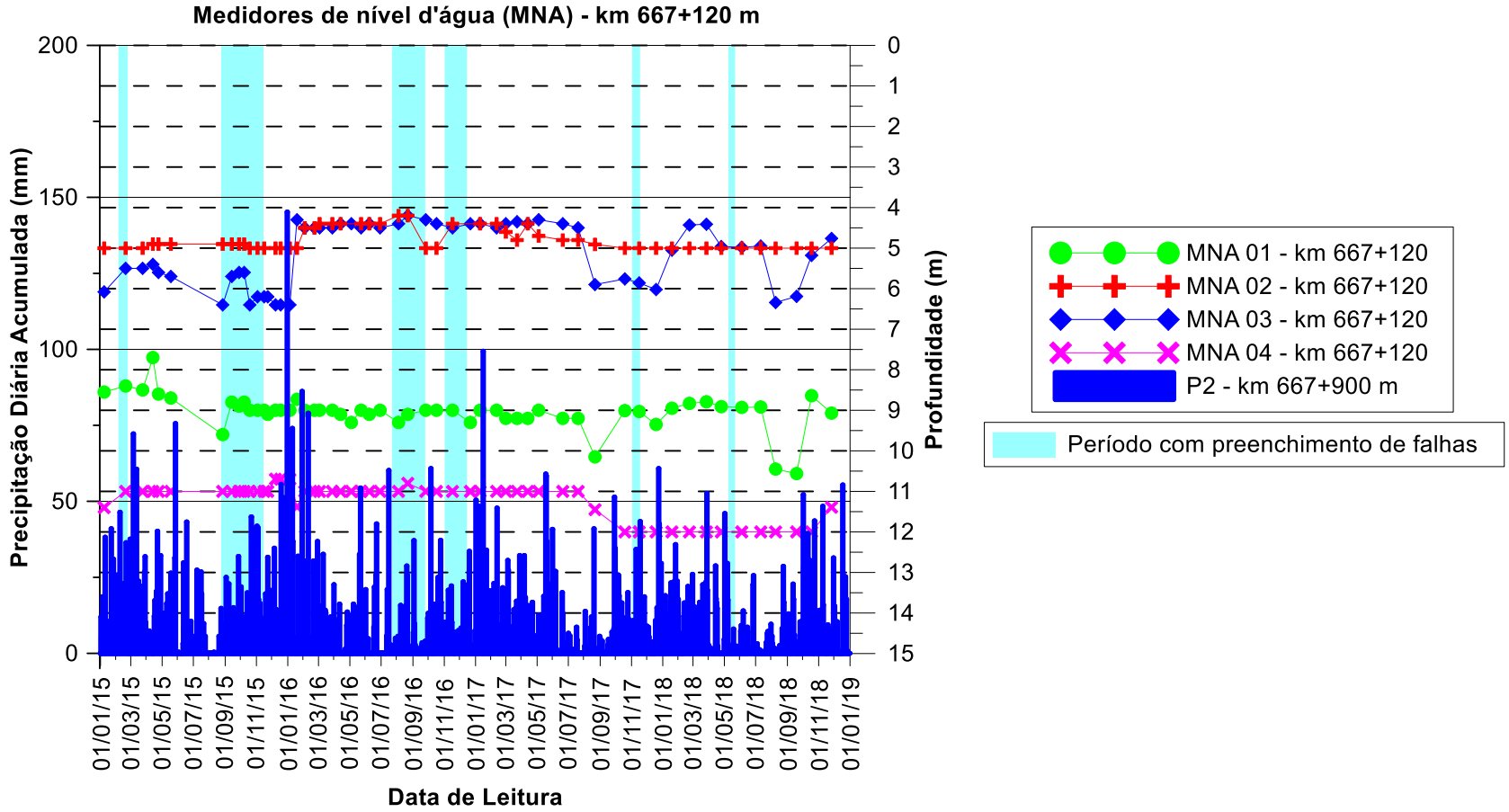


Figura 21 - Dados dos medidores de nível d'água do km 667+120 m e precipitação com preenchimento das falhas

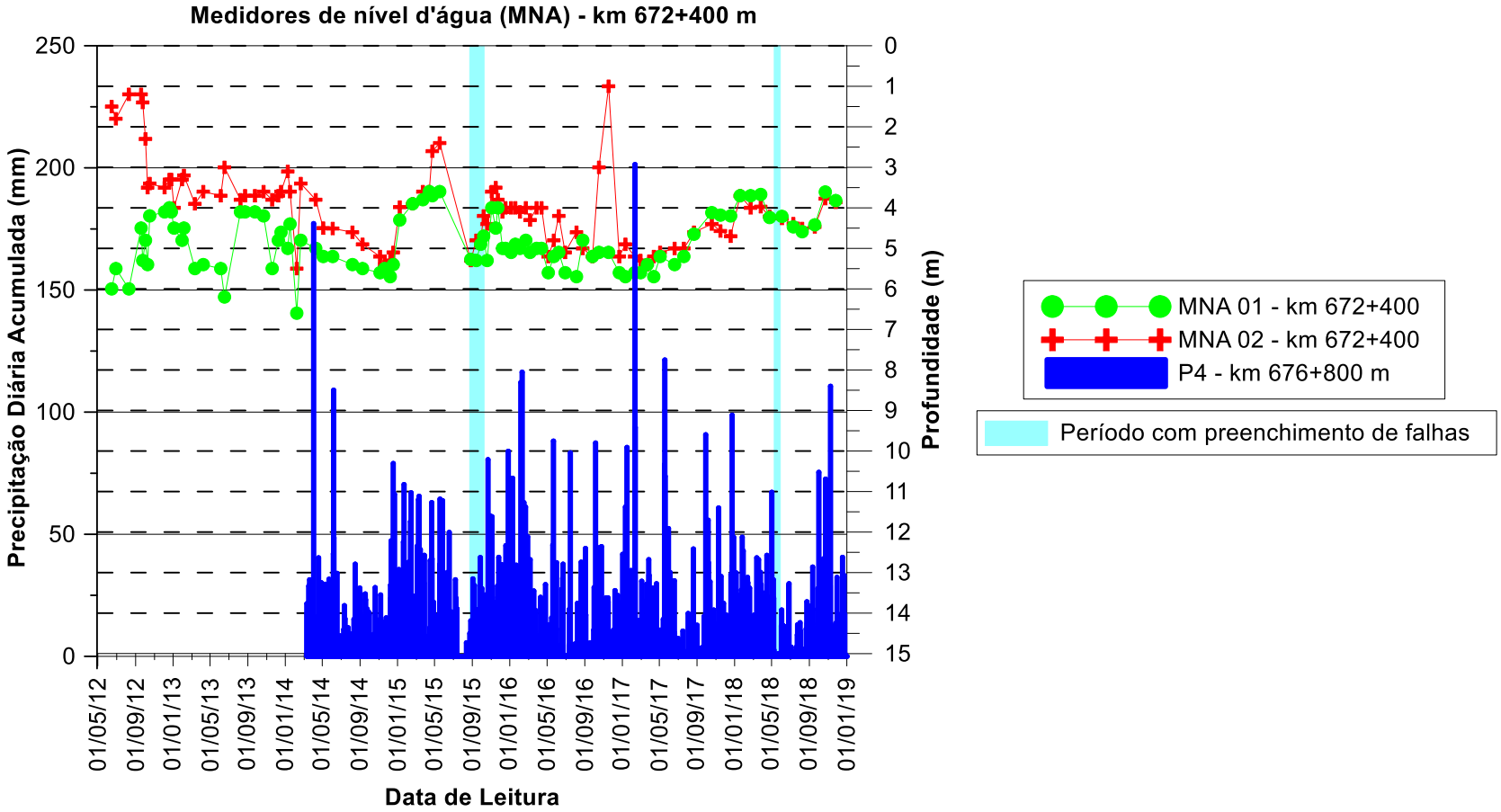


Figura 22 - Dados dos medidores de nível d'água do km 672+400 m e precipitação com preenchimento das falhas

6.2.1.3 Tensiômetros

O monitoramento proposto para a BR-376/PR envolveu ainda quatro tensiômetros instalados em dois locais, conforme apresentado na Tabela 10 e no mapa da Figura 23.

Tabela 10 - Distribuição e profundidade de instalação dos tensiômetros

Ponto de Instalação	Tensiômetro	Profundidade (m)
P2 (km 667+900 Norte)	TENS-01	1,50 m
	TENS-02	3,00 m
P6 (km 662+000 Sul)	TENS-03	1,50 m
	TENS-04	3,00 m

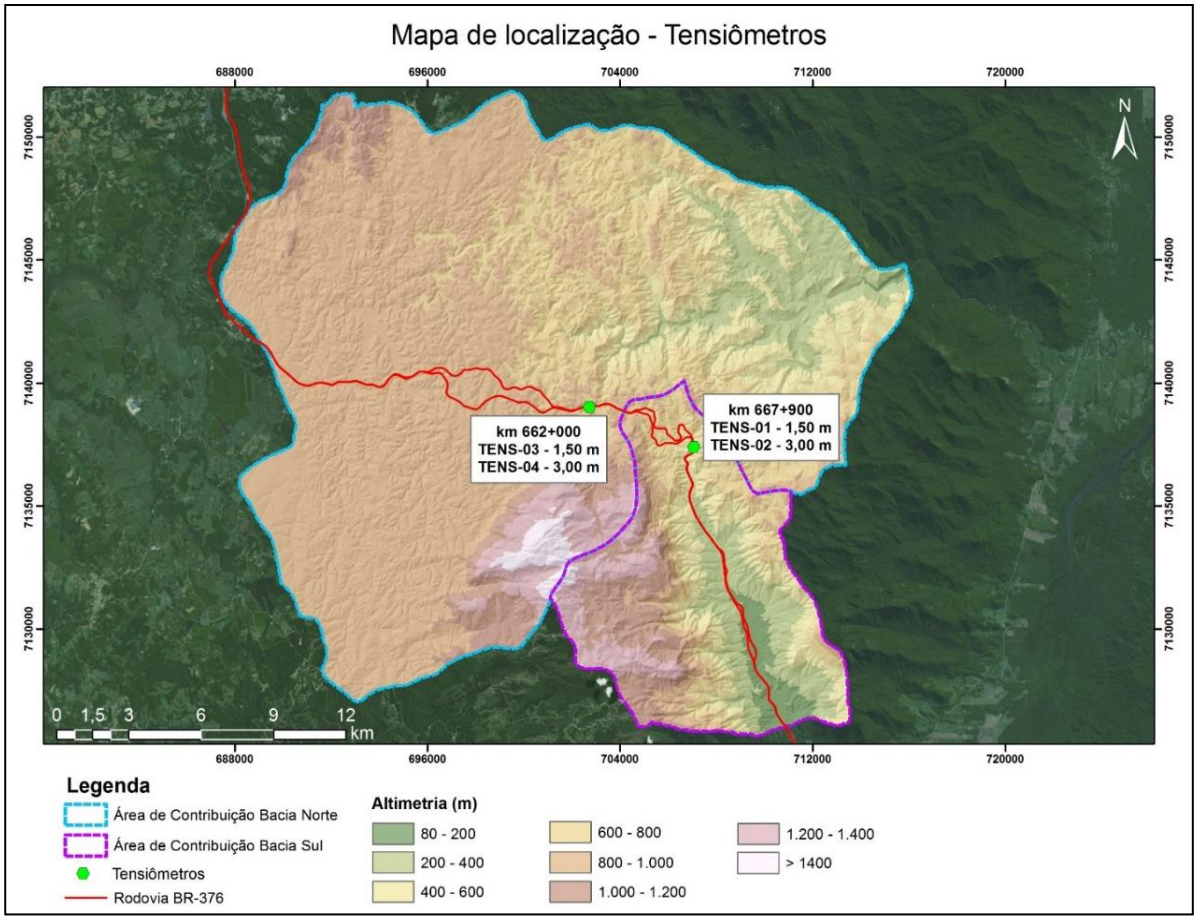


Figura 23 - Localização dos tensiômetros ao longo da BR-376

Durante o período de desenvolvimento desta pesquisa, observou-se que os tensiômetros apresentaram variações excessivas dos valores de sucção em curtos intervalos de tempo, além da ausência da sazonalidade dos dados e de uma correlação coerente com a precipitação diária acumulada, como pode ser observado no Apêndice 2.

Desta forma, optou-se pela retirada de componentes dos mesmos para efetuar, em laboratório, procedimentos de calibração.

No dia 25 de setembro de 2017 no km 662+000 m foram retirados de campo dois transdutores, dois manômetros e um *datalogger*. Já no km 667+900 m retiraram-se apenas dois transdutores e dois manômetros, pois como o mesmo *datalogger* poderia ser utilizado na calibração dos equipamentos, optou-se por manter o outro em campo permitindo a continuidade das leituras do pluviógrafo P2.

Diversos ensaios/testes foram realizados nos dias 25/09/2017, 09/10/2017, 19/10/2017, 20/10/2017, 25/10/2017, 07/11/2017 e 08/11/2017 cujos objetivos são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Ensaios para calibração dos componentes dos tensiômetros

Data	Local	Atividade
27/09/17	SIMEPAR	Verificação das condições de funcionamento dos transdutores e manômetros
09/10/17	UFPR	Verificação da condição de funcionamento do *datalogger*
19 e 20/10/17	UFPR	Verificação dos registros em outras portas do *datalogger*
25/10/17	EMPRESA ESPECIALIZADA	Testes com fonte (simulação do sensor) e testes com *datalogger* da empresa especializada
07 e 08/11/17	UFPR	Verificação das condições de funcionamento dos *dataloggers* dos pontos P2 e P6

Em todos os ensaios buscou-se reproduzir o processo de obtenção dos dados realizado em campo. A sucção presente nos poros do solo foi simulada por meio de uma bomba à vácuo, com aplicação de vácuo em mmHg, devidamente calibrada e conectada ao tensiômetro. Para permitir a conexão dos transdutores de cada tensiômetro com o *datalogger* (registro dos dados) e com a bateria (alimentação do sistema), foram elaborados cabos conectores com resistores acoplados de 75 Ω. Os valores de tensão dados pelos transdutores foram medidos por meio de um multímetro, em mV e, ainda, eram lidos nos manômetros os valores de sucção em kPa. Foi utilizada uma bateria com 12 V e aproximadamente 25 A para alimentação do sistema. A Figura 24 apresenta todos os componentes utilizados nos ensaios de laboratório.



Figura 24 - Ensaio de calibração dos tensiômetros em laboratório

O *datalogger* utilizado no teste possuía cinco portas de entrada e uma de comunicação com o *software* ECH2O *Utility* instalado no computador para transmissão dos dados. Desta forma, nos testes correspondentes à verificação do *datalogger* analisou-se também a condição de funcionamento em mais de uma porta. A leitura dos dados registrados pelo *datalogger* se sucedeu de duas formas. No computador, leram-se os dados pela ferramenta “scan” do *software*, a qual apresenta imediatamente o valor obtido no momento em que é acionada. Além disso, também foi feito o *download* dos mesmos.

Por meio destas análises realizadas em laboratório foi possível verificar que os transdutores estavam funcionando de forma coerente com a calibração apontada no manual do equipamento e que todos os quatro manômetros apresentavam problemas, como travamento ou quebra do ponteiro. O *datalogger* utilizado apresentou leituras inconsistentes e sem relação com a mudança de pressões de vácuo aplicadas, como pode ser observado, por exemplo, na Figura 25, para análises da porta P1 com sucções aplicadas de 0 kPa, 27 kPa e 80 kPa.

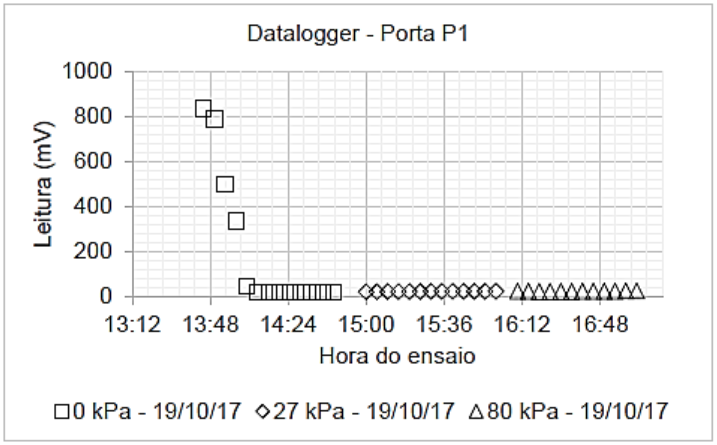


Figura 25 - Leituras dos ensaios com tensiômetro TENS-02

Com base nos resultados apresentados pelo *datalogger* do km 662+000 m nos primeiros ensaios, optou-se pela retirada e posterior realização de ensaios de calibração com o *datalogger* localizado no km 667+900 m, que apresentou comportamento semelhante ao anterior, ou seja, não respondeu às pressões de vácuo aplicadas.

Desta forma, ao ser verificada a inconsistência dos dados registrados pelos *dataloggers* nas leituras dos tensiômetros, optou-se pela substituição dos mesmos nos km 662+000 (P6) e km 667+900 (P2), por estes serem os únicos conectados à tensiômetros em campo, (procedimento indicado com uma linha tracejada nas Figuras do Apêndice 3 e 4). Os equipamentos existentes nos outros pontos não foram modificados pois os mesmos apresentaram bom funcionamento e consistência nos dados quando conectados somente a pluviógrafos. Além disso, foram adquiridos novos manômetros para os tensiômetros.

As Figuras dos Apêndices 3 e 4 apresentam os registros de toda a série histórica dos dados, incluindo os períodos com antigos e novos *dataloggers*. Dessa forma, foi possível estabelecer comparativamente a relação entre os registros provenientes dos dois sensores. Apesar da pequena série histórica de dados após a substituição dos mesmos, foi possível observar que os registros atuais se mostraram mais uniformes e relativamente diferentes dos obtidos anteriormente.

Buscando-se avaliar o correto funcionamento e registro dos dados após a troca dos *dataloggers*, analisou-se para um mesmo período (início do mês de novembro até o início do mês de fevereiro do ano subsequente), em diferentes anos, os registros dos dados dos tensiômetros TENS-01, TENS-02 e TENS-03 (Figura 26).

Verifica-se que para o TENS-01, os dados registrados com o novo *datalogger* (verde) apresentaram comportamento semelhante ao anteriormente registrado no período do final do ano de 2015 e início de 2016 (azul), período anterior aos registros incoerentes (vermelho) observados. Para o TENS-02 foi possível identificar o mesmo comportamento, com apenas um aumento dos valores de sucção registrados entre 2015-2016 e 2017-2018. Por fim, para o TENS-03, a redução da variação das poropressões descrita após a troca do *datalogger* não ficou evidente como para os outros equipamentos, pois no período de novembro a fevereiro de 2016-2017 os dados deste equipamento não se mostraram incoerentes como para os tensiômetros TENS-01 e TENS-02. De qualquer forma, optou-se pela sua substituição buscando prevenir problemas futuros.

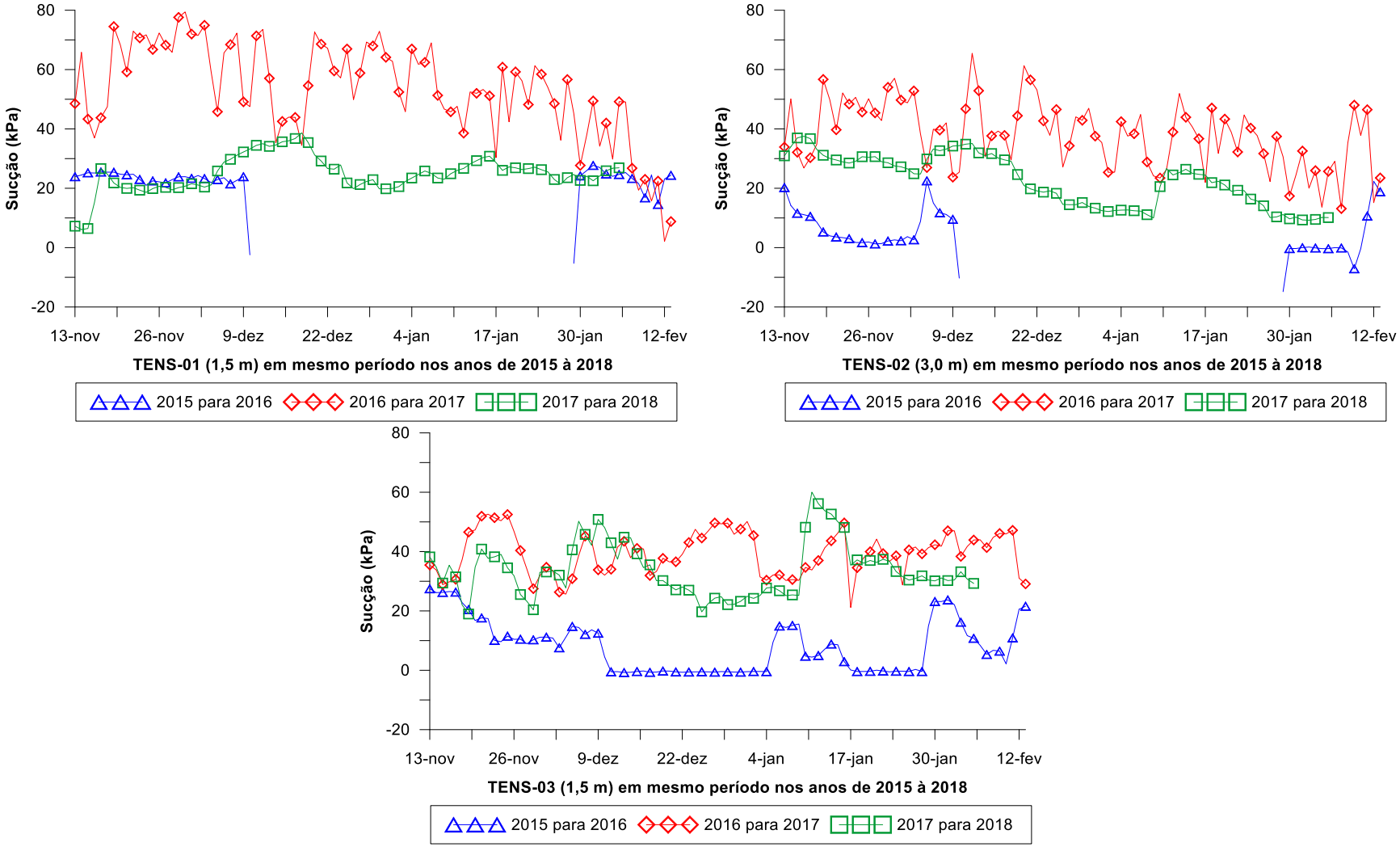


Figura 26 - Registros de poropressão para os tensiômetros TENS-01, TENS-02 e TENS-03, para um mesmo período em diferentes anos

Conforme a Tabela 1, os tensiômetros TENS-03 e TENS-04 ficaram temporariamente inoperantes por alguns meses. O tensiômetro TENS-03 foi reinstalado em campo no dia 2 de outubro de 2018 (Figura 27) após aquisição de novos componentes como tubo, pedra porosa e reservatório de água. Tal equipamento retomou a transmissão dos dados remotamente no dia 15 de outubro de 2018. A reinstalação do tensiômetro TENS-04 depende da aquisição de um novo conjunto de sensores visto que os antigos foram vandalizados.



Figura 27 - Reinstalação tensiômetro TENS-03 e localização

A Figura 28 apresenta os registros de sucção obtidos após a troca do *datalogger*. Durante o período em análise, notou-se que os picos de sucção apresentados pelos tensiômetros TENS-02 e TENS-03 eram coincidentes com as datas de realização das campanhas de campo para coleta de dados e preenchimento do tubo (10/01, 16/02, 05/03, 02/04, 11/05, 07/06, 05/07, 01/08, 12/09, 05/10 e 12/12). Além disso, as planilhas de campo preenchidas nas visitas indicaram que o tubo dos tensiômetros encontrava-se vazio nessas mesmas datas. Ao ser identificado o tubo vazio, em campo, era realizado o preenchimento do mesmo com água por meio de um dispositivo acoplado ao tubo. Logo, foi considerado que os picos nos tensiômetros TENS-02 e TENS-03, principalmente, estavam relacionados com tal procedimento de preenchimento do tubo,

estando sua interpretação limitada por tais intervenções. Tal comportamento poderá ser confirmado/reavaliado com o aumento da série histórica de dados.

Com relação aos tensiômetros TENS-01 e TENS-02 sugere-se em etapas futuras da pesquisa a retirada dos equipamentos de campo, obtenção de novos componentes para posterior calibração em laboratório, seguindo os mesmos procedimentos adotados para a reinstalação do tensiômetro TENS-03. Os dados do tensiômetro TENS-01, apesar de não apresentarem picos de sucção devido aos procedimentos em campo também são influenciados pelos mesmos onde o tubo também se encontrou vazio na maior parte das campanhas de campo realizadas. Sugere-se, com isso sua retirada e calibração em conjunto com o tensiômetro TENS-02. Vale ressaltar a importância do acompanhamento do aumento da série histórica destes equipamentos.

O procedimento de retirada para posterior reinstalação dos tensiômetros se faz necessário, uma vez que a perda de água do tubo destes instrumentos pode estar associada com danos ao equipamento em campo, tanto do tubo como da pedra porosa ou, ainda, a uma possível influência externa como percolação de água onde o tubo está instalado. Com a reinstalação é possível verificar as condições das partes dos equipamentos e, se necessário, alocar o mesmo em um outro local onde não haja influências externas nos dados.

Ressalta-se que o tensiômetro é um equipamento que tem sido utilizado em diferentes áreas, como por exemplo agricultura, agronomia e hidrologia, sendo destacado em diferentes trabalhos por se apresentar como ferramenta eficiente na mensuração dos potencias de retenção de água no solo. Almeida *et al*. (2010) descrevem o tensiômetro como um instrumento de medida direta do potencial mátrico de água no solo que, embora apresente algumas limitações, tem demonstrado aplicação satisfatória na medida da energia da retenção da água pelas partículas sólidas do solo.

Sestrem e Kormann (2013) e Kormann *et al*. (2013) utilizaram tensiômetros para a obtenção de medidas de sucção no solo. Os autores descreveram que os equipamentos se mostraram como ótimas ferramentas para o monitoramento das

camadas não saturadas do solo, sendo que seus valores, neste trabalho, tiveram influência direta dos eventos pluviométricos também analisados pelos autores, com resultados de correlações diretas satisfatórias.

Coelho e Teixeira (2004) também trataram da corrente aplicação dos tensiômetros, destacando os que apresentam leitura automática como o tensímetro e o tensiômetro com transdutor, sendo o último semelhante ao utilizado neste projeto. Klute e Peters (1962) descreveram que o uso de transdutores de pressão para leituras em tensiômetros resulta no aumento da velocidade de resposta do equipamento. Towner (1982) também ressaltou que o registro automático das leituras obtidas pelos tensiômetros tornam o equipamento mais eficiente, contudo os autores afirmam que o tempo de resposta do equipamento é dependente da hidráulica do mesmo, ou seja, depende do tempo necessário para que a pressão dentro do tensiômetro entre em equilíbrio com a pressão do transdutor (Coelho e Teixeira, 2004).

Finalmente, ressalta-se que de acordo com Soil Moisture (2019) os tensiômetros são classificados como os instrumentos mais avançados e sensíveis disponíveis para o monitoramento em campo da umidade do solo, além de ser o único instrumento capaz de realizar a medição direta da sucção. Entre as aplicações do equipamento são listadas a identificação do nível do lençol freático, condições de umidade atípicas no perfil do solo e a presença de fluxo/infiltração de água na subsuperfície. Ainda, o modelo Jet Fill, representa o método de determinação mais direto e preciso das condições de umidade do solo em campo. Contudo, é importante destacar que a necessidade de verificação e preenchimento do tubo do equipamento em campo representam limitações quando o mesmo está instalado em locais onde não é possível realizar um acompanhamento mais frequente.

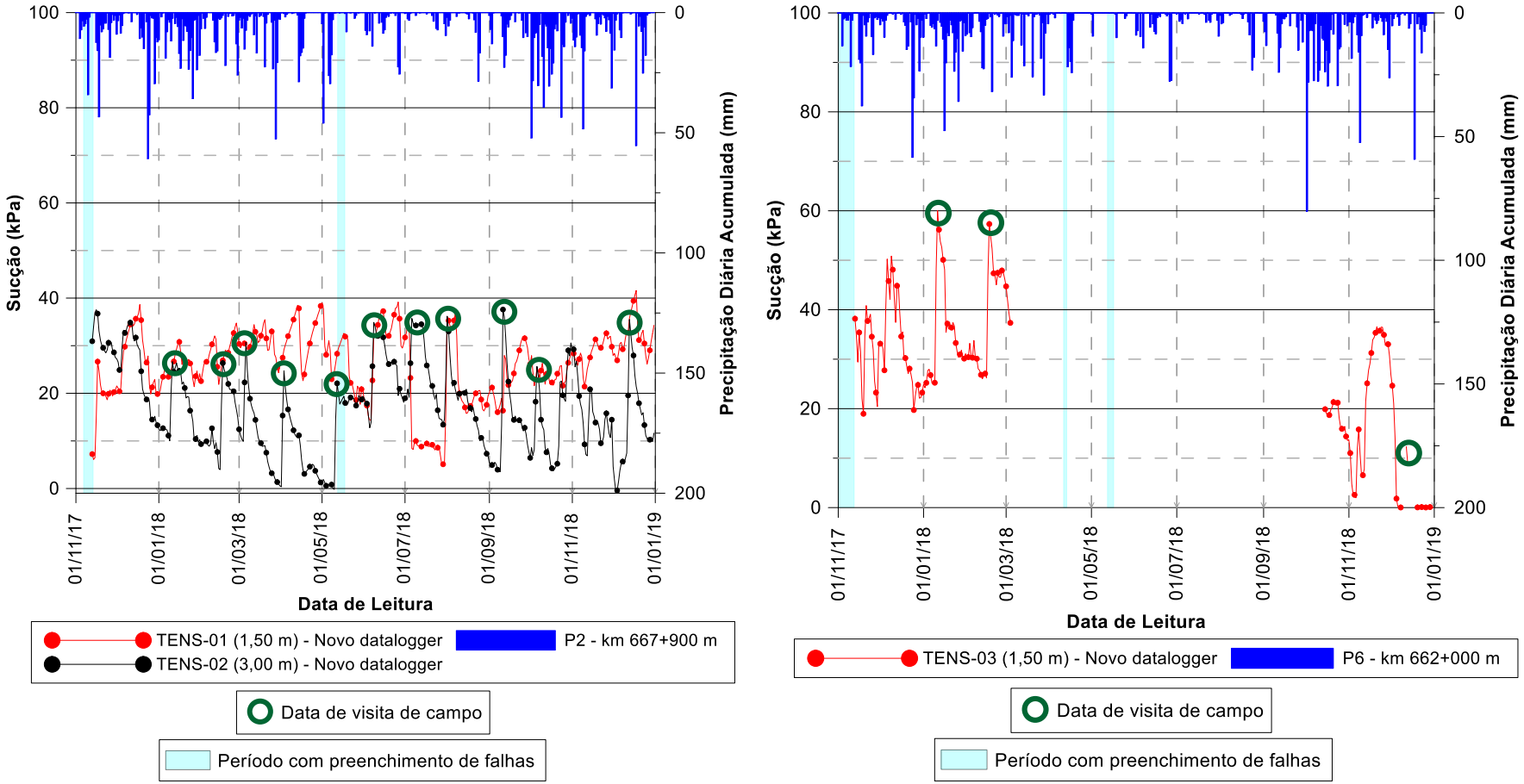


Figura 28 - Registros de sucção dos tensiômetros com novo *datalogger*

6.2.2 Monitoramento BR-101/SC

Para a BR-101/SC propôs-se a continuidade do monitoramento de aspectos geológico-geotécnicos, hidrológicos e ambientais por meio de um plano de instrumentação concebido e implantado para a encosta do km 140+700 m, situada em um maciço denominado Morro do Boi. As medições realizadas e processadas identificaram variações de poropressão, deslocamentos da massa de solo, deformações do sistema de contenção e eventos pluviométricos. A instalação dos instrumentos está ilustrada na Figura 29 e abrange três regiões do talude, sendo duas dentro da área do projeto de contenção e uma acima desta.

De maneira resumida, o plano de monitoramento pode ser classificado de acordo com as seguintes características:

- Medição do comportamento geotécnico da encosta por meio de piezômetros de corda vibrante (poropressões positivas e negativas), tensiômetros (poropressões negativas) e inclinômetros (deslocamentos horizontais);
- Medição de precipitação pluviométrica por meio de um pluviógrafo;
- Medição das cargas nos grampos ao longo da massa de solo reforçada, por meio de extensômetros elétricos (“*strain gages*”) ao longo do fuste e de células de carga na cabeça;
- Medição dos esforços e deslocamentos da tela metálica por meio de “*crackmeters*”.

O registro e armazenamento dessas leituras foram realizados por um *datalogger* principal, com um intervalo de leituras de uma hora. Em complemento a isso, realizaram-se leituras manuais de deslocamentos horizontais a partir dos furos de inclinômetros, além de leituras de nível d’água nestes furos e em um medidor de nível d’água tipo Casagrande. Nos itens subsequentes é apresentada a série histórica contendo as leituras desses instrumentos de janeiro de 2017 a dezembro de 2018.

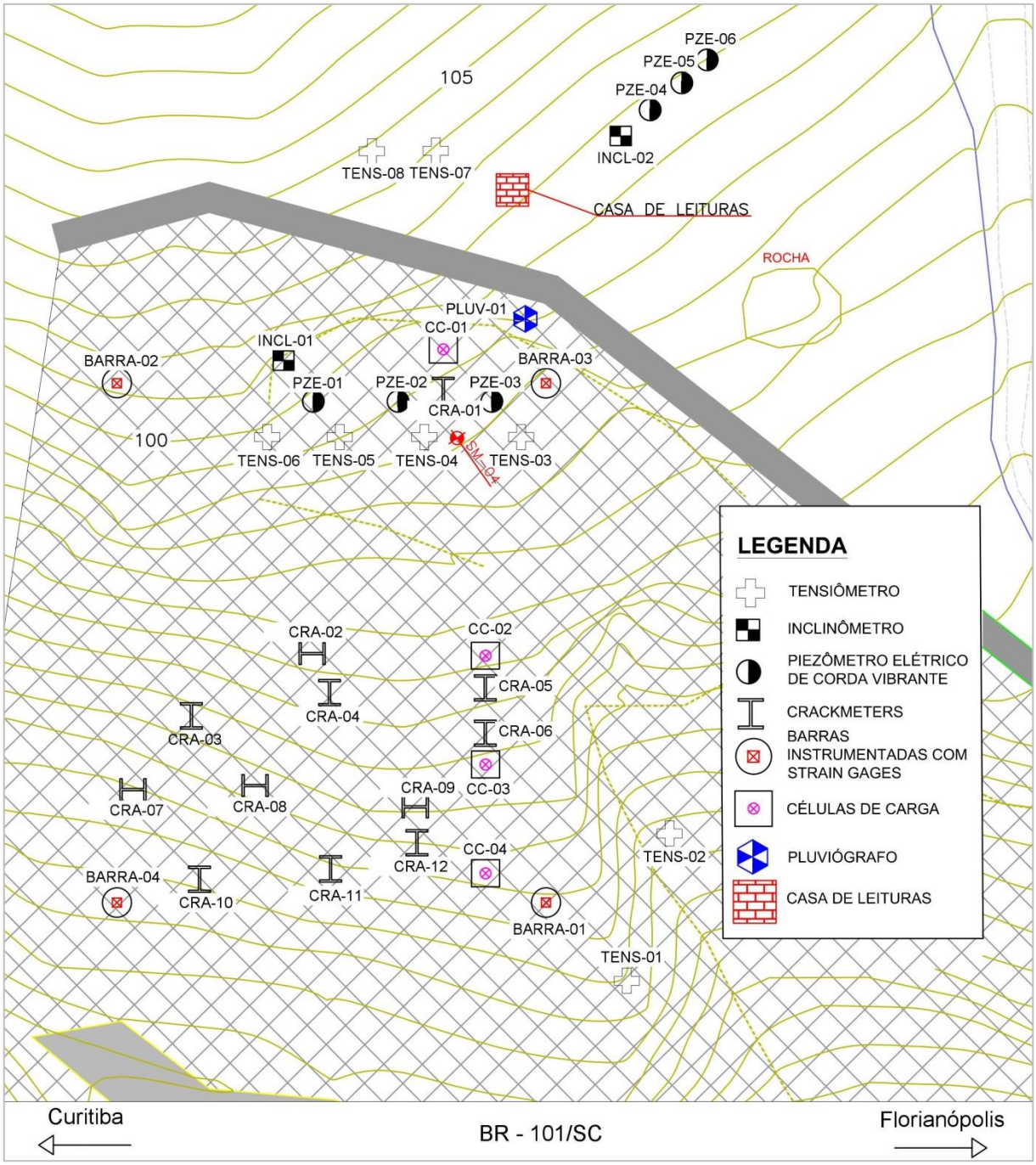


Figura 29 – Croqui de instalação dos instrumentos em planta no Morro do Boi

6.2.2.1 Pluviógrafo

De modo a aumentar o entendimento sobre o regime pluviométrico local, as precipitações foram registradas por meio de um pluviógrafo que realiza leituras a cada 0,20 mm de precipitação. O Apêndice 5 apresenta a série histórica completa desse instrumento, compreendendo o período desde 01/05/2012 até o dia 31/12/2018, enquanto a Figura 30 apresenta os dados registrados entre janeiro de 2017 e dezembro de 2018.

Em comparação com a série histórica completa, os dados registrados durante a fase atual do projeto apresentaram o mesmo padrão de anos anteriores até o início de 2018, com precipitações máximas diárias em torno de 100 mm. A partir de fevereiro de 2018, entretanto, os registros de precipitação foram mais baixos, comportamento esse similar ao observado nos equipamentos da BR-376/PR (item 6.2.1.1.2).

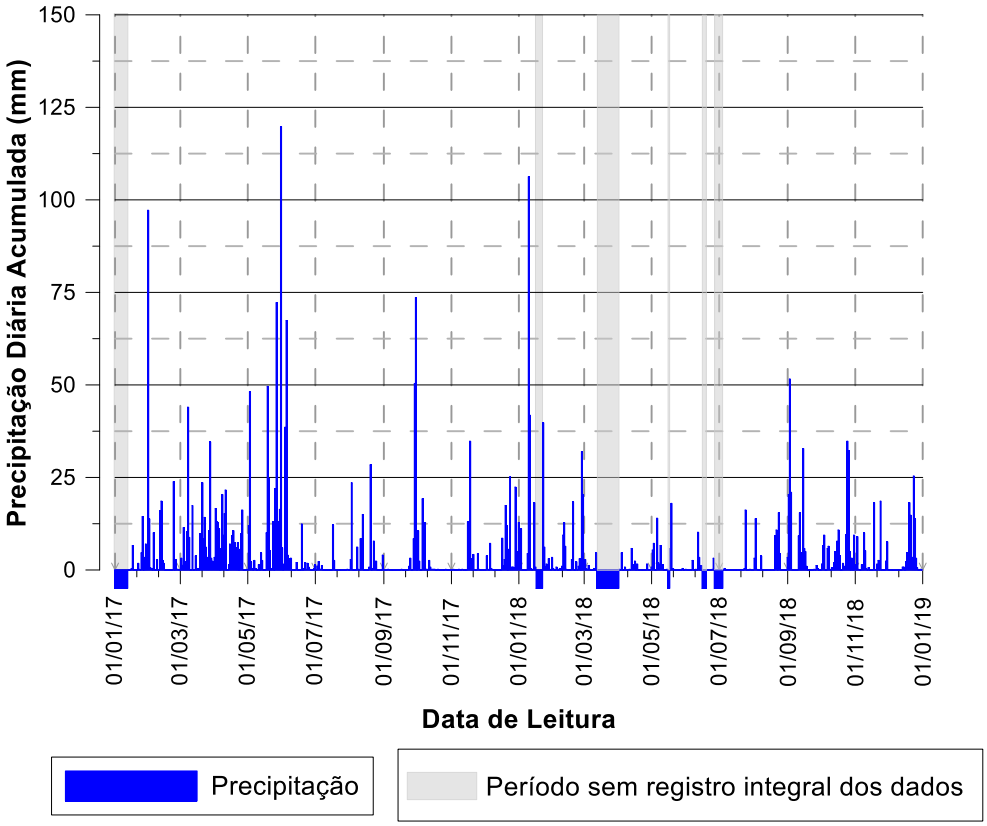


Figura 30 - Precipitação acumulada diária (em mm) de 01/01/ 2017 a 31/12/ 2018 para o pluviógrafo do Morro do Boi

Assim como elaborado para a instrumentação implantada na BR-376/PR, buscou-se aplicar a metodologia de preenchimento de falhas para o pluviógrafo instalado no Morro do Boi. Para tal, foram avaliados dados de duas estações pluviométricas, uma localizada na cidade de Itajaí e outra na cidade de Navegantes, escolhidas por representarem os equipamentos mais próximos à área de interesse (Figura 31). A Tabela 12 apresenta os resultados dos coeficientes de correlação linear de Pearson obtidos entre esses instrumentos. Nota-se que as correlações do pluviógrafo do Morro do Boi com as estações pluviométricas de Navegantes e Itajaí são muito baixas, inviabilizando sua utilização para fins de preenchimento de falhas da série histórica. Com o aumento da série histórica dos pluviógrafos de Itajaí e do Morro do Boi, novas correlações podem ser realizadas buscando verificar um aumento nessas análises.

Tabela 12 - Correlação linear entre os pluviógrafos

Variável dependente	Variável independente	Variável independente	Correlação de Pearson
MDB	ITA	NAV	0.58
MDB	ITA	-	0.58
MDB	NAV	-	0.25

MDB: Morro do Boi;
ITA: Itajaí;
NAV: Navegantes.



Figura 31 - Mapa de localização das estações pluviométricas de Itajaí, Navegantes e Morro do Boi

De modo a aprofundar o entendimento sobre o regime pluviométrico local, foram apresentados, na Figura 32, os acumulados mensais desde o início do monitoramento. Observa-se uma grande variabilidade dos volumes de precipitação acumulada mensal, não sendo possível identificar grandes contrastes no que diz respeito a períodos de maior ou menor precipitação.

Durante o ano de 2015 (Fase 2 do presente projeto), houve falha no registro de dados entre 05/05 e 14/08. Entretanto, ainda assim é possível observar que nesse período foram registrados os maiores volumes de precipitação acumulada, chegando a aproximadamente 400 mm nos meses de fevereiro, outubro e novembro. Em contrapartida, em 2018 observam-se os menores registros em comparação aos anos anteriores, principalmente nos meses de abril e julho.

Tal comportamento se confirma na análise dos dados de precipitação acumulada anual (Figura 33). Nota-se que mesmo sem o registro integral dos dados, o ano de 2015 apresentou precipitação acumulada anual de pelo menos 500 mm acima dos demais anos, atingindo valores de 2500 mm de acumulado anual, enquanto a média registrada em outros anos foi em torno de 1800 mm.

De acordo com o Mapa Iterativo da Precipitação Média Anual disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2019), a região do Morro do Boi, entre os municípios de Balneário Camboriú e Itapema, possui uma precipitação anual média variando entre 1700 mm e 1800 mm. Para fins de comparação, adotou-se o valor de 1700 mm. A série histórica do pluviógrafo do Morro do Boi mostra que os anos de 2014, 2016 e 2017 apresentaram precipitações anuais muito próximas à média indicada para a região, enquanto o ano de 2013 registrou valores ligeiramente maiores. Já nos anos de 2015 e 2018 a precipitação anual foi respectivamente 42% superior e 37% inferior à média.

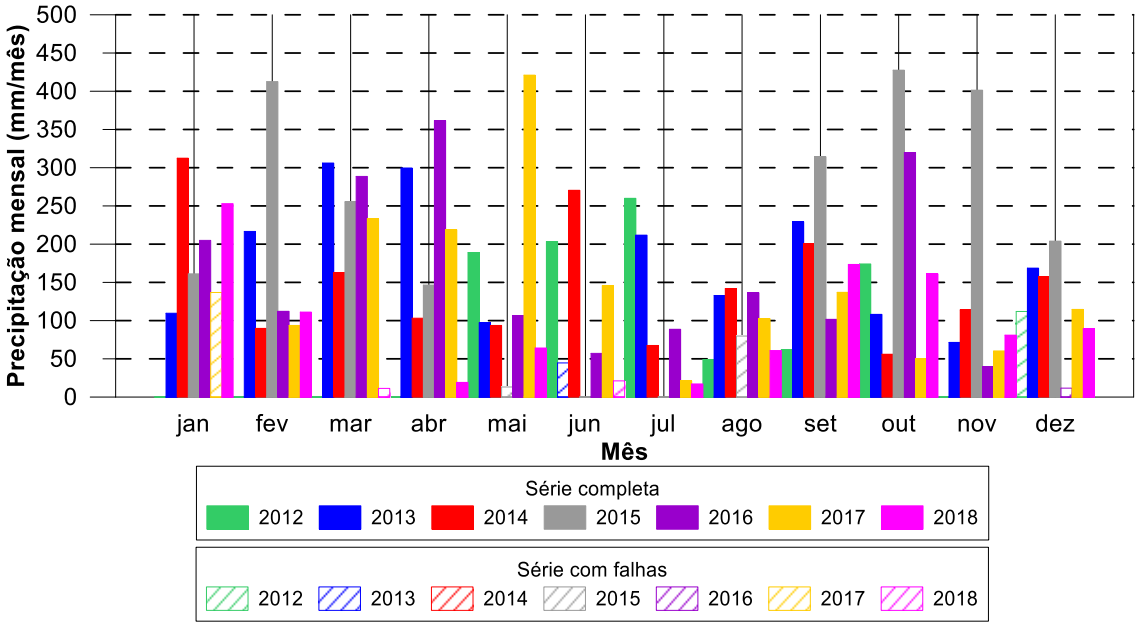


Figura 32 – Precipitação acumulada mensal para o pluviógrafo do Morro do Boi

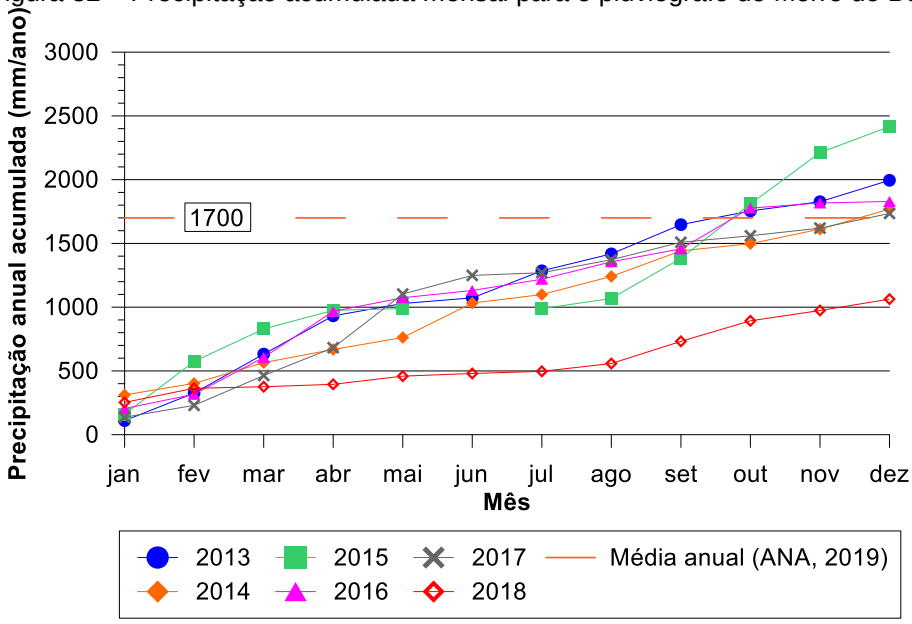


Figura 33 – Precipitação acumulada anual para o pluviógrafo do Morro do Boi

Análises de dados de precipitação são fundamentais para a correlação com movimentos de massa, auxiliando na associação entre as ocorrências de movimentos de massa e a pluviometria. Diferentes características de precipitação podem desencadear deslizamentos, como intensidade máxima horária, chuvas contínuas ou chuvas antecedentes. As características de curto prazo, alta intensidade em curto período de tempo, possuem influência na infiltração de água no solo, em função de sua

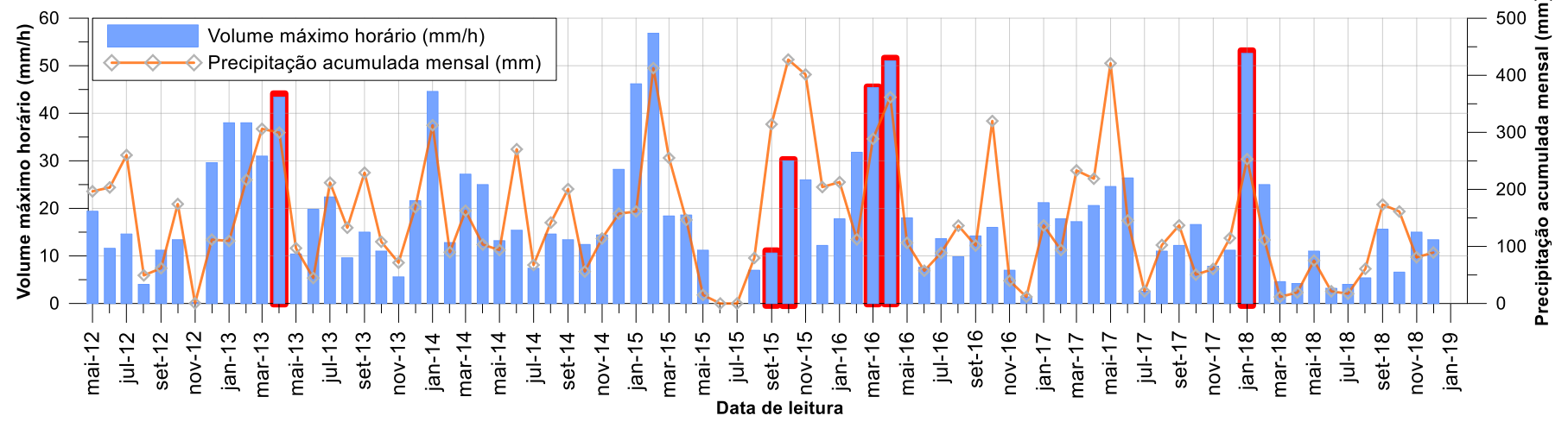
condutividade hidráulica, e na geração de escoamento superficial, ocasionando um pico de descarga de água nas drenagens naturais da encosta. Já as características de longo prazo estão relacionadas à saturação do solo devido à infiltração e consequente redução dos valores de poropressão negativa (Zêzere *et al.,* 2014; Vasu *et al*., 2016).

A fim de melhorar o entendimento dessa correlação, a Figura 34 apresenta dois detalhamentos de características de eventos pluviométricos observados ao longo da série histórica de dados, em que se observou o volume máximo horário por evento (Figura 34a) e o volume máximo diário (Figura 34b), com destaque em vermelho para os meses em que houve registros de movimentos de massa na rodovia. A interpretação destes resultados levou a duas conclusões com relação à essas ocorrências. Primeiramente, verificou-se que os movimentos de massa registrados nos meses de abril/2013, março/2016, abril/2016 e janeiro/2018 estavam relacionados a acumulados mensais de precipitação entre 250 mm e 350 mm e a volumes máximos horários e diários elevados, indicando chuvas concentradas em um curto período de tempo. Com relação aos eventos registrados em setembro/2015 e novembro/2015, observou-se uma correlação com acumulados mensais de até 430 mm e volumes máximos horários e diários baixos, portanto, um alto volume de chuva em um maior espaço de tempo.

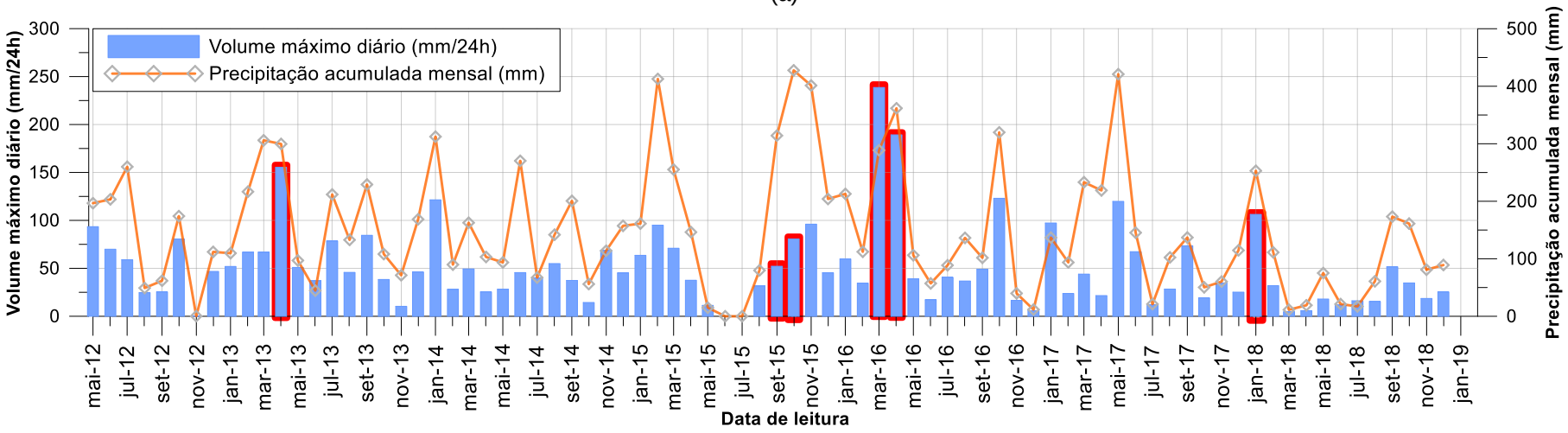
A literatura apresenta diversas correlações entre precipitação e movimentos de massa. Vasu *et al.* (2016) estudaram deslizamentos de terra induzidos por chuva na Coreia do Sul e, com base nas características do solo e em um evento extremo de chuva ocorrido em 2006, determinaram que precipitações de alta intensidade e curta duração, aliadas a períodos superiores a 20 dias de chuva contínua de baixa intensidade, são capazes de desencadear movimentos de massa. Naidu *et al.* (2018), em uma região da Índia, identificaram que uma precipitação diária superior a 80,7 mm é suficiente para deflagrar movimentos de massa.

No Brasil, em Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais, determinou-se que precipitações diárias acumuladas de alta intensidade, associadas ou não a precipitação acumulada de 3 dias, estavam relacionadas a movimentos de massa. Nos eventos analisados, observou-se que um acumulado de 3 dias superior a 100 mm e diário superior a 70 mm desencadearam um maior número de processos (Parizzi *et al*., 2010).

Para São José dos Campos, São Paulo, tanto chuvas diárias entre 20 mm e 50 mm, quanto acumuladas de 3 dias acima de 50 mm são capazes de deflagrar escorregamentos (Mendes *et al*., 2015). A correlação entre precipitação diária e precipitação acumulada em 3 dias também foi a que melhor se adequou aos movimentos de massa ocorridos na região do Morro do Boi, conforme será apresentado no item 6.5.1.



(a)



(b)

Figura 34 - Análises de características da série histórica do pluviógrafo: (a) volume máximo horário e (b) volume máximo diário

6.2.2.2 Nível d'água

Dentre as variáveis monitoradas ao longo do projeto, têm-se os níveis do lençol freático no maciço. Tais dados foram obtidos manualmente em um medidor de nível d'água instalado em um furo de sondagem (SM-04) e através do nível de água nos tubos de inclinômetros (INCL-01 e INCL-02), cujos valores devem ser considerados apenas orientativos para fins de acompanhamento de variações, de forma simplificada. A Figura 35 apresenta os resultados obtidos até o momento.

Observou-se que o nível d'água permaneceu em média entre 5,50 m e 8,00 m de profundidade ao longo de toda a série histórica para o medidor SM-04. As variações medidas nos tubos dos inclinômetros foram ligeiramente superiores, compreendendo um intervalo entre 6,00 m e 10,00 m. Verifica-se que as variações do nível d'água tanto no medidor quanto nos tubos de inclinômetro, ainda que pequenas, estão relacionadas a precipitações diárias superiores a 100 mm. Alguns trabalhos já foram publicados descrevendo esse comportamento no Morro do Boi (e.g. Sestrem e Kormann, 2013; Kormann *et. al.,* 2013; Sestrem *et al*., 2015; González *et al*., 2017), onde relacionam-se as pequenas variações às características granulares da estratigrafia local e ao alto grau de fraturamento das rochas. A drenagem do maciço caracteriza-se como de natureza secundária, controlada principalmente pelas fraturas, geralmente dispostas paralelamente à encosta. O controle do fluxo d'água por fraturas geológicas em encostas é um fenômeno observado também para a BR-376/PR, além de ter sido apresentado por outros autores como Wolle e Carvalho (1989, *apud* Victorino, 2015), Silva *et al*. (2016), Avelar e Coelho-Netto (1992), Haught e Tromp-van Meerveld (2011), Brönnimann *et al*. (2013) e Gabrielli *et al*. (2012), conforme citado em 6.2.1.

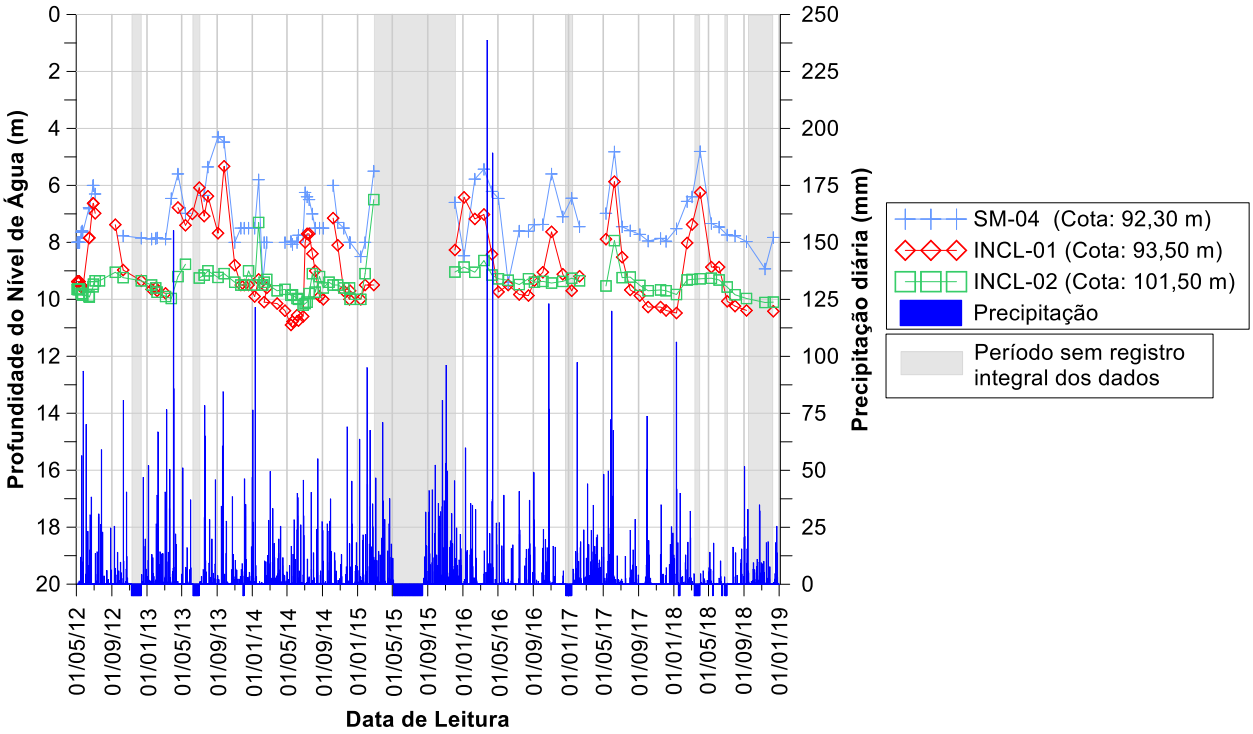


Figura 35 – Série histórica das variações do nível d'água

6.2.2.3 Piezômetros

Como parte do monitoramento geotécnico implantado em etapas iniciais da pesquisa foram instalados 6 (seis) piezômetros de corda vibrante, três localizados na Ilha 01 e três na Ilha 02 (Figura 29). O processamento destas leituras permitiu analisar as variações de poropressão ao longo do tempo em cada sensor instalado juntamente com dados de precipitação, conforme apresentado na Figura 36.

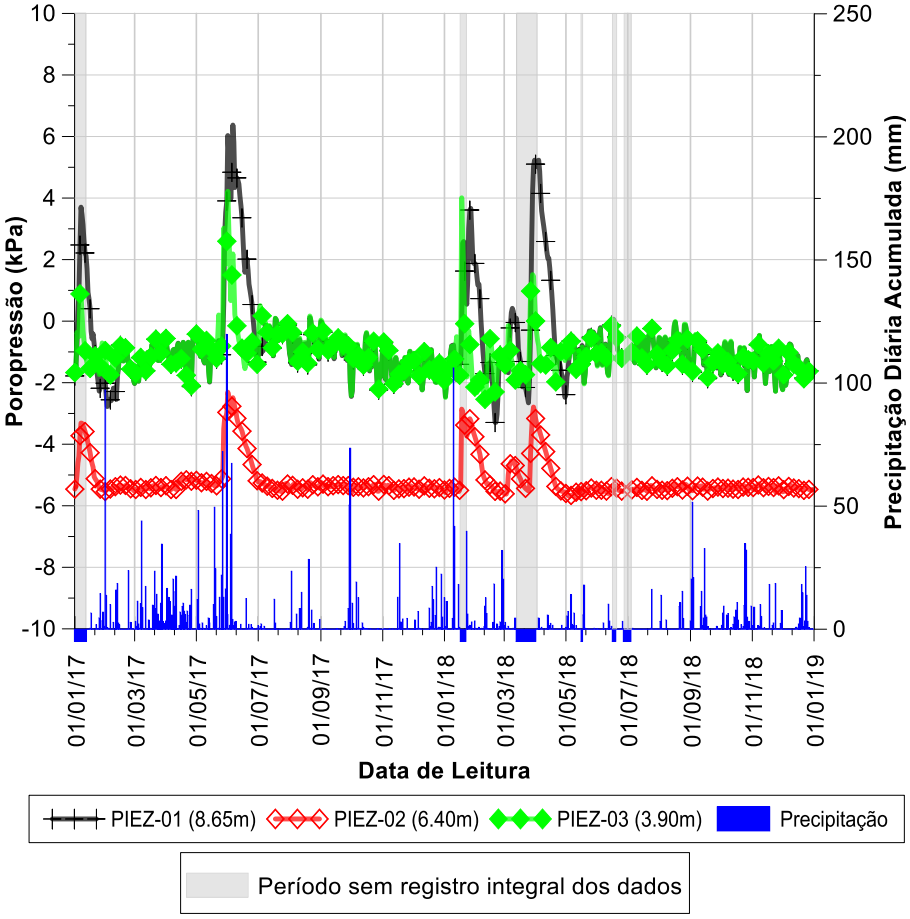
Em comparação com a série histórica completa (Apêndice 6), o comportamento dos piezômetros ao longo da Fase 3 do projeto mostrou-se semelhante aos anos anteriores. Os piezômetros instalados em maior profundidade, PIEZ-01 (8,65 m) e PIEZ-04 (8,60 m), apresentaram maiores oscilações em seus valores, que podem ser relacionadas às alterações do nível d'água, conforme descrito em 6.2.2.2. Os instrumentos instalados em profundidades intermediárias, PIEZ-02 (6,40 m) e PIEZ-05 (7,20 m), também apresentaram oscilações relacionadas às variações do nível

d’água. Já os piezômetros mais superficiais, PIEZ-03 (3,90 m) e PIEZ-06 (3,70m), estão instalados na zona não saturada do talude e suas oscilações estão relacionadas à infiltração da precipitação no solo, registrando valores de poropressão positiva e negativa.

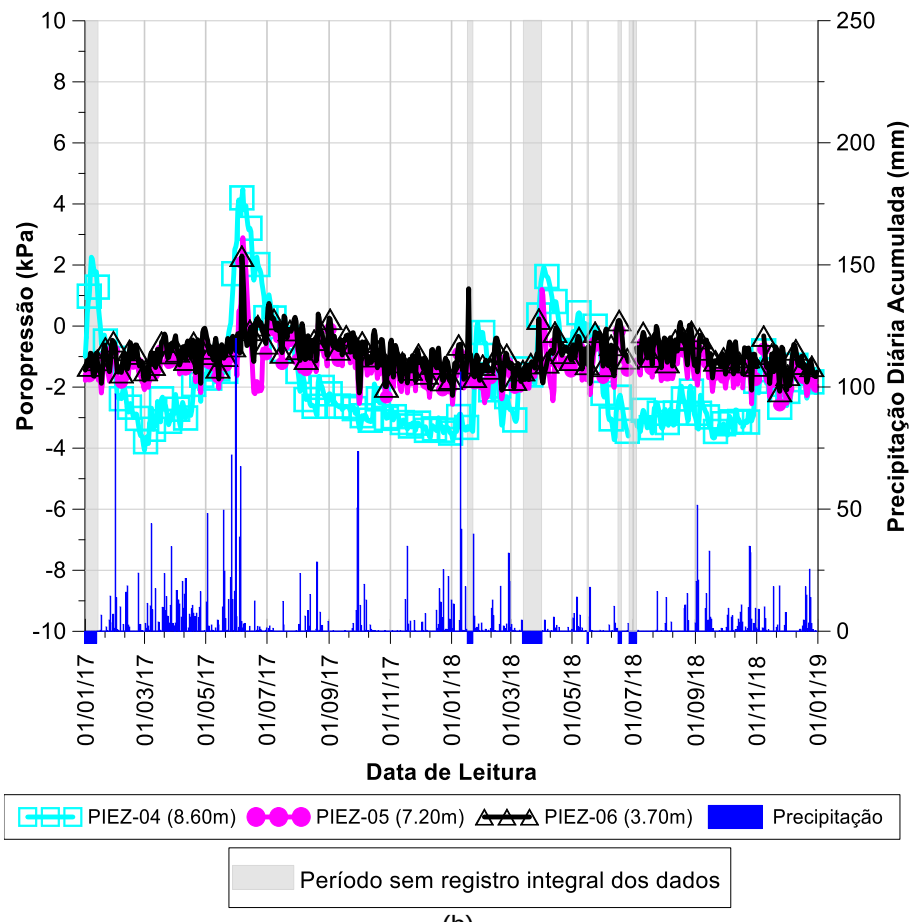
Embora não seja o propósito do instrumento, a utilização de pedras cerâmicas com altos valores de entrada de ar dificulta a saída de ar do sistema, permitindo a leitura de valores de poropressão negativa de até 100 kPa (Geokon, 2009). Esses registros mostraram-se até o momento coerentes com os valores de poropressão negativos obtidos através dos tensiômetros e com o perfil de infiltração do solo.

Ao longo dos dois últimos anos, observou-se que os valores de poropressão apresentaram variações mais significativas em casos de precipitação diária acumulada maior que 100 mm, da ordem de 7 kPa para os instrumentos em maior profundidade. O PIEZ-01 (8,65 m) oscilou entre 0 e -2 kPa, atingindo um máximo de 6,4 kPa após um período de intensa precipitação entre final de maio e início de junho/2017, já o PIEZ-04 (8,60 m) oscilou entre -2 e -4 kPa, alcançando o valor de 4,5 kPa após o mesmo período. Um registro de medição de nível d’água realizado no início de junho no furo SM-04 indicou profundidade do lençol freático a 4,82 m, superior ao normalmente encontrado, justificando assim o aumento de poropressão positiva.

Os piezômetros intermediários apresentaram variações inferiores, de aproximadamente 3,4 kPa para o PIEZ-02 (6,40 m) e 5,4 kPa para o PIEZ-05 (7,20 m), com a diferença de que o PIEZ-02 não registrou valores de poropressão positiva, ao longo de toda a série histórica. Os instrumentos mais próximos à superfície, conforme mencionado, localizam-se acima do nível d’água e suas oscilações podem ser relacionadas à infiltração da água da chuva. Os dois piezômetros oscilaram entre 0 e -2 kPa, sendo que o PIEZ-03 (3,90 m) atingiu o máximo de 4,2 kPa, enquanto o PIEZ-06 (3,70 m) atingiu 2,3 kPa.



(a)



(b)

Figura 36 - Variações das poropressões em função da pluviometria entre 01/01/2017 e 31/12/2018: (a) Ilha 02 e (b) Ilha 01

6.2.2.4 Tensiômetros

O monitoramento geotécnico compreendeu ainda 8 (oito) tensiômetros, cuja análise das leituras obtidas permitiu observar as variações da sucção matricial ao longo do tempo. Na sequência, os resultados do monitoramento desses sensores, durante a Fase 3 do projeto, são apresentados, estando os dados agrupados de acordo com as ilhas de instrumentação, em um mesmo patamar de instalação (Tabela 13). As variações de sucção obtidas ao longo de toda série histórica disponível estão apresentadas no Apêndice 7.

Tabela 13 - Distribuição e profundidade de instalação dos tensiômetros

Ponto de Instalação	Tensiômetro	Profundidade (m)
1	TENS-01	1,00 m
	TENS-02	2,00 m
2	TENS-03	0,50 m
	TENS-04	3,00 m
	TENS-05	1,00 m
	TENS-06	2,00 m
3	TENS-07	1,00 m
	TENS-08	2,00 m

Ao longo da série histórica, observou-se que os TENS-01 e TENS-02, referentes à ilha 01, apresentaram comportamento semelhante, com períodos de maior oscilação e períodos de constância nos valores. Dos instrumentos instalados na ilha 02, o TENS-04, TENS-05 e TENS-06 apresentaram comportamento semelhante, com poucas variações, até o final de 2017, quando o TENS-05 apresentou divergência em seus valores. Já o TENS-03 registrou grande variação ao longo de todo o período de monitoramento. Na ilha 03, o TENS-07 e TENS-08 registraram valores praticamente constantes até o início da fase atual do projeto.

As Figuras 37 a 39 apresentam os registros de sucção obtidos para o período que abrange o presente relatório, para as três ilhas de monitoramento. Os tensiômetros TENS-01 (1,00 m) e TENS-02 (2,00 m) apresentaram comportamento oscilatório, com registro de dados variando entre -20 kPa e 65 kPa. O TENS-02, que está em maior profundidade, apresentou total saturação entre outubro/2017 e março/2018, e no mês de setembro/2018. O TENS-01 se manteve saturado entre março e agosto/2017, janeiro e março/2018 e agosto e setembro/2018. Houve aumento de sucção similar nos dois instrumentos em setembro de 2017 e nos demais períodos o TENS-02 apresentou atraso na resposta em relação ao TENS-01. Por estar em maior profundidade, a perda de umidade do solo e consequente aumento de sucção pode ser mais lenta.

Os tensiômetros TENS-04 (3,00 m) e TENS-06 (2,00 m) apresentaram comportamento semelhante, sofrendo pouca variação nos dados. O TENS-04 registrou valores entre, aproximadamente, -15 kPa e 20 kPa, enquanto o TENS-06 registrou valores entre -10 kPa e 35 kPa. Por estar instalado em maior profundidade, é esperado que o TENS-04 apresente valores de sucção menores que o TENS-06. Já o tensiômetro TENS-03 (0,50 m) é o que está mais próximo da superfície e, portanto, seus valores registraram grandes variações de sucção, entre -15 kPa e 68 kPa, tanto pela precipitação quanto pela própria temperatura e umidade do ar. O TENS-05 (1,00 m), conforme mencionado, apresentou, durante a Fase 3 do projeto, inconsistência em seus registros. Até o final de 2017, entretanto, o comportamento do instrumento se assemelhou ao comportamento do TENS-03, com ganhos de sucção em períodos de menor precipitação, atingindo o valor de 77 kPa.

Em 2018, o TENS-05 registrou dados de sucção em torno de 88 kPa e durante todo o ano, independente da precipitação registrada, os valores se mantiveram nessa ordem de grandeza, conforme observado na linha tracejada do gráfico da Figura 38. Durante as visitas de campo, foram realizadas leituras manuais de todos os tensiômetros por meio do manômetro acoplado ao instrumento. Tais leituras não podem se diferenciar muito daquelas obtidas de maneira automatizada pelo transdutor. Entretanto, observou-se que, a partir do momento em que o transdutor do TENS-05 passou a registrar os altos valores de sucção, as leituras manuais do instrumento divergiram muito

desses registros (Figura 40). Recomenda-se, portanto, monitorar tal comportamento e avaliar a possibilidade de reinstalação do tubo e pedra porosa ou substituição do conjunto todo (tubo e transdutor de leituras).

Por fim, observou-se que os tensiômetros TENS-07 (1,00 m) e TENS-08 (2,00 m) também apresentaram, em comparação com a série histórica de dados, comportamento divergente durante o período do presente relatório. Nota-se que, até fevereiro de 2017 os valores lidos pelos equipamentos apresentavam comportamento em concordância com o esperado e, a partir desse período, as leituras passaram a apresentar grande dispersão. Foram registradas quedas abruptas em curtos intervalos de tempo as quais nem sempre estão associadas a eventos pluviométricos de grande intensidade. Além disso, em boa parte das visitas de campo deste período os instrumentos encontravam-se com o tubo vazio, necessitando de preenchimento com água. Tal procedimento ocasiona um pico de sucção, contribuindo para esse comportamento oscilatório. Uma vez que os registros do transdutor devem ser corrigidos em função do nível d'água dentro do tubo do instrumento, optou-se por não considerar nas análises os dados registrados durante o período em que os tubos se encontraram vazios (linha tracejada do gráfico da Figura 39).

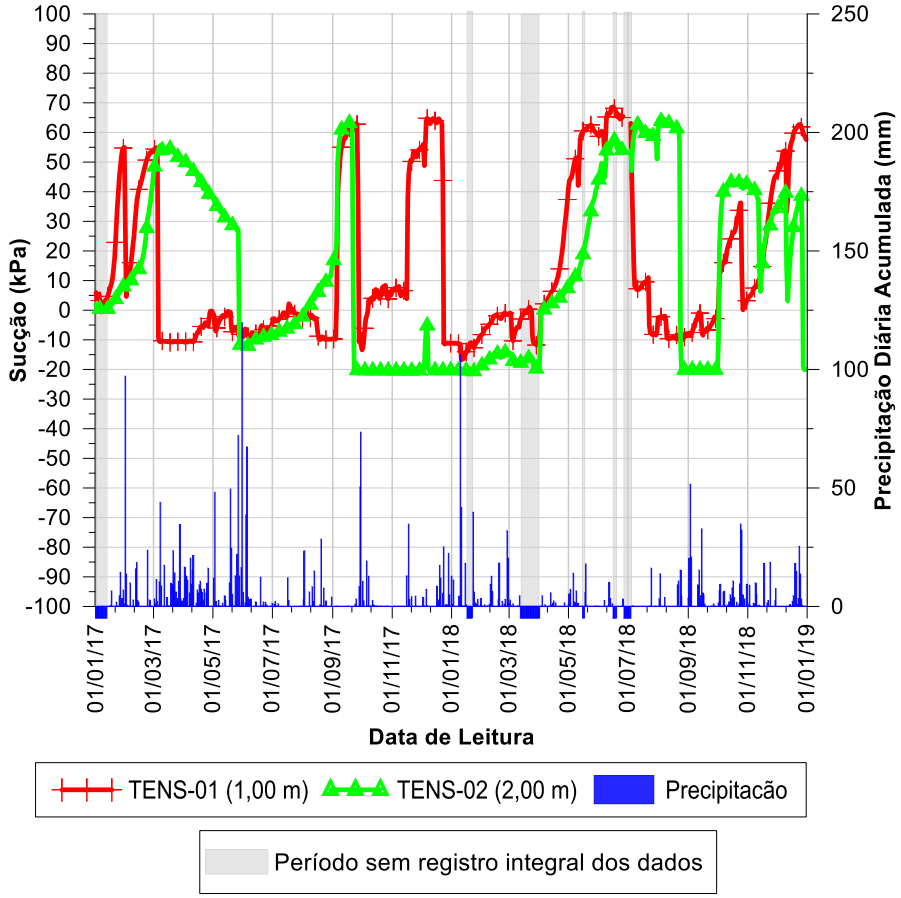


Figura 37 - Precipitação e variação da sucção entre 01/01/2017 e 31/12/2018 – TENS-01 e TENS-02

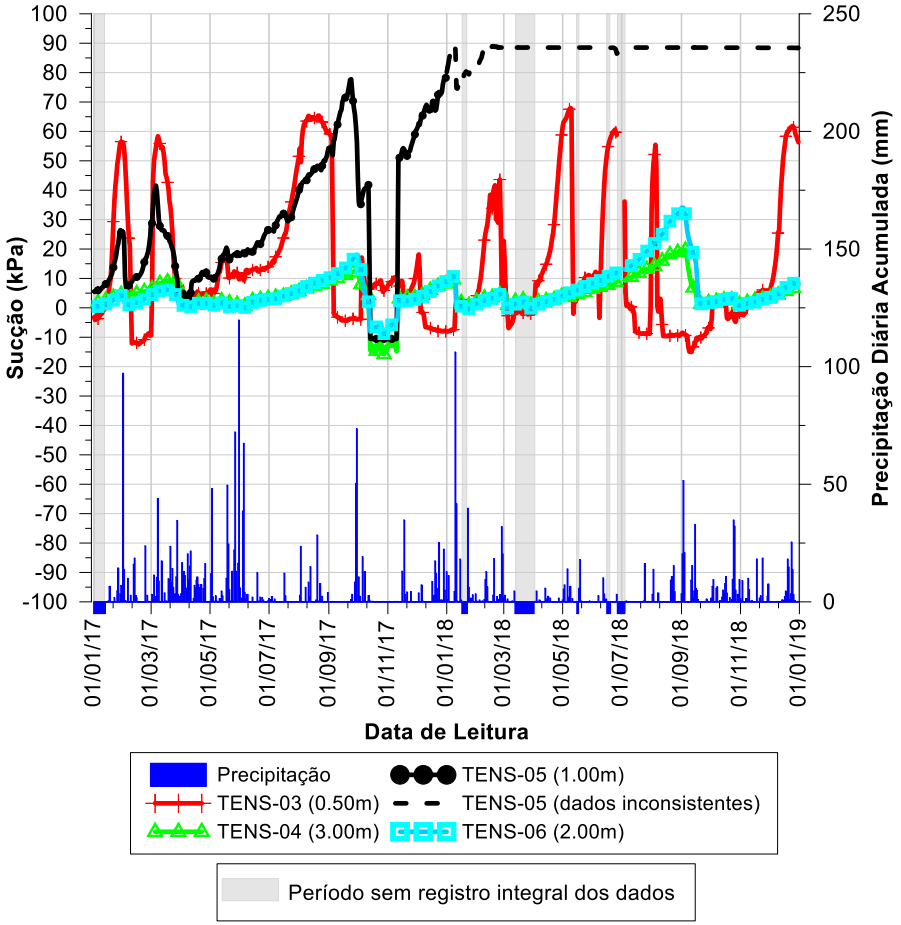


Figura 38 - Precipitação e variação da sucção entre 01/01/2017 e 31/12/2018 – TENS-03 a TENS-06

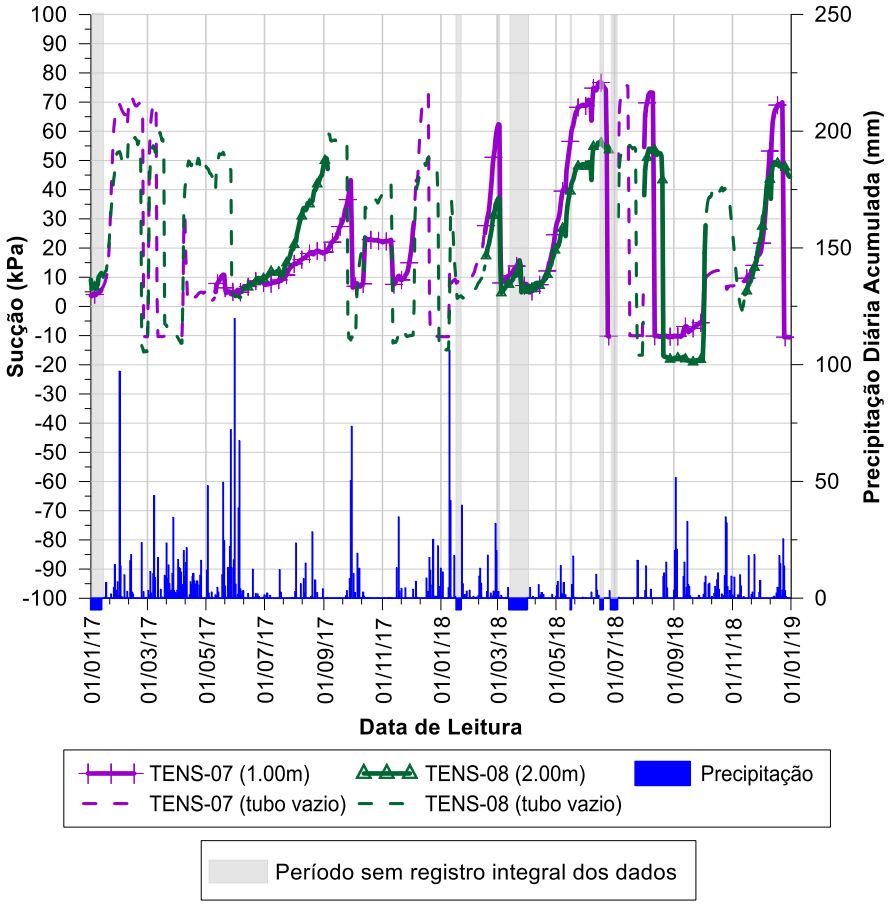


Figura 39 - Precipitação e variação da sucção entre 01/01/2017 e 31/12/2018 – TENS-07 e TENS-08

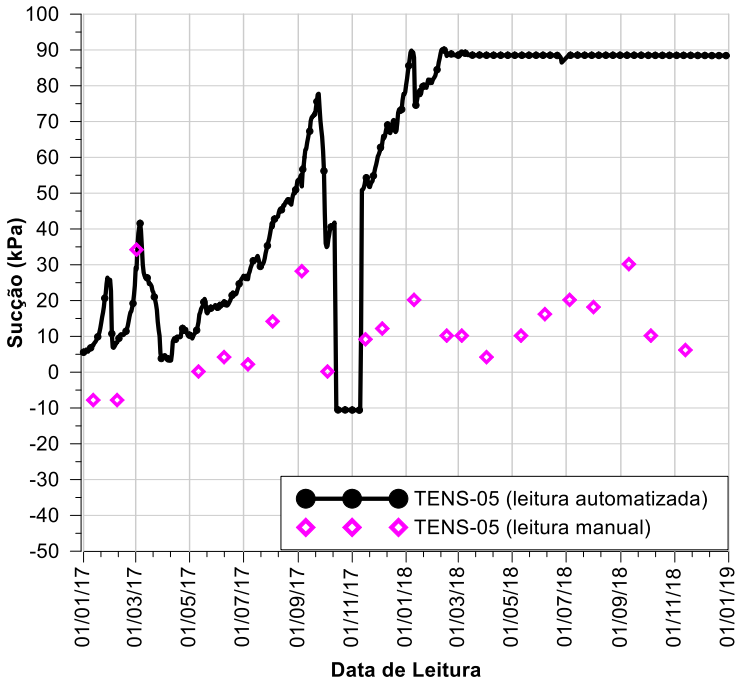


Figura 40 – Comparação entre leituras manuais (manômetro) e automatizadas (transdutor) para TENS-05

6.2.2.5 Inclinômetros

A instalação de dois inclinômetros na etapa inicial da pesquisa permitiu a análise da evolução dos deslocamentos horizontais na encosta em estudo. A interpretação das leituras considera que o eixo A dos inclinômetros representa deslocamentos no sentido perpendicular ao talude e o eixo B paralelo ao mesmo, conforme pode ser observado na convenção apresentada na Figura 41.

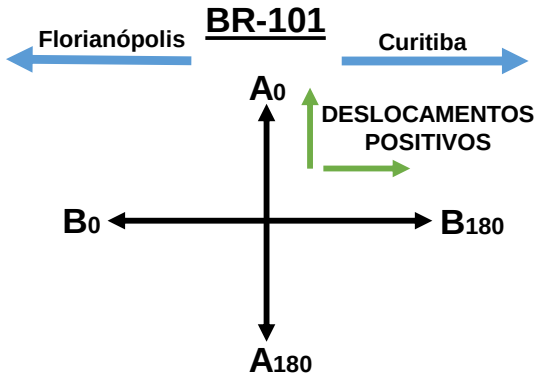


Figura 41 - Interpretação das leituras dos inclinômetros – sentido dos posicionamentos

A série histórica completa dos dados está apresentada no Apêndice 8. Nela, é possível observar o avanço dos deslocamentos ao longo de todo o período de monitoramento. Para o inclinômetro INCL-01, o eixo A apresenta os maiores registros até o momento, com pequenos acréscimos a cada ano. Já para o instrumento INCL-02, o eixo B é o que apresenta maiores variações.

As Figuras 42 e 43 apresentam os dados registrados durante a Fase 3 do projeto. Nota-se que o inclinômetro INCL-01, eixo A, apresentou um avanço nos deslocamentos em 2018, chegando a 9 mm, enquanto o eixo B o deslocamento máximo medido foi de 4 mm e um comportamento mais variável. Para o inclinômetro INCL-02, em ambos os eixos, esse comportamento é bem percebido, sendo que o eixo B registrou maiores deslocamentos, chegando a 7,5 mm em 2017.

A Figura 44 apresenta as médias anuais das leituras de deslocamentos registradas pelos inclinômetros INCL-01, no eixo A, e INCL-02, no eixo B. Para o

INCL-01, até o ano de 2015, observa-se um deslocamento constante da ordem de 1 mm ao ano. Em 2016, esse deslocamento aumentou para, aproximadamente, 3 mm no ano. No ano seguinte, 2017, a média das leituras foi inferior e o deslocamento ocorreu no sentido oposto, ou seja, contrário à direção da rodovia, e o valor foi da ordem de 1 mm. Já para o ano de 2018, os valores registrados encontram-se próximos àqueles obtidos em 2016, de 3 mm. Durante todo o período de monitoramento, o deslocamento máximo foi de aproximadamente 9 mm para o INCL-01. Para o INCL-02, as médias anuais das leituras mostram um comportamento envolvendo mais variações, com movimentos paralelos à rodovia em ambos os sentidos. Os deslocamentos máximos registrados são de, aproximadamente, 4 mm.

Cruden e Varnes (1996) propuseram uma escala de velocidade para os movimentos de massa e, de acordo com os autores, para velocidades inferiores a 16 mm/ano o movimento pode ser classificado como extremamente lento. Com base nessa classificação, Hungr (1981, *apud* Sancho, 2016) sugeriu, entre nula, evacuamento e manutenção, qual ação deve ser tomada para cada classe de velocidade. Para movimentos extremamente lentos, segundo o autor, não há necessidade de tomada de ação. Dessa forma, o deslocamento de 9 mm observado nos 5 anos de monitoramento pode ser considerado como seguro.

De forma a facilitar a visualização e o entendimento dos deslocamentos registrados pelos inclinômetros, a Figura 45 apresenta as médias anuais de deslocamentos tanto para o eixo A (representado pelo eixo y) quanto para o eixo B (representado pelo eixo x) para a profundidade de 1,00 m. Para o inclinômetro INCL-01 os deslocamentos aumentam gradualmente no sentido perpendicular ao talude, já para o inclinômetro INCL-02 os deslocamentos tendem a aumentar no sentido contrário, paralelo à rodovia. É importante ressaltar que os valores são pequenos e pouco significativos, mas, ainda assim, o monitoramento é essencial para a confirmação dessa tendência de movimento e identificação de possíveis alterações que possam vir a afetar a segurança da rodovia.

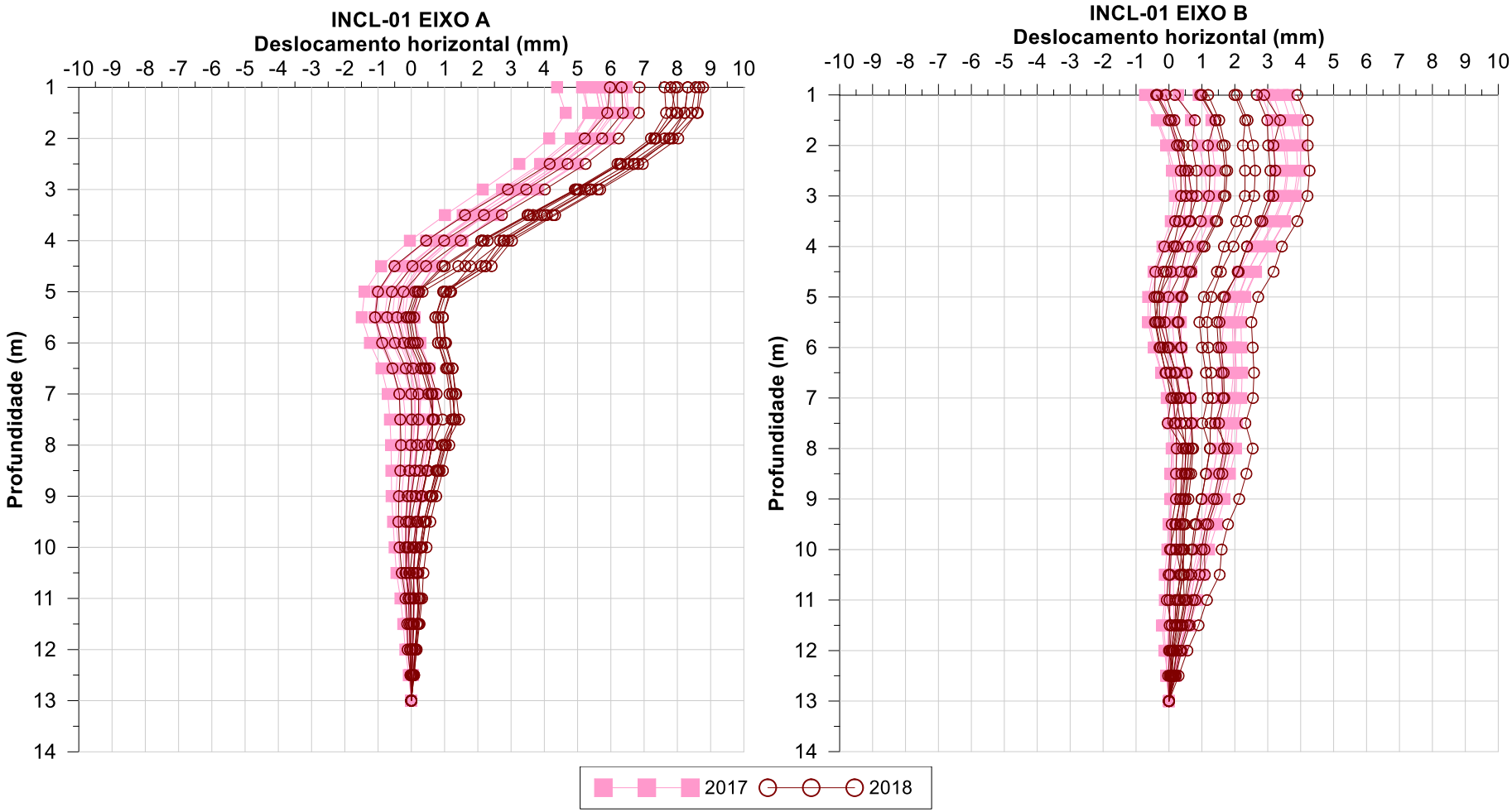


Figura 42 - Leituras de deslocamentos acumulados do INCL-01 – Eixos A e B – 01/01/2017 a 31/12/2018

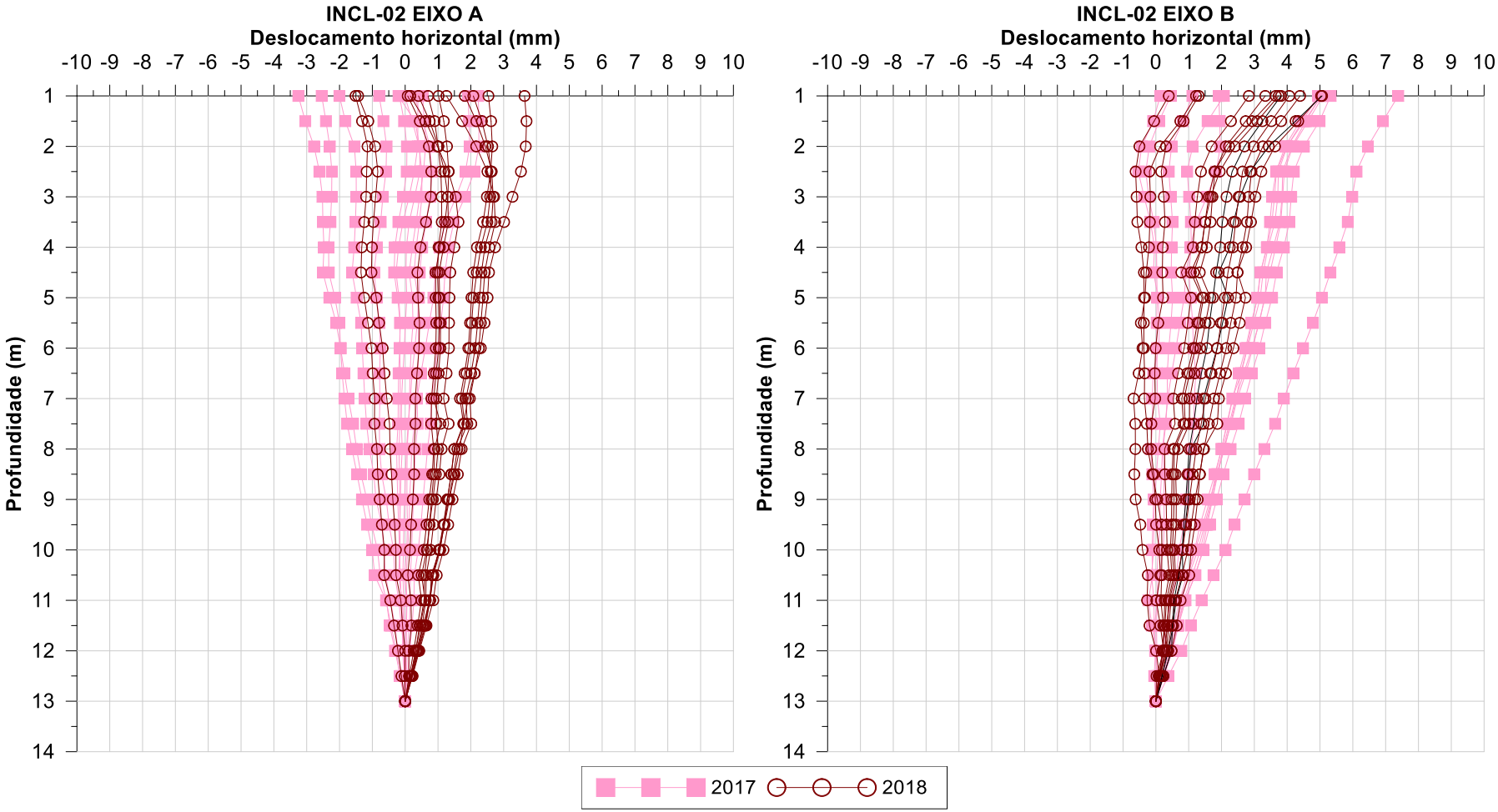


Figura 43 - Leituras de deslocamentos acumulados do INCL-02 – Eixos A e B – 01/01/2017 a 31/12/2018

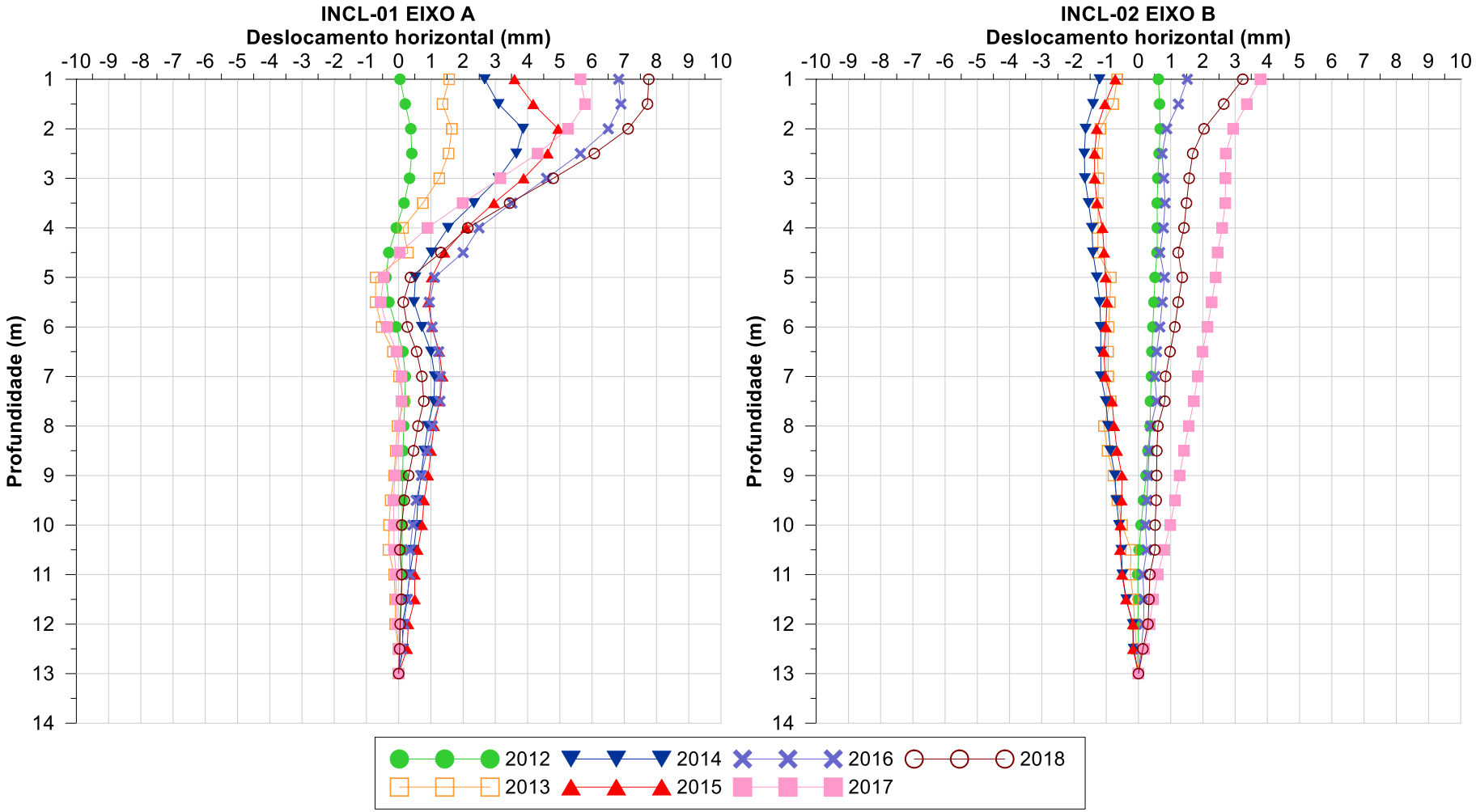


Figura 44 – Médias anuais dos deslocamentos registrados pelos inclinômetros INCL-01 (eixo A) e INCL-02 (eixo B) em profundidade

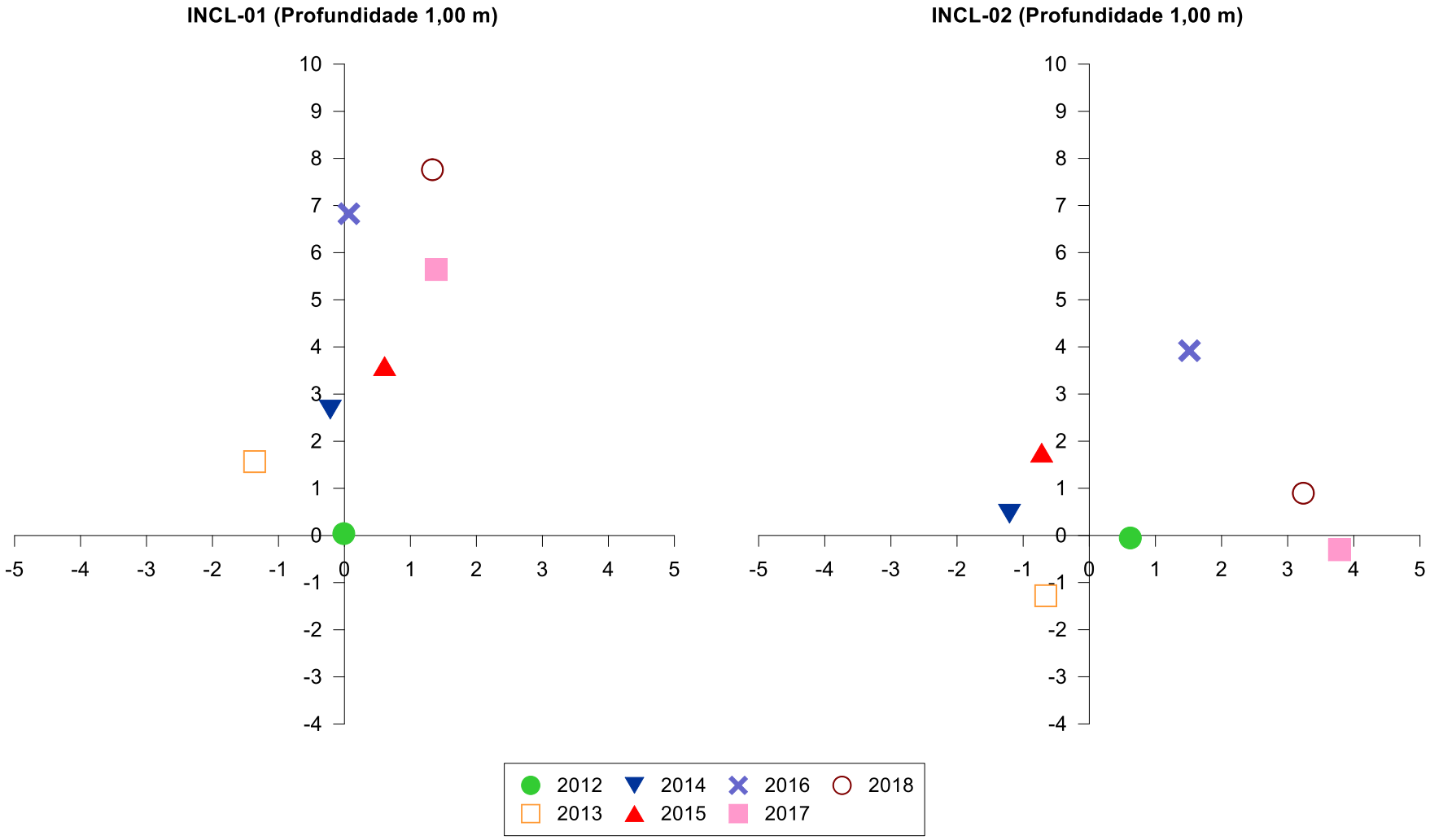


Figura 45 - Médias anuais dos deslocamentos registrados pelos inclinômetros INCL-01 e INCL-02 para profundidade de 1,00 m

6.2.2.6 Células de carga

A instalação de quatro células de carga permitiu uma análise da variação do carregamento na cabeça dos grampos ao longo do tempo, conforme pode ser observado na série histórica de dados do instrumento no Apêndice 9.

As células de carga CC-01, CC-02 e CC-03 apresentaram até o ano de 2016, um aumento gradual dos carregamentos. Com a continuidade das leituras observou-se que desde o ano de 2017 as células CC-01 e CC-03 apresentaram uma redução gradual dos valores registrados e a célula CC-02 manteve-se constante. Já a célula de carga CC-04 durante toda a série manteve seus registros constantes. Na Figura 46 as variações do carregamento na cabeça dos grampos são apresentadas em maior detalhe para o período do presente relatório. Verifica-se que até o momento não foram identificadas mudanças significativas nas leituras obtidas, estando os maiores carregamentos medidos pela CC-03 em 35 kN.

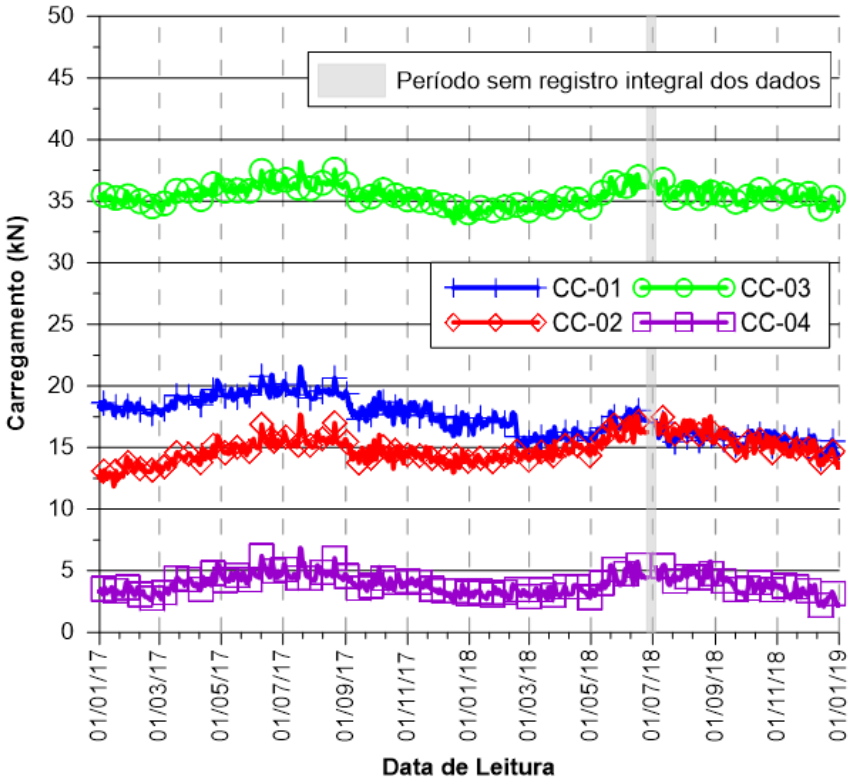


Figura 46 - Carregamento nas células de carga dos grampos para os meses de janeiro de 2017 a dezembro de 2018

Para melhor compreender o comportamento oscilatório que as células de carga apresentam, na Figura 47, os dados de carregamento foram comparados à variação de temperatura registrada pelos instrumentos. Nota-se uma correlação inversa entre esses dois parâmetros: à medida que a temperatura aumenta, os registros de carregamento reduzem e, à medida que a temperatura reduz, os registros de carregamento aumentam.

De acordo com o manual do instrumento (Geokon, 2010), a compensação térmica, para evitar a influência da variação de temperatura nos registros de carregamento, é obtida utilizando *strain gages* de corda vibrante cujo coeficiente térmico é o mesmo da célula de carga. Entretanto, o manual reforça que variações na temperatura das estruturas em que as células de carga estão instaladas podem ocasionar variações nos carregamentos que serão medidos. Além disso, segundo o manual, a precisão do equipamento é de 5 kN (1,0% FSR).

Assim, pela análise dos gráficos e informações do fabricante, concluiu-se que as oscilações observadas são relacionadas à sensibilidade do instrumento à variação térmica, a qual provoca pequenas contrações e dilatações nos grampos, e que os valores se encontram dentro da faixa de precisão do instrumento, podendo-se considerar, portanto, seu comportamento constante.

Observa-se ainda acréscimos e reduções dos carregamentos ao longo da série histórica, ao serem analisadas as médias das leituras. Conforme mencionado no item anterior, no ano de 2017 as leituras do eixo A do inclinômetro INCL-01 foram inferiores às do ano de 2016. Esse mesmo comportamento foi observado para as células de carga CC-01 e CC-03, no mesmo período. A convergência entre o comportamento observado entre inclinômetros e células de carga foi descrita no trabalho de Yoo e Lee (2003), onde os autores analisaram dados de uma parede ancorada com instrumentação. No período estudado, os inclinômetros registraram máximos deslocamentos de 4 e 8 mm. Esses movimentos impuseram um acréscimo de tensão na porção superior da parede da ordem de 0,1%, consistente com os valores registrados pelas células de carga.

A contração do maciço identificada pelo inclinômetro no ano de 2017 ocasionou um alivio no carregamento imposto aos grampos instrumentados com as células de carga CC-01 e CC-03. A Figura 48 apresenta os carregamentos nas células de carga e os deslocamentos horizontais no eixo A do INCL-01, na profundidade de 1,00 m. A análise gráfica permite observar essa similaridade entre o comportamento registrado pelos instrumentos. A redução de 6,84 mm (média das leituras do inclinômetro em 2016) para 5,64 (média das leituras do inclinômetro em 2017) ocasionou uma redução de 8,48% no carregamento da célula de carga CC-01 e 6,34% na célula CC-03. Essa constatação auxilia no entendimento da interação solo-estrutura.

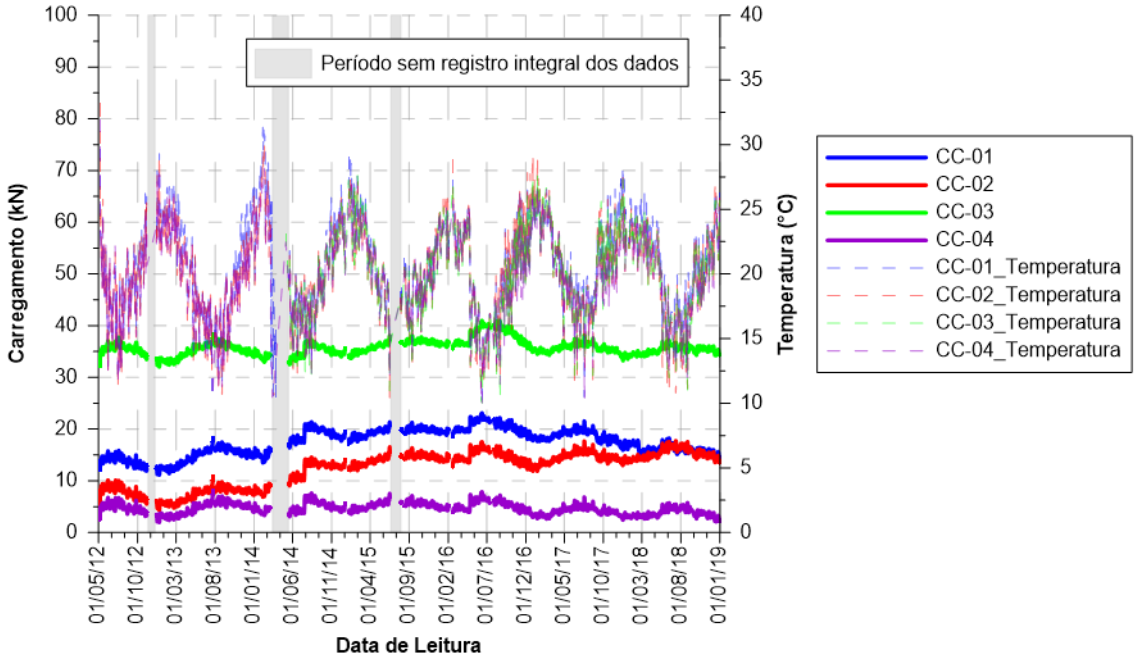


Figura 47 – Carregamento nas células de carga e variação de temperatura durante a série histórica de monitoramento

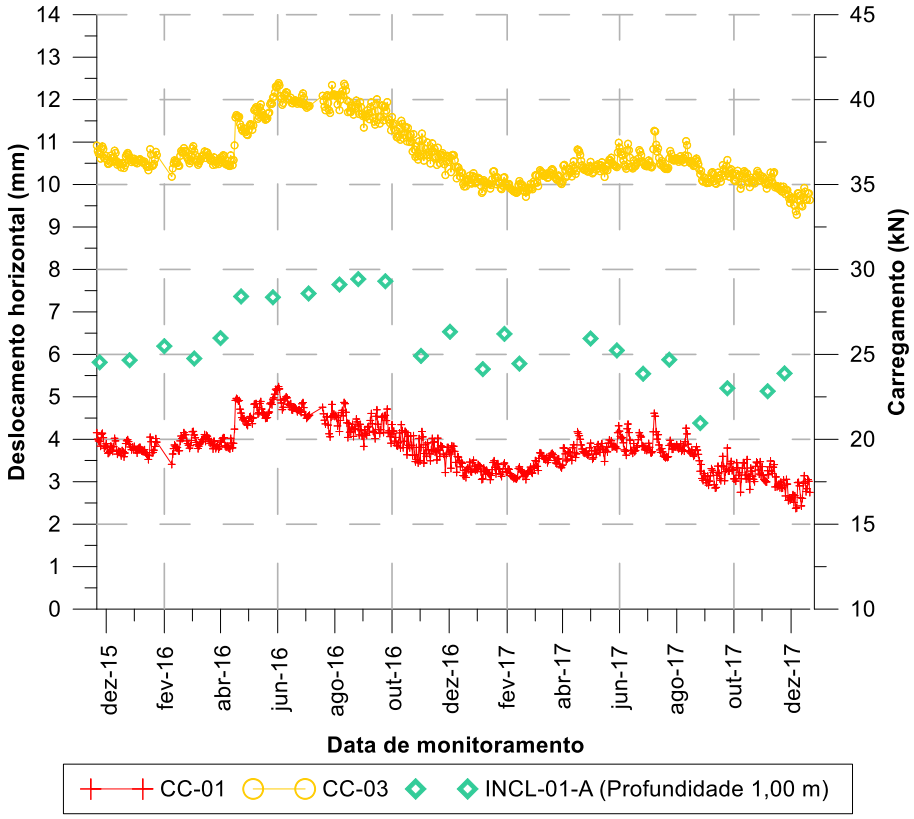


Figura 48 – Carregamentos nas células de carga CC-01 e CC-03 e leituras dos deslocamentos do INCL-01 eixo A

6.2.2.7 *Crackmeters*

Como parte do monitoramento do sistema de estabilização instalado na etapa inicial da pesquisa, utilizou-se 12 (doze) *crackmeters.* Esses sensores foram posicionados na região da tela metálica, e o arranjo foi definido de modo a se obter ilhas de monitoramento, buscando-se analisar variações em sua abertura (solicitação) ao longo do tempo. Os valores negativos representam uma redução na abertura e os valores positivos um aumento na abertura dos instrumentos.

De modo geral os sensores apresentam pequenas variações nas leituras dentro da série histórica (Apêndice 10). Ao se analisar os dados referentes ao período que compreende este relatório, na Figura 49, observa-se que os instrumentos CRA-01 (Ilha 01), CRA-08 e CRA-10 (Ilha 02), CRA-02 e CRA-11 (Ilha 03) e CRA-05, CRA-06 e CRA-09 (Ilha 04) mantiveram-se estáveis, com valores praticamente constantes.

Os demais instrumentos apresentaram pequenas oscilações. Na Ilha 02, os dados do *crackmeter* CRA-03 apresentaram uma leve redução em sua abertura e, a partir do início de 2018, um aumento gradual. Em contrapartida, o *crackmeter* CRA-07 apresentou uma redução gradual nos valores registrados durante o ano de 2017, mantendo-se constante durante o ano de 2018. Na Ilha 04, os dados registrados pelo instrumento CRA-12 apresentaram valores oscilando entre - 6 mm e - 10 mm durante os anos de 2017 e 2018. É importante ressaltar que o comportamento dos instrumentos está sujeito a variações devido a fatores externos que possam movimentar a tela metálica, como o procedimento de roçada e visitas a campo.

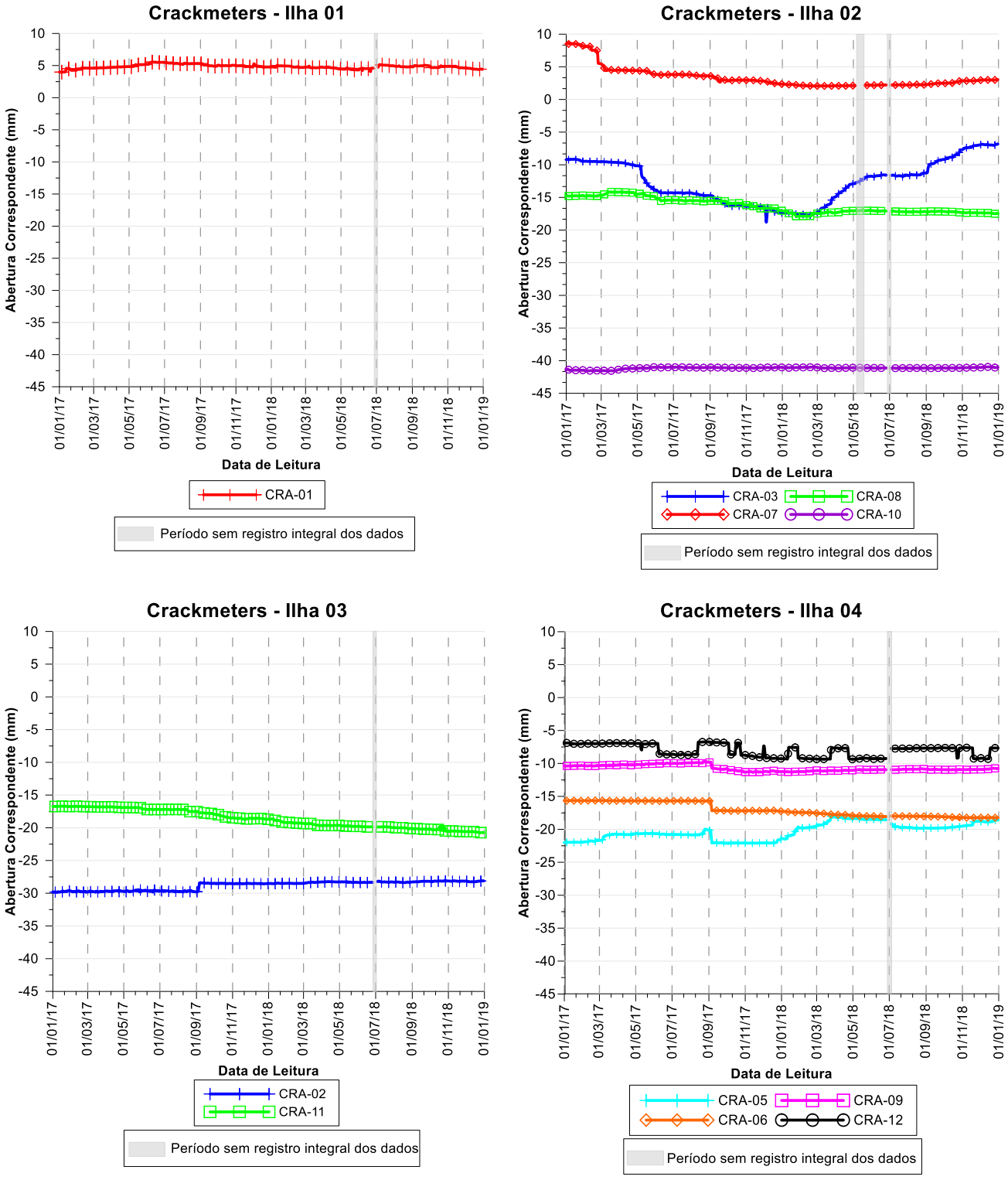


Figura 49 - Leitura dos *crackmeters* entre 01/01/2017 e 31/12/2018

6.2.2.8 Strain Gages

O monitoramento do Morro do Boi compreendeu ainda *strain gages* posicionados ao longo do fuste dos grampos que compõem o sistema de estabilização. Um procedimento de calibração realizado e descrito na etapa inicial da pesquisa permitiu determinar de maneira direta os valores correspondentes de carga para os sensores instalados nas posições intermediárias (diametralmente opostos).

Com base na série histórica de dados, apresentada no Apêndice 11, observou-se que os carregamentos medidos não apresentam variações significativas e, assim como os carregamentos medidos pelas células de carga, sugerem a ocorrência de um comportamento sazonal, principalmente nos registros obtidos na Barra 2. A Barra 1 inicialmente apresentou grandes variações nas leituras de carga, porém a partir do meio do ano de 2014 as leituras têm se mantido constantes, juntamente com a Barra 3. A Figura 50 apresenta as leituras de janeiro de 2017 a dezembro de 2018.

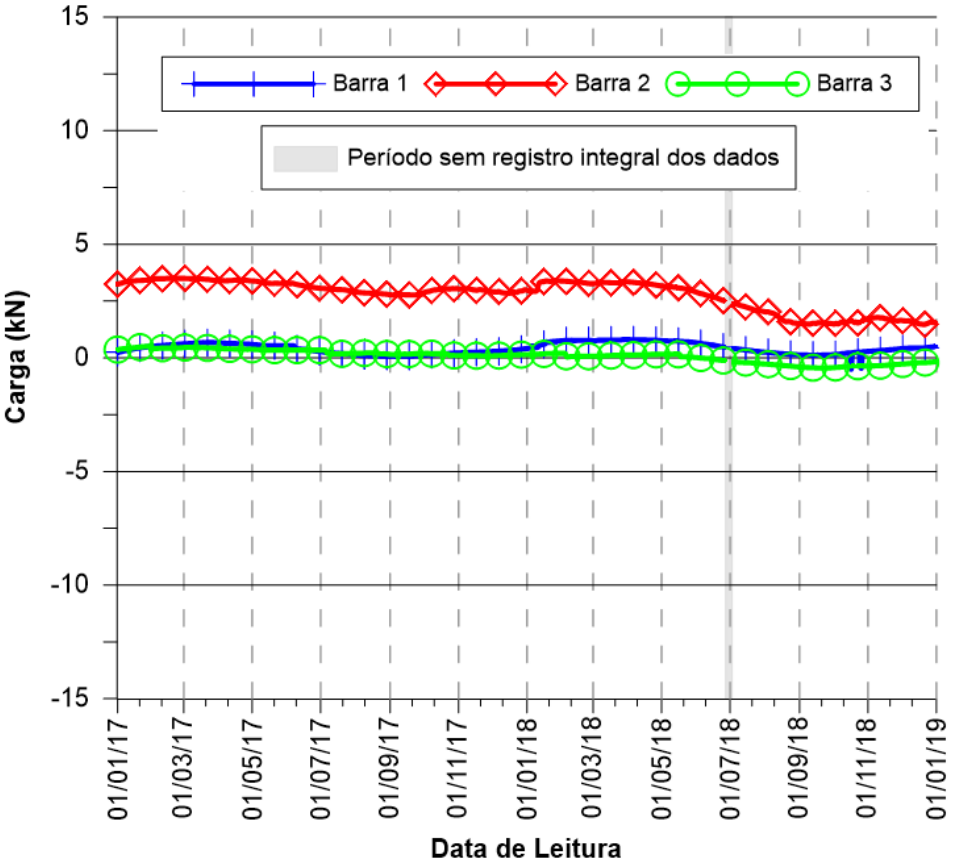


Figura 50 - Carregamentos nos *strain gages* entre 01/01/2017 e 31/12/2018

6.3 Implantação de uma plataforma de gerenciamento de dados

Como parte das atividades desenvolvidas ao longo da Fase 3 deste projeto destaca-se a implantação de uma plataforma integrada de gerenciamento dos dados da instrumentação instalada na BR-376/PR e BR-101/SC (Morro do Boi). A ferramenta escolhida para tal denomina-se *Vista Data Vision* (VDV) e compreende um portal onde estão inseridas todas as leituras dos instrumentos instalados ao longo das etapas iniciais da presente pesquisa (série histórica) desde a data de instalação, além de permitir a recepção dos dados que são transmitidos de forma remota e armazenadas as novas leituras que são registradas, em um intervalo de uma hora. Nos itens subsequentes são apresentadas as modificações realizadas em campo necessárias à implantação da plataforma bem como o modelo de apresentação dos dados registrados na mesma.

6.3.1 Modificações em campo

De modo a permitir que as leituras dos instrumentos pudessem ser enviadas e recebidas por essa plataforma tornou-se necessária a substituição de alguns equipamentos nas estações da BR-376/PR. As estações de monitoramento nos quilômetros 662+000 m (P6) e 667+900 m (P2) já apresentavam módulos de transmissão GPRS e, para o envio dos dados à plataforma VDV, foi necessário o desenvolvimento de um *firmware* customizado no *Datalogger* modelo DL200, marca Pluvitech. Tal procedimento foi adotado com o objetivo de registrar os dados de precipitação em intervalos horários, já que os dados eram registrados no momento exato da basculada de um contador crescente. O *firmware* customizado permitiu a compatibilização dos dados do *Datalogger* para posterior envio à plataforma VDV.

Com relação às estações localizadas nos quilômetros 652+900 m (P5), 660+570 m (P1), 669+300 m (P3) e 676+000 m (P4), apesar de já apresentarem transmissão dos dados, os mesmos eram incompatíveis com a plataforma VDV. Com isso, foi necessária a modificação e substituição de alguns equipamentos, conforme Figura 51, apresentados abaixo:

- *Datalogger*/Modem GPRS SC800 e antena GPRS;

- Caixa de acondicionamento em ABS IP65 de 30x30x20 cm;
- Bateria 7Ah Unipower;
- Controlador de carga compatível;
- Painel solar 5W, com suporte mecânico;
- Conector adaptado do pluviógrafo e instalação da estação Pluvitech GPRS;
- Simcard com plano de dados compatível com volume de dados.



(a) (b)

(c)

Figura 51 – Modificações em equipamentos instalados na BR-376: a) nos pluviógrafos P1, P3, P4 e P5, datalogger/modem GPRS SC800 (verde) e bateria 7Ah Unipower (azul); b) instalação da antena GPRS (vermelho); c) instalação do painel solar 5W e da caixa de acondicionamento em ABS IP65

Com relação aos instrumentos instalados na estação localizada no Morro do Boi (BR-101/SC), também se fez necessária a aquisição de alguns equipamentos bem como algumas alterações na disposição dos instrumentos para viabilizar a transmissão das leituras de forma remota e a operação da plataforma VDV. Inicialmente, fez-se a

instalação de um *Datalogger*/*Modem* GPRS SC800, compatível com o *Datalogger* Campbell CR-1000 (Figura 52). Além disso, também foram adquiridos e instalados um *Simcard* com plano de dados compatível com o volume de dados transmitidos e a substituição da bateria de alimentação do sistema de 60 Ah.

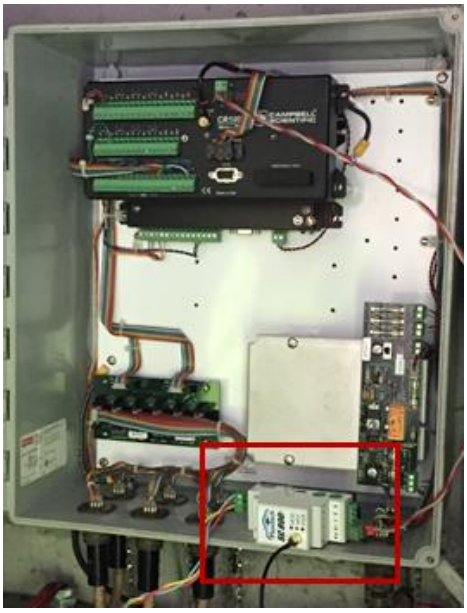


Figura 52 - Instalação *datalogger*/*modem* GPRS SC800 (vermelho)

Em complemento a isso, o pluviógrafo foi reposicionado de forma a permitir uma conexão direta com o *datalogger* CR-1000 e, consequentemente, o envio dos dados do mesmo para a plataforma de gerenciamento VDV. Para tal, o mesmo foi desinstalado e reposicionado em outro ponto da encosta, na posição apresentada na Figura 29, por meio de um suporte customizado com uma haste de 2 polegadas de diâmetro e 2 metros de comprimento em base de concreto (Figura 53). A conexão do pluviógrafo ao *datalogger* CR-1000 foi realizada com a aplicação de cabos e conectores, os quais foram devidamente instalados de forma a garantir que não haja a corrosão ou o corte dos cabos (Figura 54).



(a) (b)

Figura 53 - Realocação e fixação do pluviógrafo por meio de (a) base em concreto; (b) suporte customizado com uma haste de 2 polegadas de diâmetro e 2 metros de comprimento



Figura 54 - Conexão do pluviógrafo ao *datalogger* por meio de cabos (amarelo)

6.3.2 Visualização dos dados

Os dados da instrumentação podem ser acessados por meio do site da plataforma (*https://usa.vdvcloud.com/*), conforme observado na Figura 55.

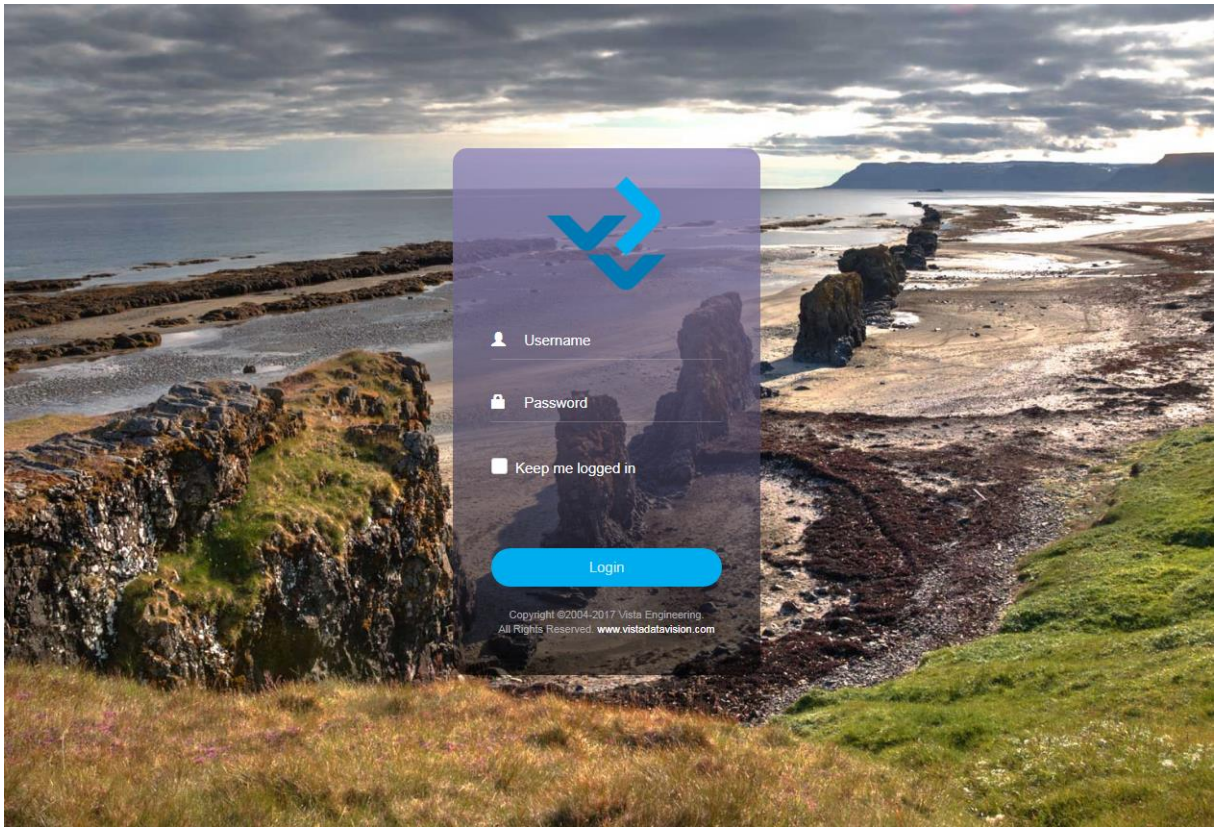
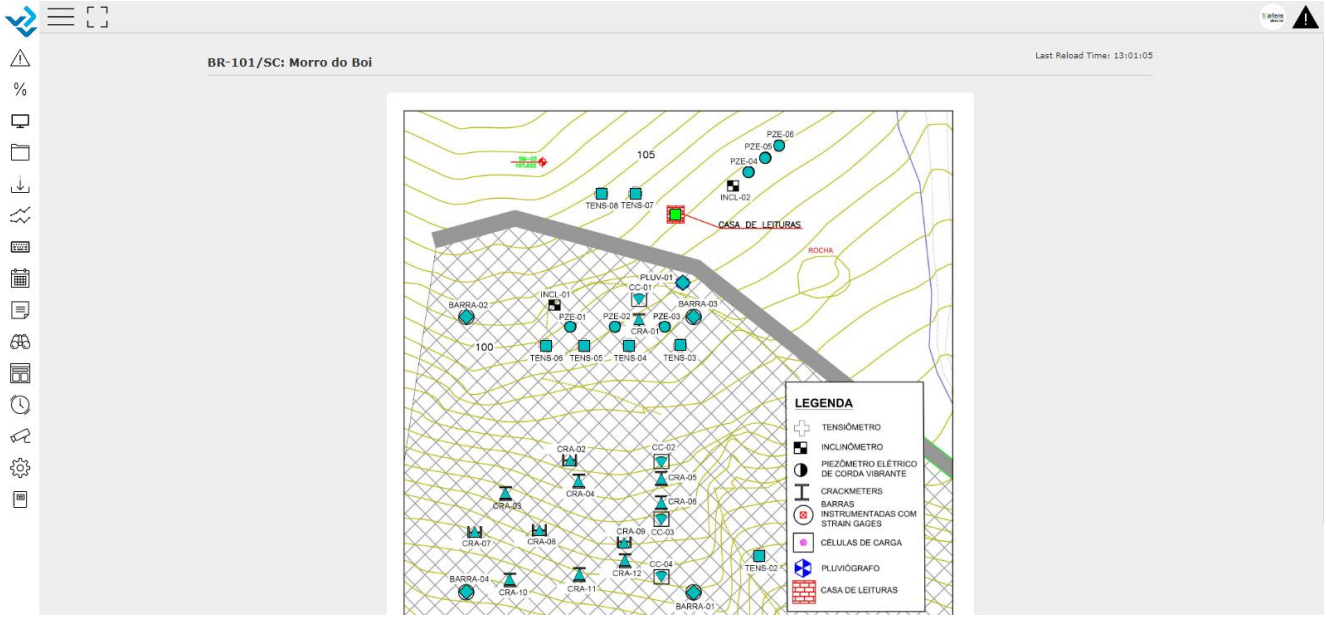


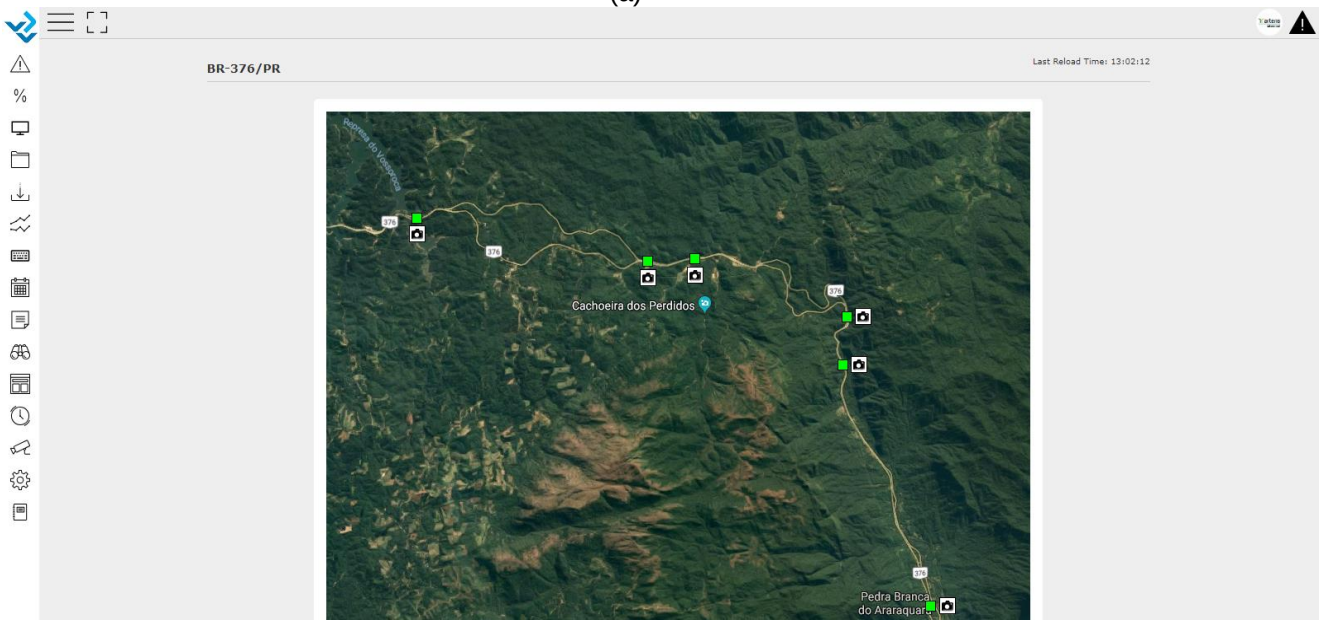
Figura 55 – Entrada na plataforma de gerenciamento de dados

A Vista Data Vision disponibiliza uma série de ferramentas e funcionalidades que buscam principalmente aperfeiçoar o acesso e a visualização das leituras de cada instrumento integrado, sendo na forma de tabelas ou de gráficos personalizáveis; permitindo melhorar o controle da condição dos equipamentos e da transmissão de dados, possibilitando a programação de alarmes e a validação de leituras; o compartilhamento de notas e documentos entre seus usuários e *download* das informações desejadas a qualquer momento.

A Figura 56 ilustra uma das formas de visualização dos dados, onde é possível verificar a última leitura registrada para cada instrumento ao passar o cursor pelo ponto desejado no croqui ou mapa de localização.



(a)



(b)

Figura 56 – Visualização em tempo real dos dados: (a) croqui dos instrumentos do Morro do Boi (BR-101/SC) e (b) mapa de localização dos postos de monitoramento da BR-376/PR

A fim de ilustrar a apresentação de dados dentro da plataforma, foi escolhido o posto pluviométrico P2, localizado no km 667+900 m, onde estão instalados um pluviógrafo e dois tensiômetros. Pode-se observar na Figura 57 o gráfico gerado para a precipitação nesse local entre os dias 2 e 9 de outubro de 2018.

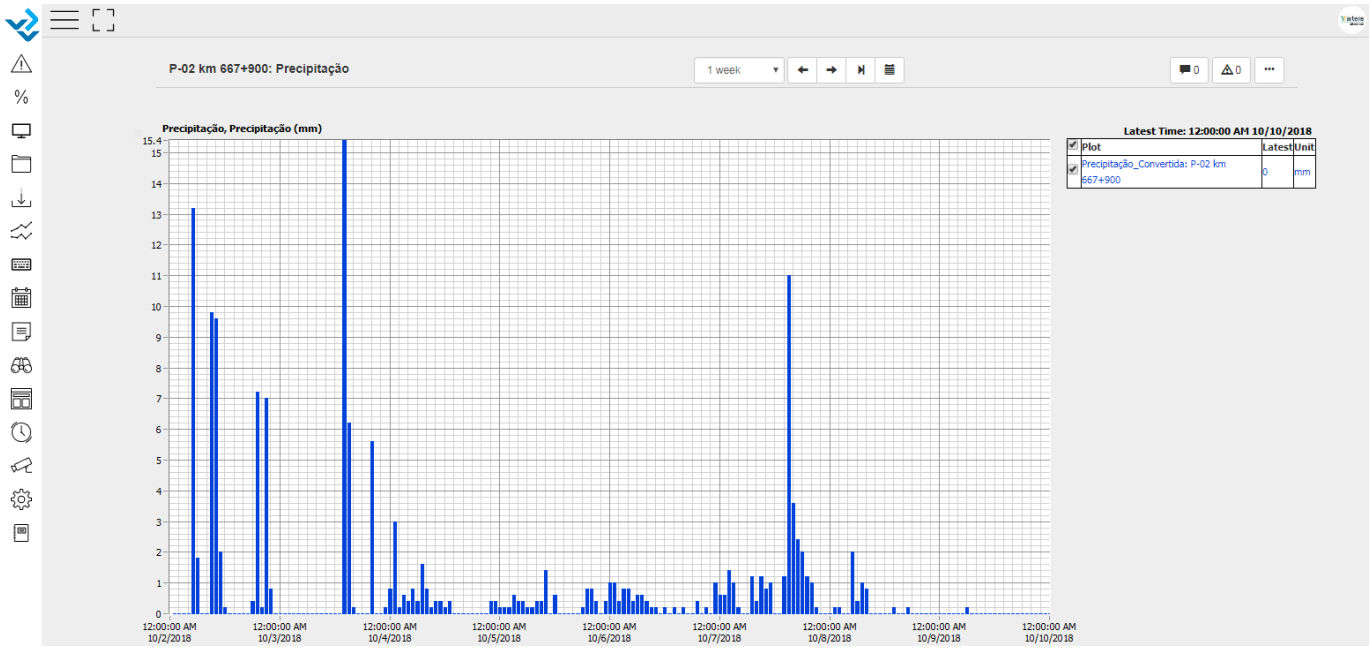


Figura 57 - Gráfico de precipitação no Posto Pluviométrico P2

Por sua vez, a Figura 58 apresenta, para o mesmo período, o gráfico referente aos tensiômetros TENS-01 e TENS-02 que se encontram nesse local, sendo representados pelas linhas em azul e vermelho, respectivamente.

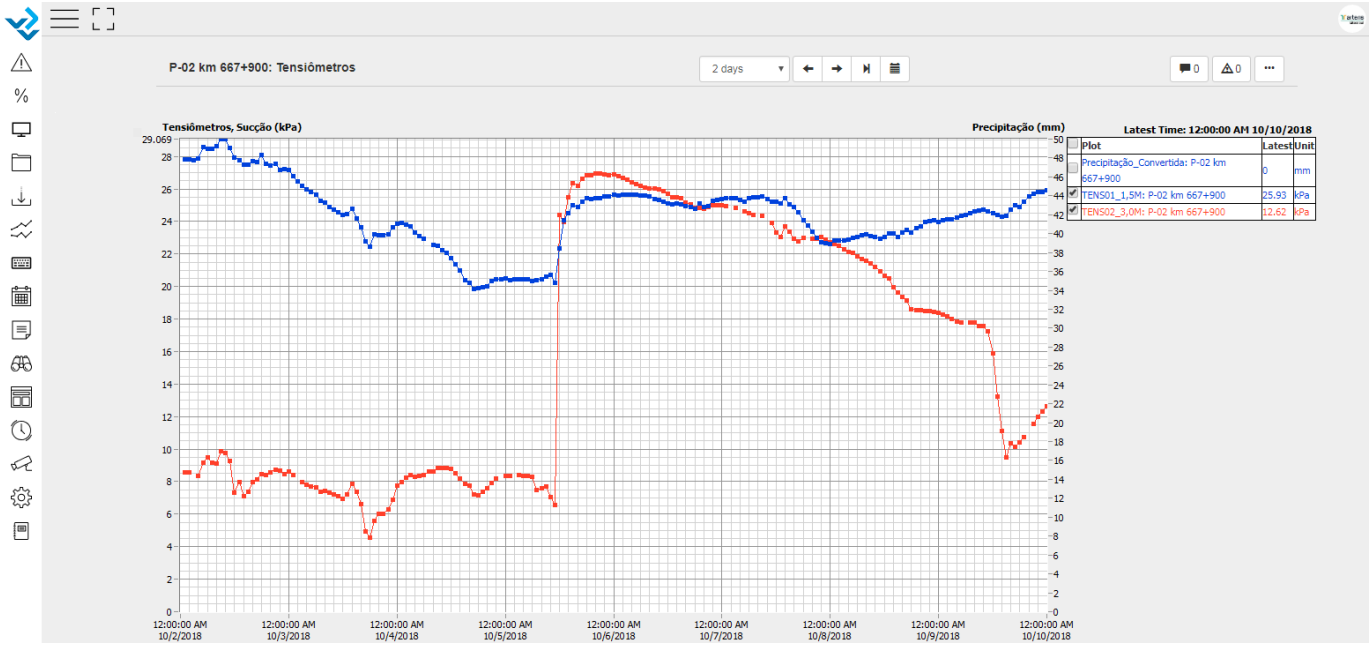


Figura 58 - Gráfico dos tensiômetros TENS-01 e TENS-02 localizados no Posto Pluviométrico P2

Durante a visualização de dados dentro da plataforma, é possível definir com facilidade o intervalo de tempo desejado e as variáveis que devem ser apresentadas, além da opção de dispor tais resultados no formato de uma tabela, se desejável. Para o caso em análise, podem-se combinar as leituras de sucção dos tensiômetros com a precipitação registrada pelo pluviógrafo, como ilustrado pela Figura 59, bem como visualizar tais dados de maneira tabelada (Figura 60).

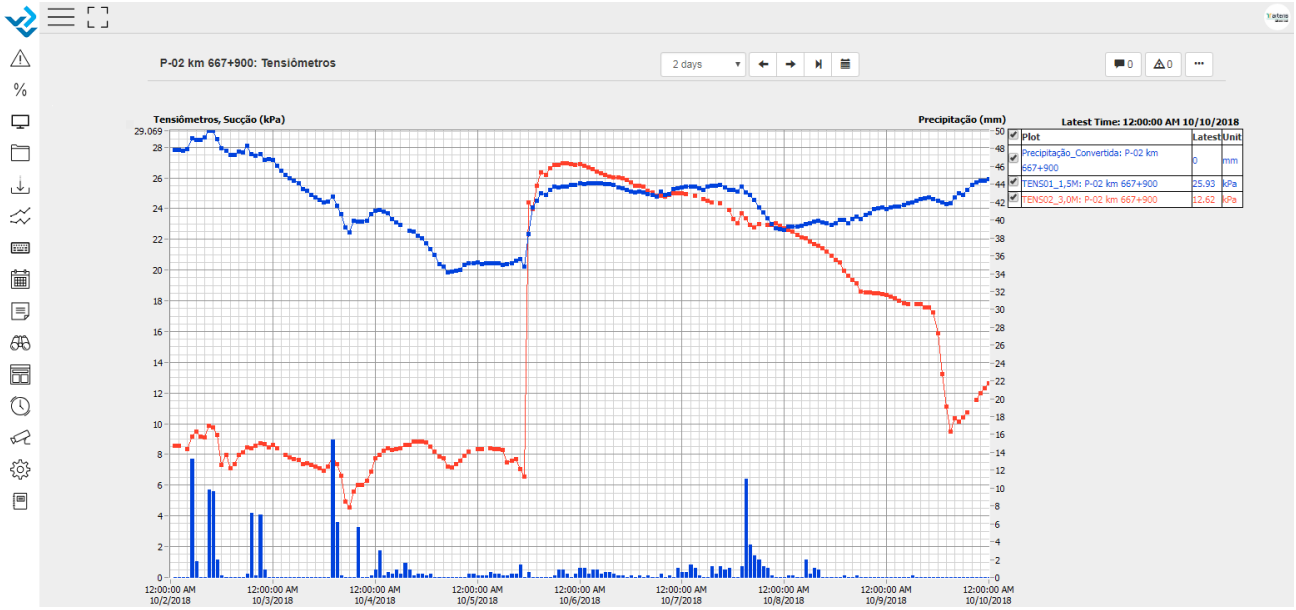
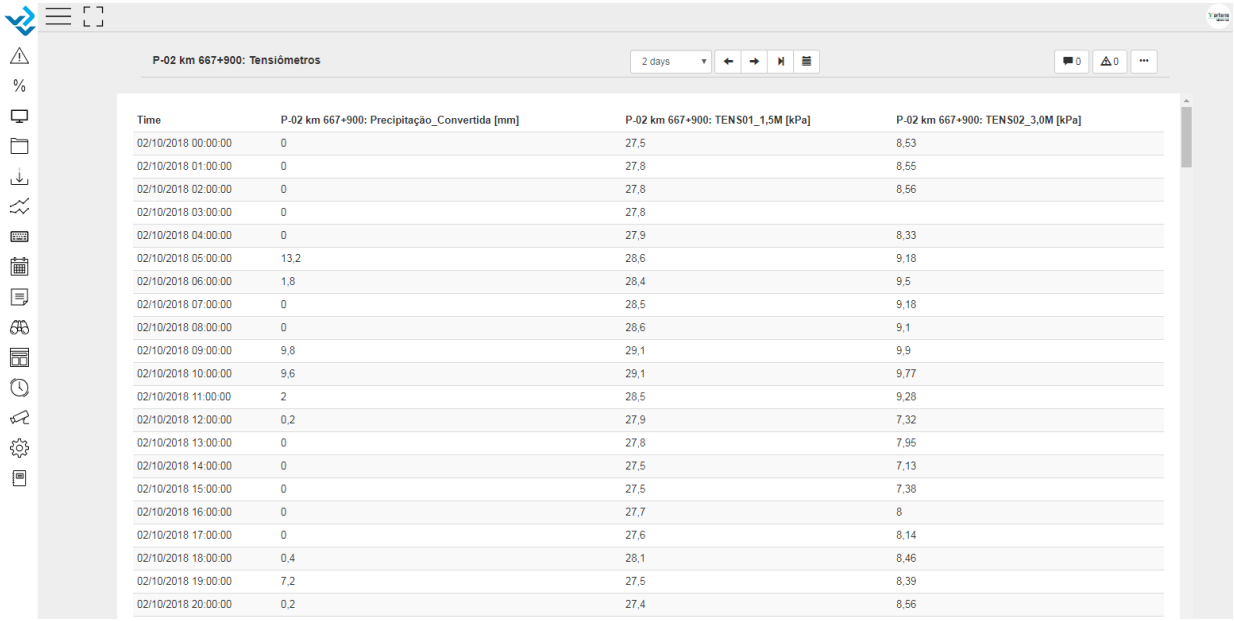


Figura 59 - Gráfico dos tensiômetros TENS-01 e TENS-02 combinados à precipitação no Posto Pluviométrico P2



Time	P-02 km 667+900: Precipitação_Convertida [mm]	P-02 km 667+900: TENS01_1,5M [kPa]	P-02 km 667+900: TENS02_3,0M [kPa]
02/10/2018 00:00:00	0	27,5	8,53
02/10/2018 01:00:00	0	27,8	8,55
02/10/2018 02:00:00	0	27,8	8,56
02/10/2018 03:00:00	0	27,8	
02/10/2018 04:00:00	0	27,9	8,33
02/10/2018 05:00:00	13,2	28,6	9,18
02/10/2018 06:00:00	1,8	28,4	9,5
02/10/2018 07:00:00	0	28,5	9,18
02/10/2018 08:00:00	0	28,6	9,1
02/10/2018 09:00:00	9,8	29,1	9,9
02/10/2018 10:00:00	9,6	29,1	9,77
02/10/2018 11:00:00	2	28,5	9,28
02/10/2018 12:00:00	0,2	27,9	7,32
02/10/2018 13:00:00	0	27,8	7,95
02/10/2018 14:00:00	0	27,5	7,13
02/10/2018 15:00:00	0	27,5	7,38
02/10/2018 16:00:00	0	27,7	8
02/10/2018 17:00:00	0	27,6	8,14
02/10/2018 18:00:00	0,4	28,1	8,46
02/10/2018 19:00:00	7,2	27,5	8,39
02/10/2018 20:00:00	0,2	27,4	8,56

Figura 60 - Representação tabelada dos dados de precipitação e sucção do Posto Pluviométrico P2

6.4 Reavaliação de áreas de risco

Além do processamento e monitoramento dos dados de instrumentação, o escopo do projeto englobou uma reavaliação de duas áreas de risco ao longo da BR-376/PR. Como parte escopo desenvolvido na etapa inicial do presente projeto, foram elaborados mapas de suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos para todo o trecho de Serra do Mar próximo à BR-376/PR (ALS, 2015). Foram definidas cinco classes: muito alta suscetibilidade, alta suscetibilidade, moderada suscetibilidade, baixa suscetibilidade e muito baixa suscetibilidade a escorregamentos. Desta forma, esta etapa buscou reavaliar as condicionantes geotécnicas e o índice de suscetibilidade de duas áreas próximas previamente mapeadas e classificadas com maior risco de ocorrência de escorregamentos.

6.4.1 Definição da área de estudo

Com base no contexto descrito e a partir da definição das áreas de maior suscetibilidade, buscou-se por meio de novas visitas a campo determinar os pontos mais críticos e com características favoráveis ao desenvolvimento de trabalhos de investigação complementar (em termos de acessibilidade e segurança). Com isso, definiu-se como áreas de estudo duas regiões próximas, uma que já apresentava uma obra de estabilização e outra ainda com características naturais, localizadas no km 667+900 m Pista Norte da BR-376/PR, junto ao pluviógrafo P2 (Figura 61), no município de Guaratuba. Tal escolha foi baseada no nível de suscetibilidade apresentado em estudos prévios (Figura 62), declividade alta (30° a 45°), histórico de movimentações e logística para acesso e execução de ensaios em campo.

As regiões estudadas possuem histórico de movimentações pretéritas onde em particular no ano de 2011, registrou-se uma ruptura com extensão de aproximadamente 130 m, comprimento transversal de até 80 m e espessura em torno de 4 m (Figura 63). Tal evento foi associado à ocorrência de um episódio de pluviosidade intensa que refletiu em movimentos de massa com mecanismos complexos de superfícies circulares compostas com superfícies planares de estruturas reliquiares (Mezzomo *et al*., 2012).

Além da compilação do histórico de movimentações, com a definição dos pontos de estudo, também foram coletadas informações prévias do local, como dados de sondagens à percussão realizadas após o evento de movimentação de 2011.

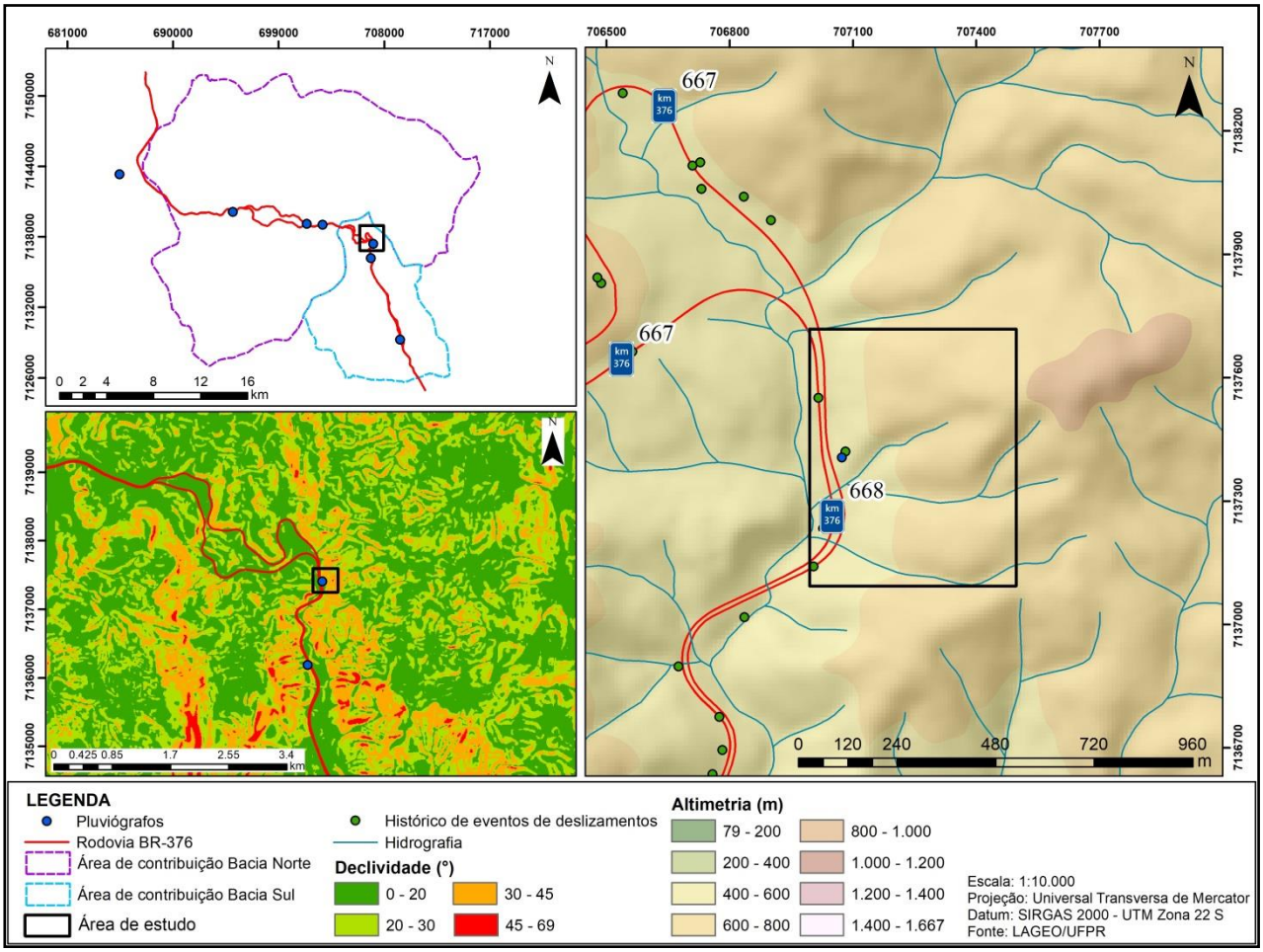


Figura 61 - Mapa de localização dos pontos de estudo para reavaliação do risco

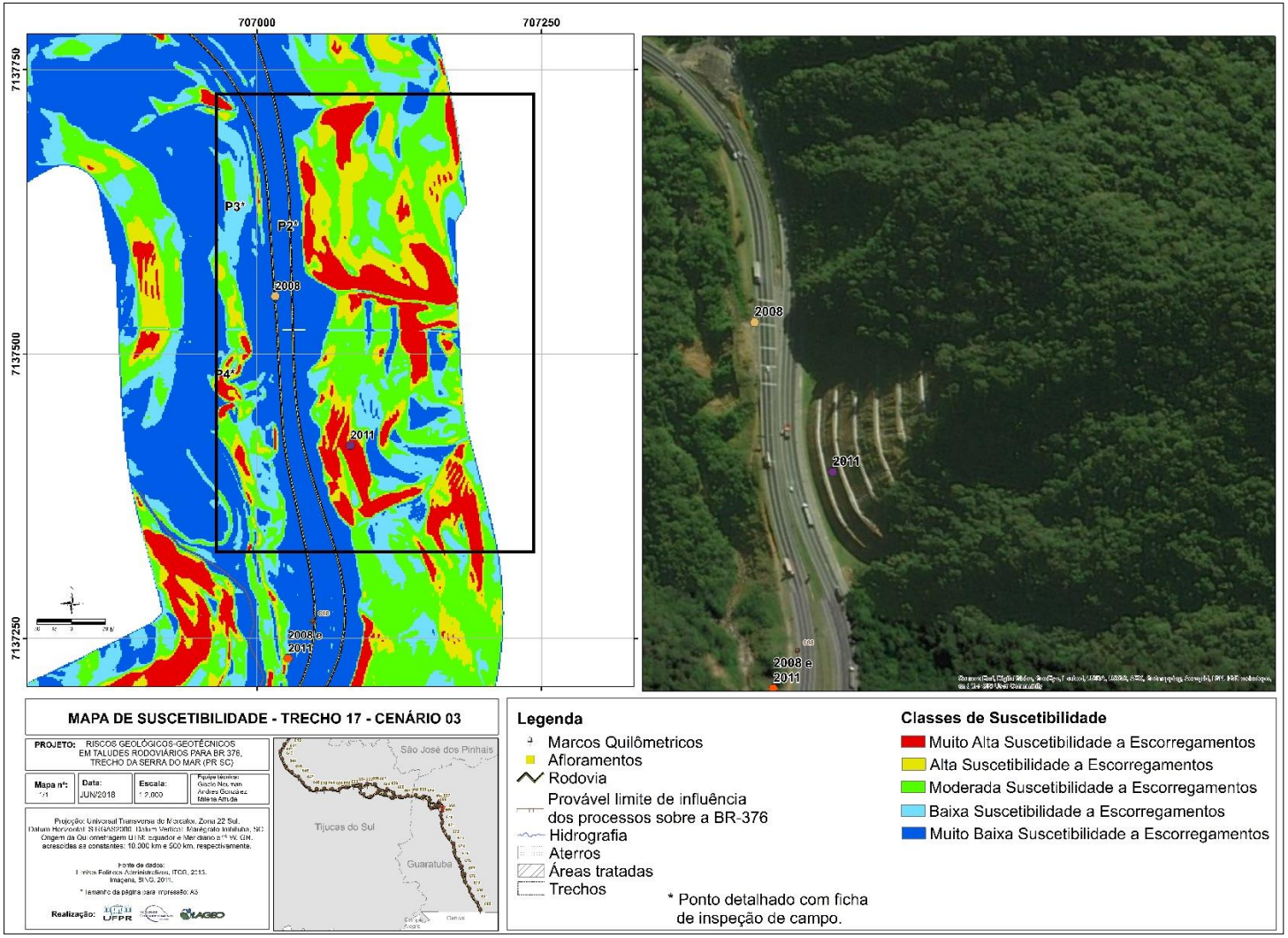


Figura 62 - Mapa de suscetibilidade das áreas de estudo. Modificado de ALS (2015)



Figura 63 - Ruptura da encosta no km 667+900 m na BR-376/PR, ano de 2011 (Mezzomo *et al*., 2012)

6.4.1.1 Contextualização geológica

De acordo com o mapa geológico da CPRM (2004), a área de estudo está inserida no Complexo Granulítico Santa Catarina, estando ainda classificada pelo mapa geológico da Mineropar (2005) como pertencente ao Complexo Gnáissico-Migmatítico. Para o presente projeto, adotou-se nomenclatura descrita pela CPRM (2004). Segundo Basei *et al*. (2009), o embasamento do Cráton Luís Alves é constituído por rochas migmatíticas-gnáissicas-graníticas (Paleoproterozóicas), cuja história remete ao Arqueano. Já a cobertura Neoproterozóica é constituída por bacias vulcano-sedimentares e granitóides alcalinos a peralcalinos tipo A. O embasamento, incluído no Complexo Granulítico Santa Catarina, é descrito com frequência como ortognaisse caracterizado por alternância de bandas milimétricas a centimétricas de quartzo e feldspato e máficas, compostas por anfibólio, piroxênio e biotita, cinza-esverdeadas, geralmente leuco-mesocráticas e de granulação fina a média (Fugro, 2019).

O metamorfismo é caracterizado pela fácies granulito, indicada pela presença de hiperstênio nas rochas máficas e biotita marrom, plagioclásio sódico anti-pertítico e texturas poligonalizadas nas rochas félsicas. Um segundo evento metamórfico retrógrado é identificado como pertencente da fácies anfibolito e um terceiro da fácies xisto verde ao longo das zonas de cisalhamento.

De acordo com Basei *et al*. (2009), a porção sul do Complexo é caracterizada pela presença de gnaisses e migmatitos biotita-anfibólio gnaisses, migmatito com mesossomo biotítico e leucossoma granítico rosa, além de granitos biotita porfiríticos e leucogranitos rosados milonitizados. Os migmatitos classificados localmente em corpos alongados de leucogranitos e granitos holoeucráticos são foliados, com granulação média e textura granoblástica. A foliação gnáissica é a estrutura principal, visível em praticamente todos os afloramentos do domínio e geralmente com uma orientação N30E/51NW (Fugro, 2019).

Com relação à geologia estrutural, a região de estudo apresenta regimes de falhas e zonas de cisalhamento, com rochas produtos desta tectônica rúptil e dúctil. A foliação principal (Sn) apresenta, segundo Siga Júnior (1995), direções NE-SW, NW-SE com mergulhos para sudeste, nordeste e noroeste (Fugro, 2019).

6.4.2 Plano de investigação geológico-geotécnica

A partir da escolha das áreas de estudo, propôs-se a reavaliação das condicionantes geotécnicas e do índice de suscetibilidade no km 667+900 m na BR-376/PR por meio de investigações complementares de campo. O escopo de trabalho compreendeu a aplicação de diferentes métodos de investigação indireta e direta e foi realizado em duas áreas próximas de forma que pudesse abranger um plano mais denso com relação à quantidade e extensão das linhas geofísicas. As investigações indiretas envolveram a combinação dos métodos geofísicos de eletrorresistividade e sísmica de refração. A geofísica tem sido amplamente utilizada em estudos de estabilidade de taludes, sendo a aplicação combinada de dois métodos geofísicos também descrita por muitos autores como uma ferramenta muito útil para a obtenção de informações em áreas sujeitas a movimentações de massas (e.g. Jongmans e Garambois, 2007; Bichler *et al*., 2004; Bekler *et al*., 2011; Shan *et al*., 2014).

Shan *et al*. (2014) descrevem como limitações da aplicação de ensaios geofísicos as diferentes interpretações que podem ser geradas a partir de seus resultados. Contudo, tais problemas podem ser minimizados por meio da aplicação de mais de um método de ensaio, em que a limitação de um método é compensada pelo outro. Bekler *et al*. (2011) afirmam que a combinação dos métodos de eletrorresistividade e de sísmica de refração representa uma ferramenta muito eficaz na determinação da geometria e da superfície de ruptura de um deslizamento, assim como na diferenciação de formações saturadas e não saturadas.

O método de sísmica de refração baseia-se basicamente na captação em superfície de ondas sísmicas refratadas em profundidade nas interfaces entre materiais com diferentes valores de velocidade de propagação de ondas. Tais ondas são geradas por uma fonte sísmica, sendo neste projeto utilizada uma marreta de 10 kg que gerou uma onda por meio do impacto sobre uma placa metálica em contato com o solo (Figura 64). Este método geofísico, além de definir as velocidades de propagação das ondas nos diferentes materiais, permite ainda a determinação da espessura das camadas presentes na subsuperfície. Ademais, o método de sísmica de refração também permite obter a distribuição de feições estruturais da rocha, estimar a profundidade do lençol freático e mapear fraturas no maciço rochoso.

A identificação dos materiais na subsuperfície leva em conta que a velocidade de propagação é dependente das diferentes propriedades destes materiais, tais como: densidade, litologia, porosidade, saturação dos poros, entre outros. Dessa forma, diferentes solos e rochas apresentam velocidades de propagação de onda em um intervalo de valores (Kearey *et al*., 2002).



Figura 64 - Fonte sísmica marreta de 10 kg sobre placa metálica

Na prática, o ensaio mede o tempo de propagação das ondas geradas pela fonte até um conjunto de sensores denominados de geofones, quando instalados em terra, e hidrofones, quando instalados na água, os quais são dispostos ao longo de uma linha (perfil). O registro dos dados é feito por meio de um sismógrafo, que capta os sinais detectados pelos sensores e os armazena digitalmente (Silva, 2011). Para o registro dos dados foi utilizado um sismógrafo digital de 24 canais e 16 bits de resolução, com conexão para os cabos de energização e cabos de transmissão multipolares (Figura 65).



Figura 65 - Sismógrafo conectado aos cabos de energização (preto) e de instalação dos geofones (amarelo)

Vale ressaltar que o espaçamento entre os sensores instalados ao longo do perfil é definido de acordo com o detalhamento requerido para o projeto. A geometria convencional do perfil de sísmica de refração executada em campo é apresentada na Figura 66.

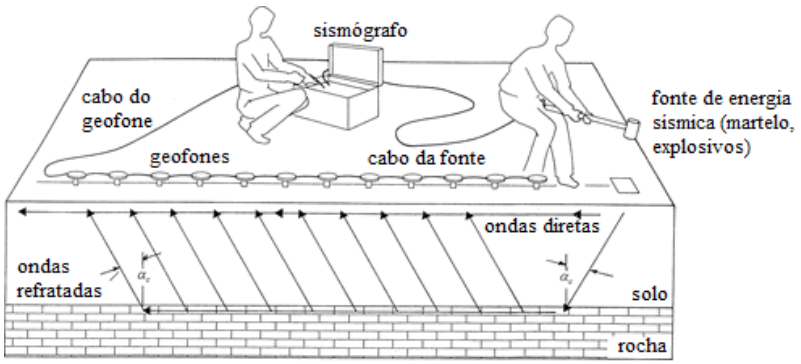


Figura 66 - Desenho esquemático dos equipamentos aplicados no ensaio de sísmica de refração. Modificado de ASTM D5777-00 (2011)

A campanha programada neste projeto compreendeu a execução de 2,86 km lineares de aquisição sísmica (4 linhas longitudinais e 4 linhas transversais à rodovia). O arranjo dos sensores (Figura 67) se deu em série e composto por duas linhas com 12 geofones cada. O espaçamento aplicado entre os sensores foi de 5 metros para a linha LH-05 e de 10 metros para o restante das linhas. Essa modificação foi efetuada com base nos dados prévios obtidos e à otimização da campanha de ensaios.



(a) (b)

Figura 67 - (a) Sensor ou geofone; (b) Geofone cravado no solo e conectado ao cabo por garras elétricas

Um resumo com os comprimentos executados e as profundidades máximas alcançadas para cada linha no ensaio de sísmica de refração são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Quantitativo da campanha de sísmica de refração

Linha	Comprimento (m)		Profundidade (m)
	Programado	Executado	
LH-01	190	190	32,00
LH-03	190	190	40,00
LH-04	380	380	30,00
LH-05	350	350	45,00
LV-01	460	460	28,00
LV-02	440	440	40,00
LV-03	440	440	35,00
LV-04	410	410	50,00
Total	2860	2860	300,00

O método da eletrorresistividade baseia-se na resistividade elétrica dos materiais e leva em consideração que estes apresentam propriedades elétricas dependentes de suas características físicas e químicas tais como: mineralogia, arranjo dos espaços vazios, textura, salinidade e teor de umidade. Desta forma, existem faixas de valores da resistividade apresentadas por diferentes solos e rochas (Figura 68), as quais variam de acordo com as composições, estado físico, presença de falhas e fraturas e grau de saturação do meio. O método permite a determinação da distribuição da resistividade dos materiais em subsuperfície, além da delimitação das diferentes camadas e descontinuidades (Samouelian *et al*., 2005; Kearey *et al*., 2002).

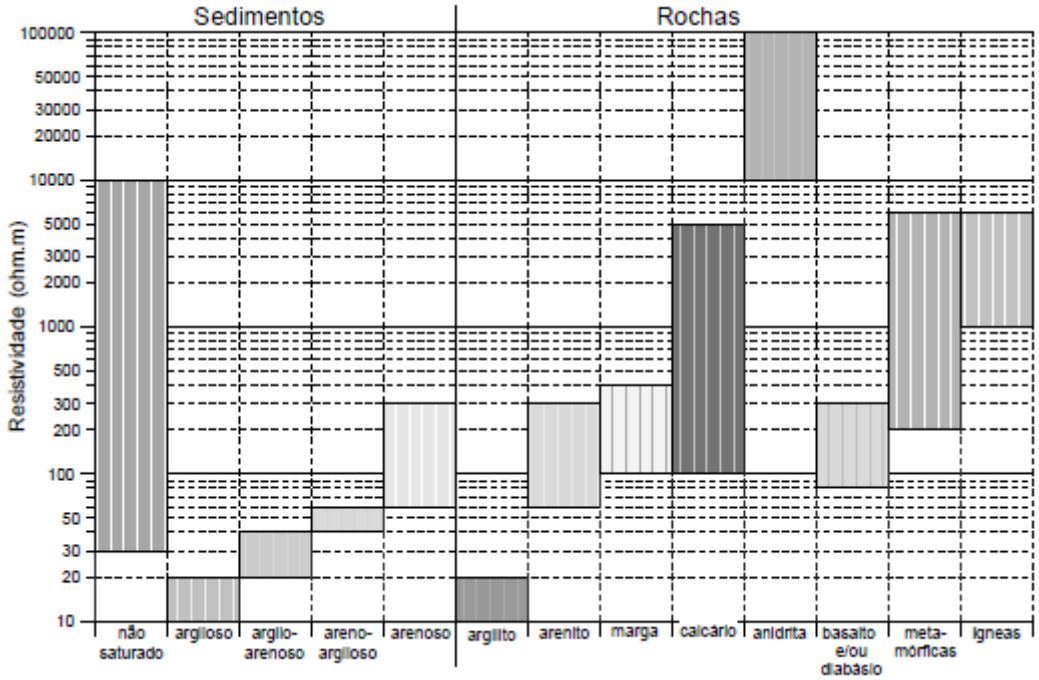


Figura 68 - Faixas de variações de resistividade de diferentes rochas e solos (Braga, 2006)

Na prática, destacam-se basicamente duas técnicas de aquisição dos dados: a sondagem elétrica e o caminhamento elétrico. As sondagens são mais aplicadas para a obtenção de informações pontuais com variação vertical da resistividade, enquanto que o caminhamento elétrico é aplicado para identificar a variação lateral da resistividade a uma profundidade constante.

O ensaio é feito por meio da inserção de energia no terreno com o emprego de eletrodos (Figura 69) para injeção de corrente, denominados de A e B. A medida da diferença de potencial é feita por eletrodos denominados de M e N. Para cada uma das técnicas são adotados diferentes procedimentos de ensaio, os quais são também denominados de arranjos de campo. Diferentes arranjos podem ser aplicados variando-se a posição dos eletrodos. Dentre as configurações mais utilizadas, destacam-se os tipos Wenner, Wenner-Schlumberger e dipolo-dipolo (Borges, 2002). Como resultado desse método de ensaio são obtidas pseudo-seções de resistividade, as quais são processadas por meio de *softwares*.



Figura 69 - Eletrodo conectado ao cabo por garras elétricas

A programação do ensaio geofísico de eletrorresistividade seguiu os mesmos caminhamentos do ensaio de sísmica de refração, compreendendo, contudo, uma extensão de 4,86 km. O arranjo aplicado foi do tipo dipolo-dipolo (Figura 70) com distância geométrica entre eletrodos de 5 metros.

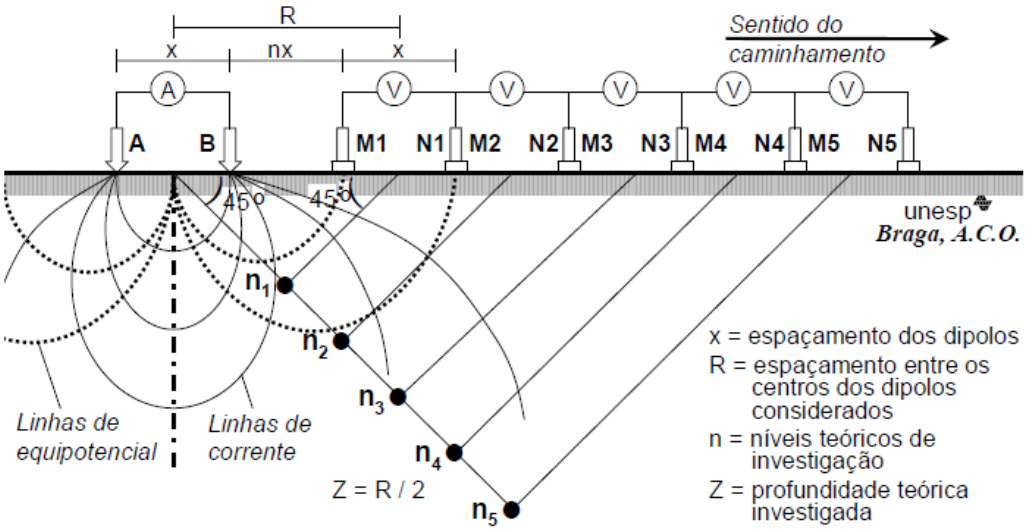


Figura 70 - Arranjo dipolo-dipolo em caminhamento elétrico (Braga 2006)

Além dos eletrodos, os equipamentos utilizados no ensaio de eletrorresistividade foram: resistivímetro multieletrodo Syscal Switch Pro 48 canais (IRIS Instruments), cabos de transmissão multipolares de alta impedância, unidade de armazenamento e bateria (Figura 71).

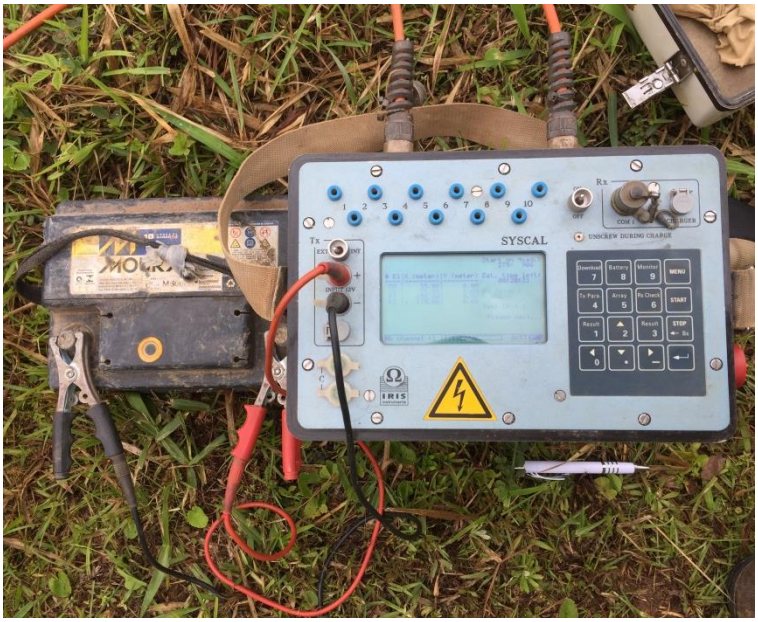


Figura 71 - Resistivímetro conectado à bateria para alimentação do sistema de ensaio

Um resumo com as extensões de cada caminhamento executado por meio da técnica de eletrorresistividade, assim como as respectivas profundidades máximas adquiridas na região central dos arranjos é apresentado na Tabela 15. As normas aplicadas na execução dos ensaios geofísicos foram: NBR 15935 (2011) e NBR 7117 (2012).

Tabela 15 - Quantitativo da campanha de eletrorresistividade

Linha	Comprimento (m)		Profundidade (m)
	Programado	Executado	
LH-01	235	235	57,90
LH-03	355	355	52,40
LH-04	470	470	52,40
LH-05	475	475	57,90
LV-01	475	475	57,90
LV-02	475	465	52,40
LV-03	450	450	57,90
LV-04	465	465	57,90
Total	3400	3390	446,70

Com o objetivo de auxiliar na interpretação dos resultados de geofísica, foram realizadas 6 sondagens verticais DPL (penetrômetro dinâmico leve) com profundidade de até 12 metros cada, além de três sondagens mistas. Diversos autores (Braga *et al.,* 1999; Israil e Pachauri, 2003; Samouëlian *et al.,* 2005; Cosenza *et al.,* 2006; Sudha *et al.,* 2009) descrevem que a combinação dos dados de geofísica e das sondagens diretas permite uma melhor caracterização geológico-geotécnica da área de estudo.

O ensaio com DPL é executado por meio de um equipamento leve e simples permitindo assim sua aplicação em áreas de difícil acesso, com relevo acidentado, florestas e áreas inundadas. O equipamento é composto por hastes-guia, cabeça de bater, hastes, martelo, coxins e ponteira cônica. Não existem normas brasileiras relacionadas a este ensaio estando, portanto, a padronização do equipamento e normatização do procedimento executivo baseada em referências internacionais como a ISSMFE (1989), DIN 4094-3 (1990), EN ISO 22476-2 (2005) e ASTM D4633-10. O ensaio é utilizado na determinação da estratigrafia, nível da água, topo rochoso e resistência do solo, sendo seus resultados apresentados por meio de gráficos da relação do número de golpes com a profundidade. O ensaio consiste na cravação dinâmica de um cone metálico por meio de golpes aplicados por um martelo de 10 kg a uma queda de 50 cm. O número de golpes necessários para a cravação de 10 cm do cone no solo

é anotado em planilha como N_{10}. Por fim, ressalta-se que é recomendada a execução do ensaio a uma profundidade máxima de 12 metros (Bastos, 2016).

As profundidades máximas alcançadas em cada um dos furos de sondagem, assim como as suas respectivas coordenadas (Datum SIRGAS 2000, Fuso 22S) estão apresentadas na Tabela 16. Os furos 01 e 05 foram deslocados para o lado e duplicados, pois o furo inicial não apresentou uma profundidade significativa.

Tabela 16 - Resumo dos furos de sondagem DPL (Fugro, 2019)

Furo	Profundidade (m)	Coordenadas		Cota (m)
		Norte	Leste	
DPL-01	0,30	7137533,30	707186,40	602,76
DPL-01A	2,40	7137545,27	707186,22	602,49
DPL-01B	6,20	7137555,82	707186,35	609,51
DPL-02	4,70	7137338,47	707110,94	539,54
DPL-03	9,40	7137685,86	707073,67	581,81
DPL-04	7,10	7137347,39	707216,00	614,92
DPL-05	3,10	7137477,62	707377,42	701,81
DPL-05A	5,90	7137482,21	707376,79	704,00
DPL-06	12,00	7137581,38	707002,80	542,46

Já as sondagens mistas (Figura 72), compostas por sondagens à percussão (SPT) e sondagem rotativa, permitem a descrição do perfil estratigráfico com a retirada de amostras deformadas a cada metro, classificadas de forma tátil-visual. Além disso, possibilitam a determinação do nível de água e do índice de resistência do solo N_{SPT}. A sondagem SPT foi dada como encerrada ao ser atingido o impenetrável à percussão, segundo a NBR 6484 (2001). Com relação a normatização, também foi aplicada a norma NBR 6502 (1995) e o manual de sondagens da ABGE (2013).



Figura 72 - Composição do ensaio de sondagem mista montada na posição do ensaio SM-01

Posteriormente, as sondagens rotativas foram iniciadas com uso de água e os testemunhos de sondagem de rocha obtidos foram armazenados para descrição geológica. Destaca-se que na sondagem rotativa o equipamento era composto por um barrilete duplo giratório de 2 metros com coroa diamantada e calibrador com mola retentora (Figura 73). O diâmetro do furo para a sondagem SM-01 apresentou tamanho NW e para as sondagens SM-01A e SM-02 tamanho HW.



(a) (b)

Figura 73 - (a) Coroa diamantada; (b) barrilete duplo

As amostras deformadas coletadas foram armazenadas em sacos plásticos com identificação e os testemunhos de sondagem foram armazenados em caixas de plástico (Figura 74).



(a) (b) (c)

Figura 74 - (a) Amostra de solo coletada em amostrador padrão, (b) Amostras deformadas armazenadas em sacos plásticos com identificação, (c) Testemunho armazenado em caixa de plástico

As profundidades máximas alcançadas em cada um dos 3 furos de sondagem, assim como as suas respectivas coordenadas (Datum SIRGAS 2000, Fuso 22S) estão apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Resumo dos furos de sondagem (Fugro, 2019)

Furo	Profundidade (m)	Coordenadas		Cota	N.A. 24h (m)
		Norte	Leste		
SM-01	20,00	7137433,74	707079,84	552,42	10,55
SM-01A	12,02	7137436,75	707079,84	552,42	Seco
SM-02	17,20	7037495,18	707150,01	597,01	12,58

Uma planta com o plano de investigação executado completo incluindo as linhas de caminhamento geofísico e as sondagens executadas na encosta do km 667+900 m é apresentada na Figura 75.

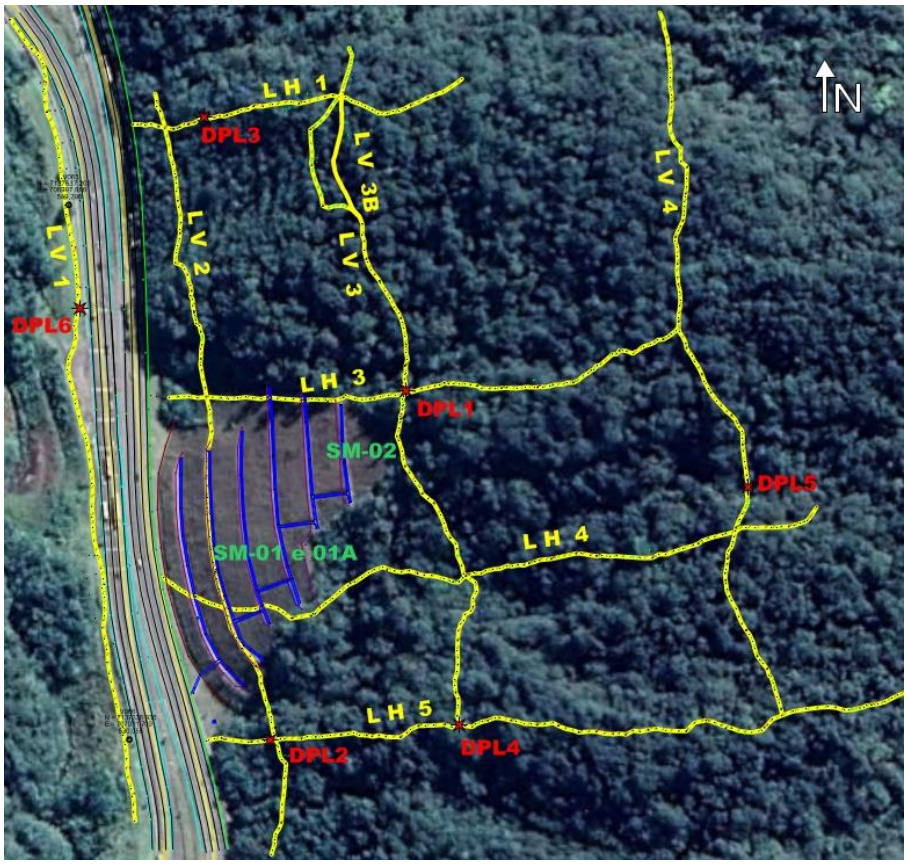


Figura 75 - Plano de investigação executado completo, caminhamentos geofísicos (amarelo), sondagens mistas (verde) e DPL (vermelho)

6.4.3 Interpretação dos resultados do plano de investigação geotécnica

Nos itens subsequentes serão apresentadas análises dos resultados obtidos com base nos ensaios geofísicos de sísmica de refração e eletrorresistividade em conjunto com os perfis obtidos por meio das sondagens. Em complemento, também é apresentada uma análise estrutural do maciço rochoso presente na encosta.

6.4.3.1 Sísmica de refração

Os resultados do ensaio de sísmica de refração foram interpretados com base na correlação entre as velocidades de propagação das ondas nos diferentes materiais geológicos, conforme mostra a Figura 76. Ressalta-se que as variações da velocidade para uma mesma litologia se devem aos diferentes graus de alteração da rocha. O gnaisse, por exemplo, pode apresentar uma velocidade inferior a 1.500 m/s quando muito alterado, por exemplo (Fugro, 2019). As seções sísmicas geradas para cada um dos caminhamentos geofísicos encontram-se apresentadas no Apêndice 12.

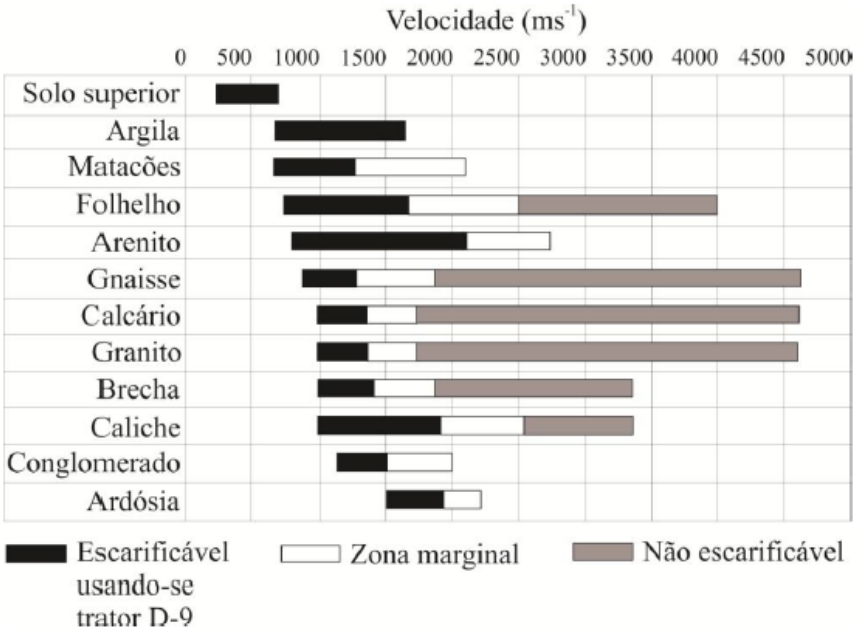


Figura 76 - Variação da velocidade de propagação da onda P e da escarificabilidade para cada litologia (Kearey *et al*., 2009)

A seguir são descritas as seções obtidas para cada linha geofísica, com destaque para os três principais trechos identificados. O primeiro trecho, situado em maiores profundidades, compreende velocidades de propagação da onda P elevada, a partir de 2,3 km/s (Figura 77). Tais valores são classificados na literatura como pertencentes a rochas pouco alteradas dentro do grupo granito-gnaisses (Fugro, 2019).

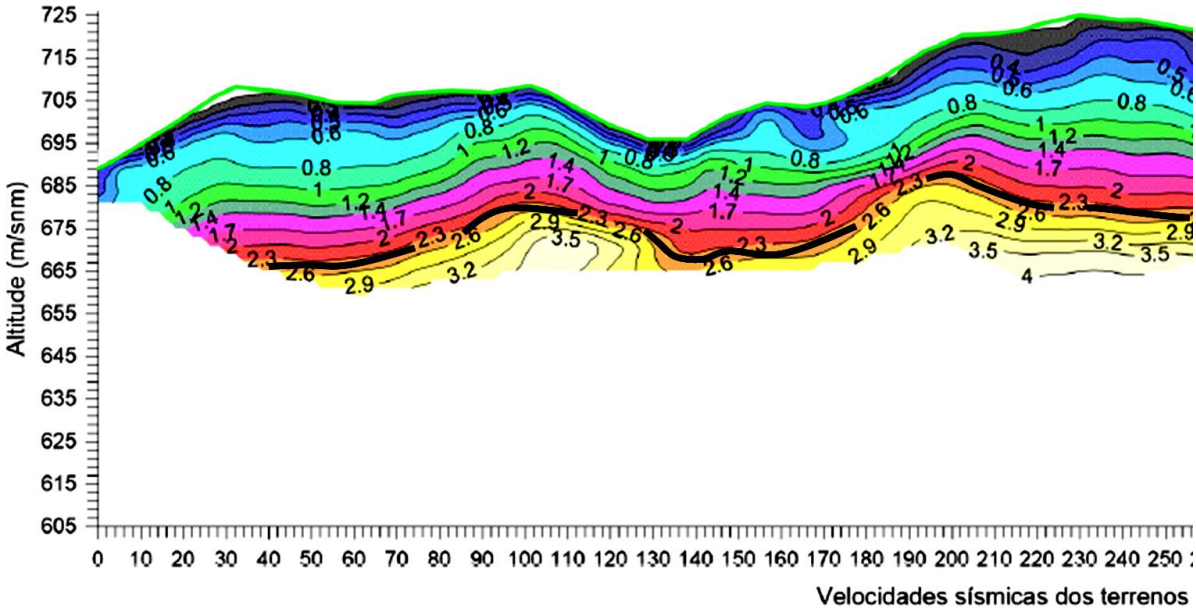


Figura 77 - Destaque para o primeiro trecho sísmico, seção da linha LV-04 (Fugro, 2019)

O segundo trecho, localizado nas cotas medianas do terreno, compreendeu velocidades intermediárias (entre 0,6 e 1,2 km/s) (Figura 78). Tais valores podem ser associados à presença de solos residuais e/ou saprólitos. Por fim, o terceiro trecho, localizado superficialmente no terreno, foi caracterizado por velocidades baixas entre 0,2 e 0,6 km/s (Figura 79), podendo sugerir a presença de solos inconsolidados, depósitos de tálus e/ou solos coluvionares (Fugro, 2019).

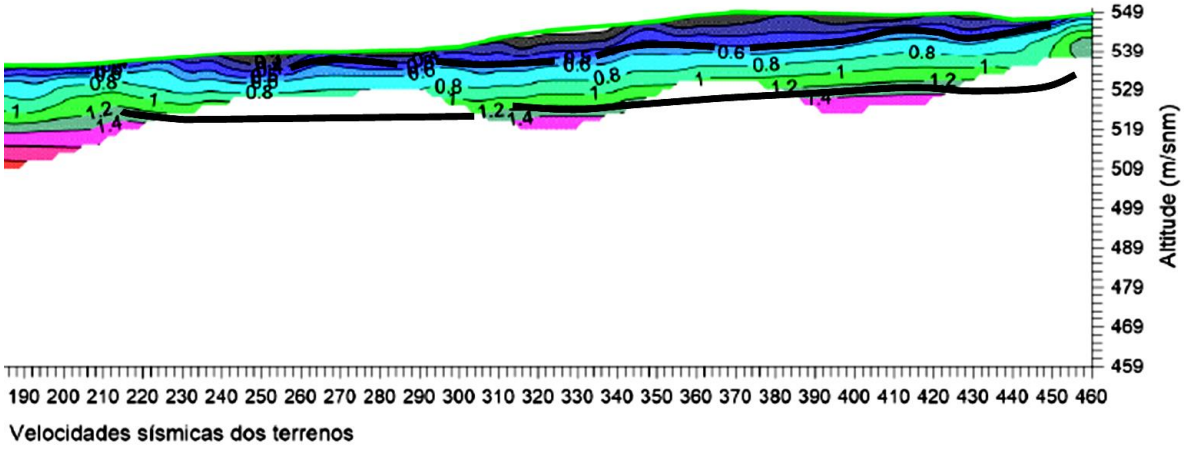


Figura 78 - Destaque para o segundo trecho sísmico, seção da linha LV-01 (Fugro, 2019)

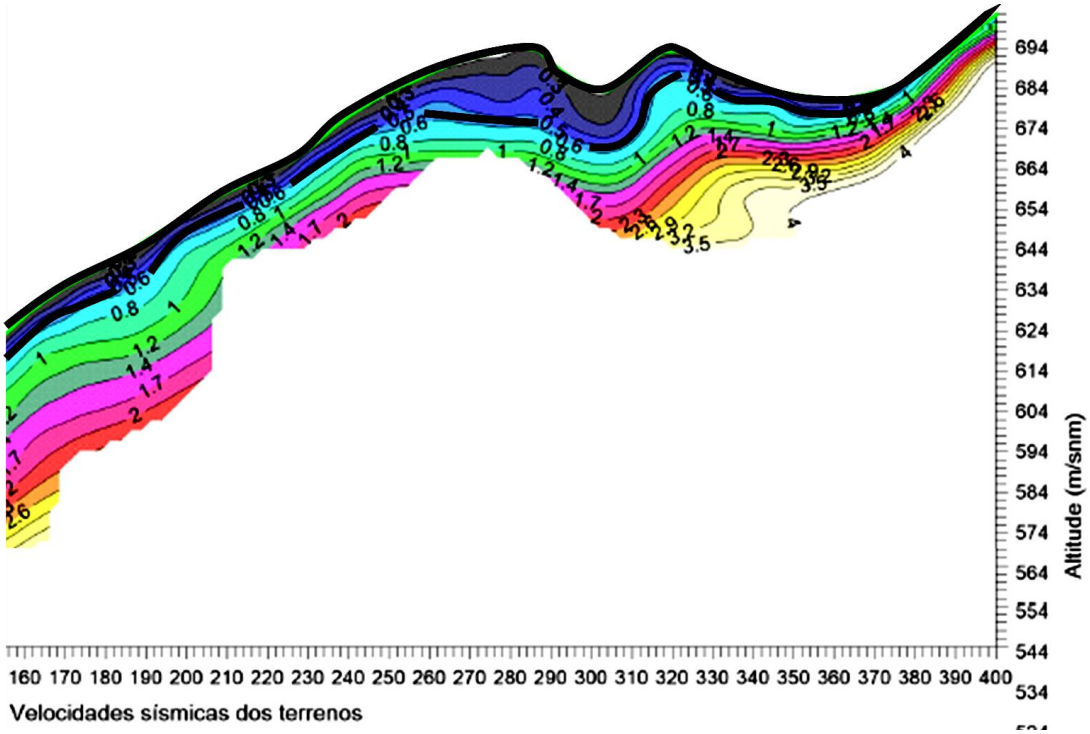


Figura 79 - Destaque para o terceiro trecho sísmico, seção da linha LH-05 (Fugro, 2019)

6.4.3.2 Eletrorresistividade

A interpretação dos resultados obtidos foi baseada na Figura 80, a qual apresenta uma associação entre os valores de resistividade (Ohm.m) e as suas principais causas e variações dentro da litologia brasileira. Destaca-se, contudo, que esta correlação não pode ser utilizada como balizamento definitivo das informações, uma vez que apresenta pontos de sobreposição e ambiguidade (Fugro, 2019). As seções de cada um dos

caminhamentos geofísicos executados encontram-se no Apêndice 13. As projeções tridimensionais das seções de caminhamento executados, bem como o modelo tridimensional gerado, encontram-se nos Apêndices 14 e 15.

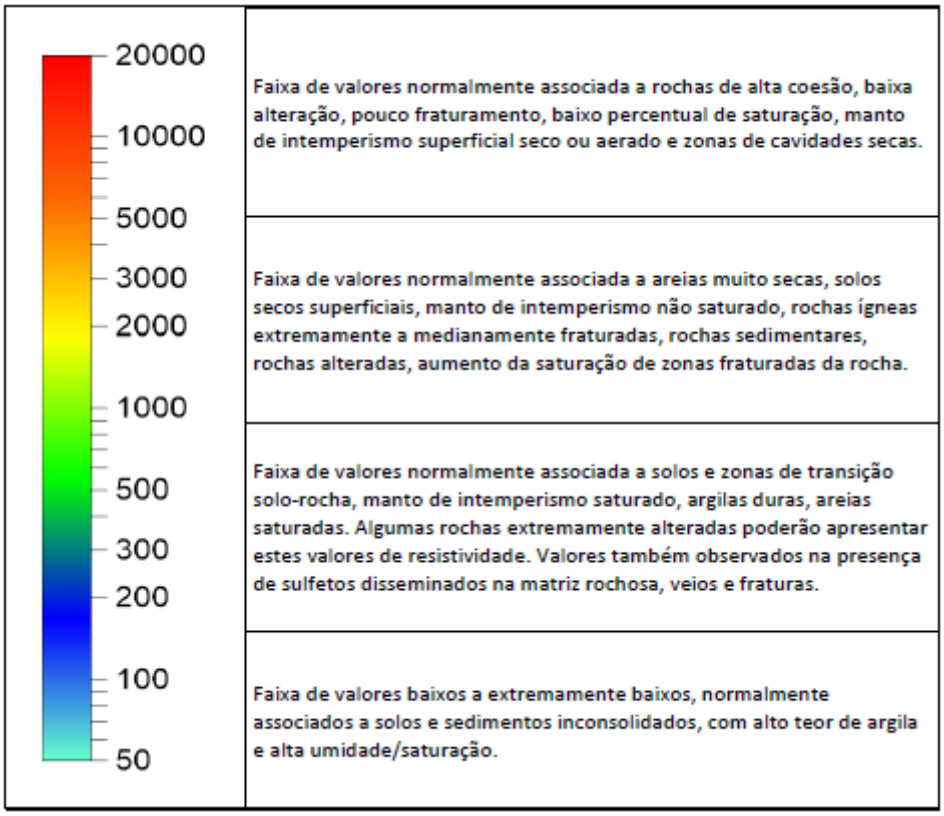


Figura 80 - Associação dos valores de resistividade (Ohm.m) e suas causas mais comuns (Fugro, 2019)

Foram observados cinco trechos principais de comportamentos distintos ao longo dos perfis de caminhamento eletrorresistivo executados. O primeiro foi identificado em maiores profundidades e apresentou alta resistividade, conforme destacado na Figura 81 para o perfil da linha LH-01. Tais valores elevados de resistividade estão normalmente associados a rochas alteradas a sãs ou zonas extremamente secas. O segundo foi identificado nas porções superficiais das seções, com resistividade variável e tendência de picos de alta resistividade, como mostra a Figura 82 referente a linha LV-04. Tais valores podem estar associados a presença de solos coluvionares, uma concentração

maior de areia, menor saturação do solo, blocos de rochas ou zonas de rocha menos alteradas (Fugro, 2019).

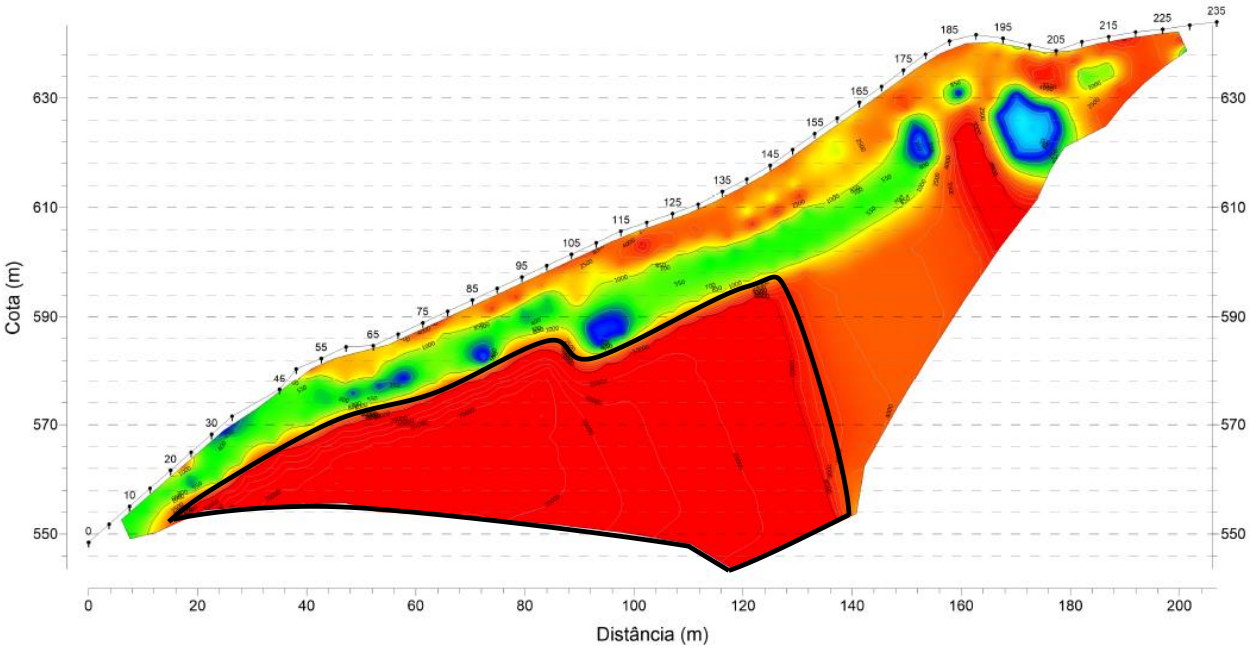


Figura 81 - Trecho de alta resistividade destacado na seção elétrica da linha LH-01 (Fugro, 2019)

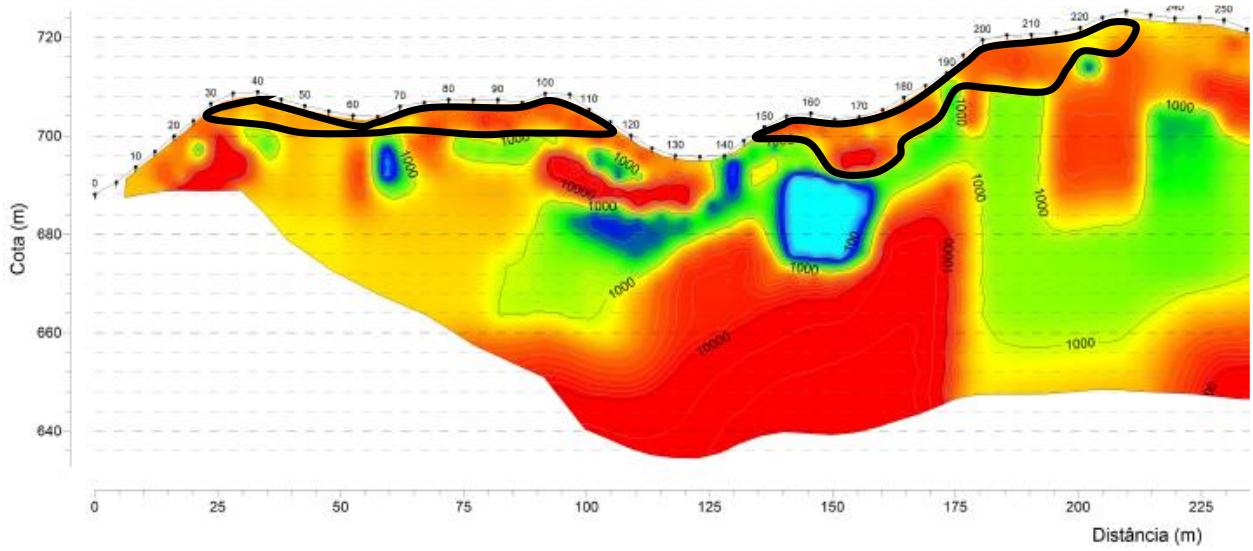


Figura 82 - Trecho de resistividade variável com tendência de picos de alta resistividade destacado na seção elétrica da linha LV-04 (Fugro, 2019)

Uma terceira zona predominante nos perfis foi identificada em camadas intermediárias com baixa a média resistividade (Figura 83). Estas características podem estar associadas a presença de solo residual, água nas fraturas da rocha ou maior quantidade de argila no solo/sistema de fraturas. O quarto trecho foi classificado por

apresentar baixos valores de resistividade (Figura 84), indicando alta condutividade e uma possível presença de uma região saturada dentro do solo com argila ou alteração mineralógica da rocha constituída por metais condutivos disseminados (Fugro, 2019).

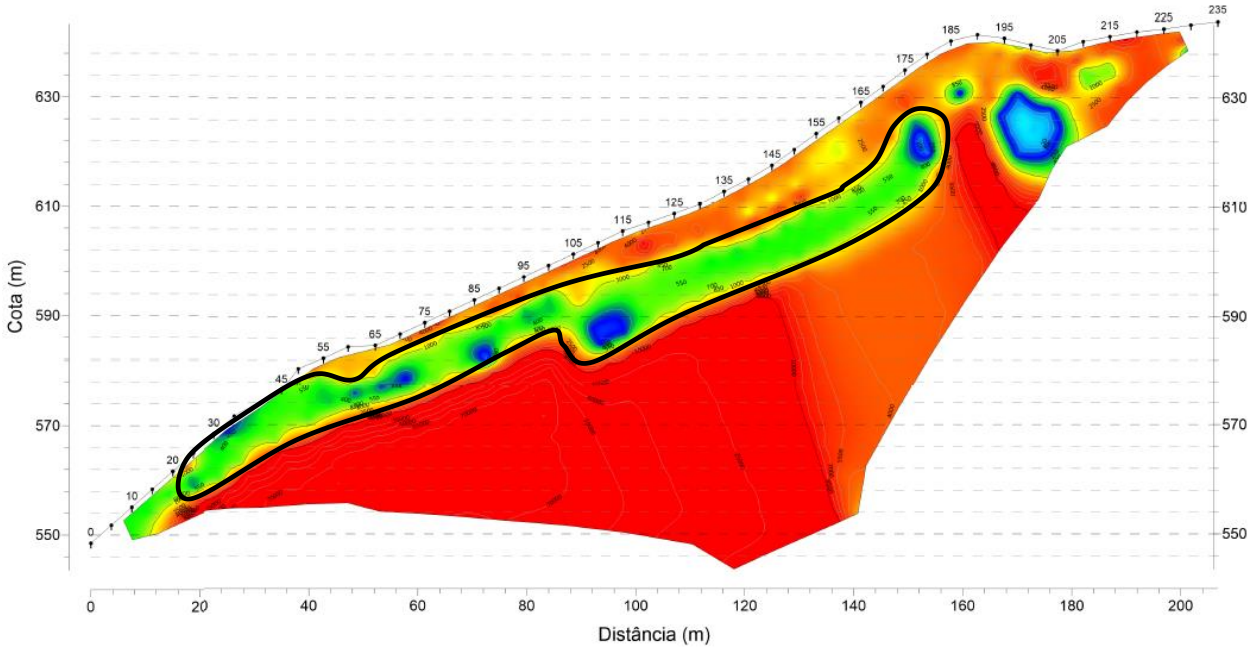


Figura 83 - Trecho com baixa a média resistividade destacada na seção elétrica da linha LH-01 (Fugro, 2019)

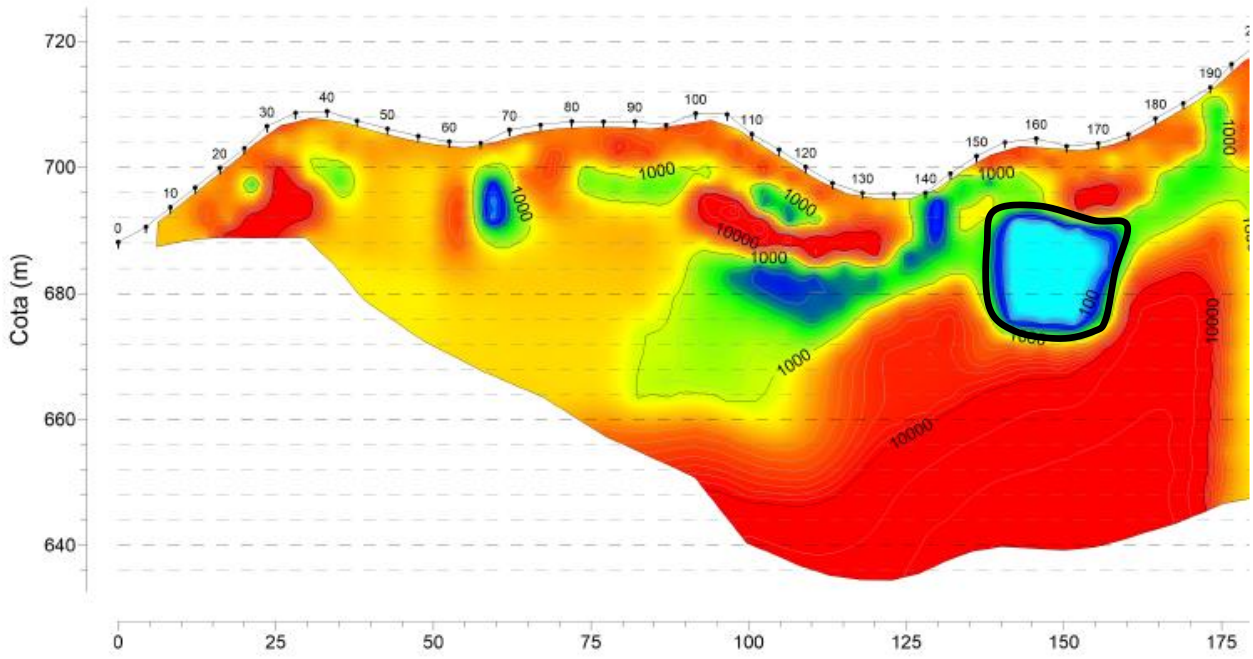


Figura 84 - Trecho com baixa resistividade destacada na seção elétrica da linha LV-04 (Fugro, 2019)

Por fim, o quinto trecho foi caracterizado por feições verticalizadas com diminuição lateral dos valores de resistividade. Tais características podem ser associadas com zonas de descontinuidades das rochas, as quais apresentaram em sua maioria continuidade em profundidade e entre os perfis geofísicos. Algumas anomalias de baixa resistividade apresentaram comportamento sub-verticalizado (Figura 85), podendo indicar a presença de uma zona fraturada ou uma intrusão subvertical (Fugro, 2019).

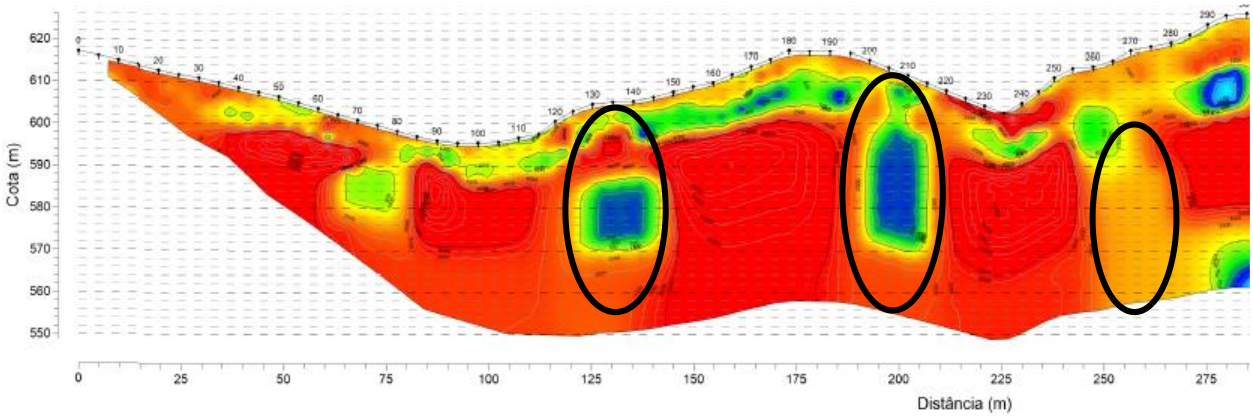


Figura 85 - Destaque das descontinuidades subverticalizadas, seção elétrica da linha LV-03 (Fugro, 2019)

6.4.3.3 Sondagem com penetrômetro dinâmico leve

As sondagens com penetrômetro dinâmico leve permitiram identificar a profundidade do topo rochoso nos furos, além de ter auxiliado na interpretação dos resultados geofísicos e na determinação do perfil estratigráfico. É importante ressaltar que, durante a execução do ensaio, atingir o impenetrável não indicou obrigatoriamente que o topo rochoso tivesse sido alcançado, podendo estar relacionado com a presença de um bloco de rocha que impossibilitou a continuidade do furo. Tais resultados foram, portanto, analisados em conjunto com as demais técnicas de investigação empregadas.

Os furos de sondagem com penetrômetro dinâmico leve atingiram profundidades que variaram entre 5,00 e 12,00 m. As sondagens DPL-01 e DPL-05 foram deslocadas pois as profundidades atingidas foram muito inferiores ao esperado. O Apêndice 16 apresenta todos os resultados dos furos de sondagem com DPL.

6.4.3.4 Sondagem mista

As sondagens mistas foram interpretadas com base nas amostras deformadas e testemunhos coletados durante os ensaios e por meio de correlações empíricas para a determinação dos parâmetros de resistência dos solos, a partir dos valores de resistência à penetração (N_{SPT}). Os boletins de sondagem estão apresentados no Apêndice 16 e os relatórios fotográficos dos testemunhos coletados durante a sondagem rotativa encontram-se no Apêndice 17.

O furo SM-01 apresentou um perfil de solo bem definido nos primeiros 8,26 m de profundidade, seguido de rocha alterada até 20,00 m. Na camada de solo, identificou-se uma pequena camada superficial de material mais argiloso e menos consolidado com estruturas características de solo residual, seguido de solo residual formado por areia, muito fina a fina, argilosa com pedregulhos milimétricos a centimétricos oriundos da rocha local. O furo SM-01A, executado ao lado, apresentou as mesmas características da sondagem SM-01, com camada de solo até 6,30 m e rocha com profundidade de sondagem limitada até 12,02 m. Na Figura 86 observam-se as camadas de solo residual, mais bem definidas à medida que se aumenta a profundidade da amostragem, e as recuperações de rocha altamente fraturada obtidas durante a sondagem rotativa.



Figura 86 - Amostras de solo e recuperação de rocha do furo SM-01

No furo de sondagem SM-02 foram observadas duas camadas de solo, até 11,10 m de profundidade, seguidas de rocha alterada até 17,20 m. A primeira camada de solo identificada foi classificada como um silte argiloso, médio a rijo, com pedregulhos centimétricos oriundos da rocha local. A existência de grãos mais finos, aliados aos baixos valores de $N_{SPT,}$ permitiu a classificação desse material como solo coluvionar. Na segunda camada de solo, a partir dos 3,00 m de profundidade, foram observadas as características do solo residual encontrado nos furos SM-01 e SM-01A.

A leitura de nível d'água foi realizada nos três furos após 24 horas. O lençol freático foi identificado em 10,55 m de profundidade no furo SM-01 e 12,58 m no furo SM-02. No furo SM-01A não foi encontrado nível d'água. Os valores obtidos são condizentes com as leituras dos medidores de nível d'água anteriormente apresentados no subitem 6.2.1, devido ao alto grau de fraturamento da rocha.

A rocha foi classificada como um protomilonito de protólito granítico, medianamente alterado, cinza claro a rosado, com porções escuras mais alteradas, composto por feldspato, caulim, quartzo e minerais micáceos. A textura da rocha foi descrita como granoblástica e a estrutura foliada. A rocha foi assim classificada pelos seguintes aspectos observados de forma macroscópica:

I. Presença de porfiroclastos rotacionados com hábito sigmoidal (Figura 87);
II. Abundância de quartzo fitado (ribbons);
III. Estiramento mineral;
IV. Pares S/C;
V. Foliação pervasiva de alto ângulo (Figura 88);
VI. Ausência de feições de fusão parcial, apresentando apenas feições de recristalização (Fugro, 2019).

Destaca-se que uma análise microscópica poderia levar a uma alteração na classificação da rocha feita de forma macroscópica. Além disso, a classificação da rocha

também foi baseada no contexto regional estrutural da área de estudo, considerando trabalhos da literatura (subitem 6.4.1.1). De acordo com Cury (2009), a área de estudo apresenta um lineamento principal NW-SE relacionado a uma zona de transcorrência sinistral, a qual tende a gerar litotipos miloníticos, protomilonitos a ultramilonitos, de acordo com a proximidade da zona de cisalhamento (Fugro, 2019).

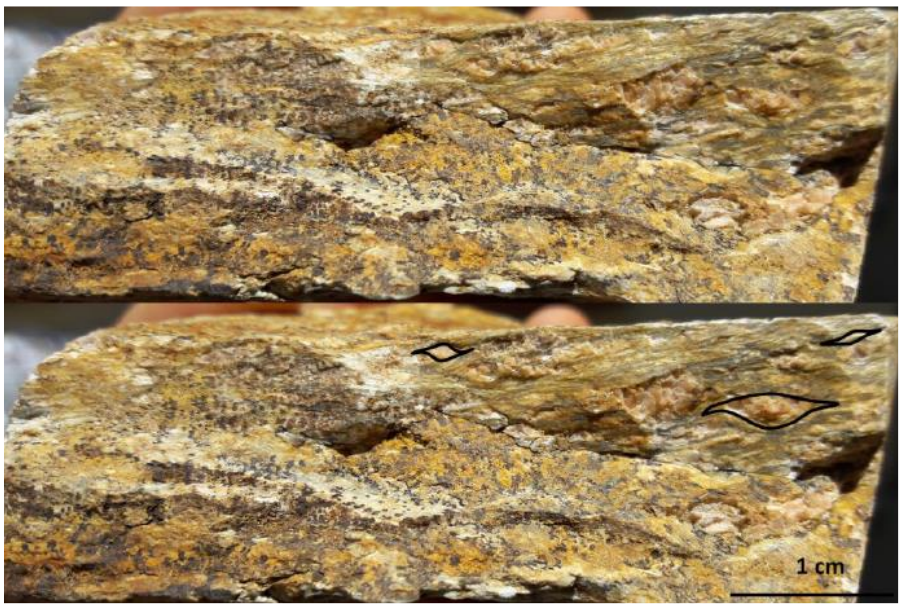


Figura 87 - Amostra de protomilonito com indicação dos feldspatos com hábito sigmoidal (Fugro, 2019)



Figura 88 - Amostra de protomilonito com indicação dos sigmóides e foliação subvertical (Fugro, 2019)

Ainda por meio de análises em campo, foram observadas variações composicionais e texturais em diversos pontos relativamente próximos entre si. De maneira simplificada, as rochas foram descritas com coloração cinza clara a rosada, com bandamentos/foliações, compostas por quartzo, feldspato alcalino e máficos.

Algumas porções da rocha apresentaram uma foliação e/ou bandamento mais espesso, enquanto que em outras porções estes apresentavam-se mais apertados. Desta forma, a análise macroscópica de campo indicou a presença de um domínio milonítico (Figura 89 - a e b) e outro domínio composto por ortognaisses (Figura 89 - c e d). Ambos domínios não foram delimitados em campo devido a necessidade de coleta de mais informações e a falta de afloramentos acessíveis na área (Fugro, 2019).

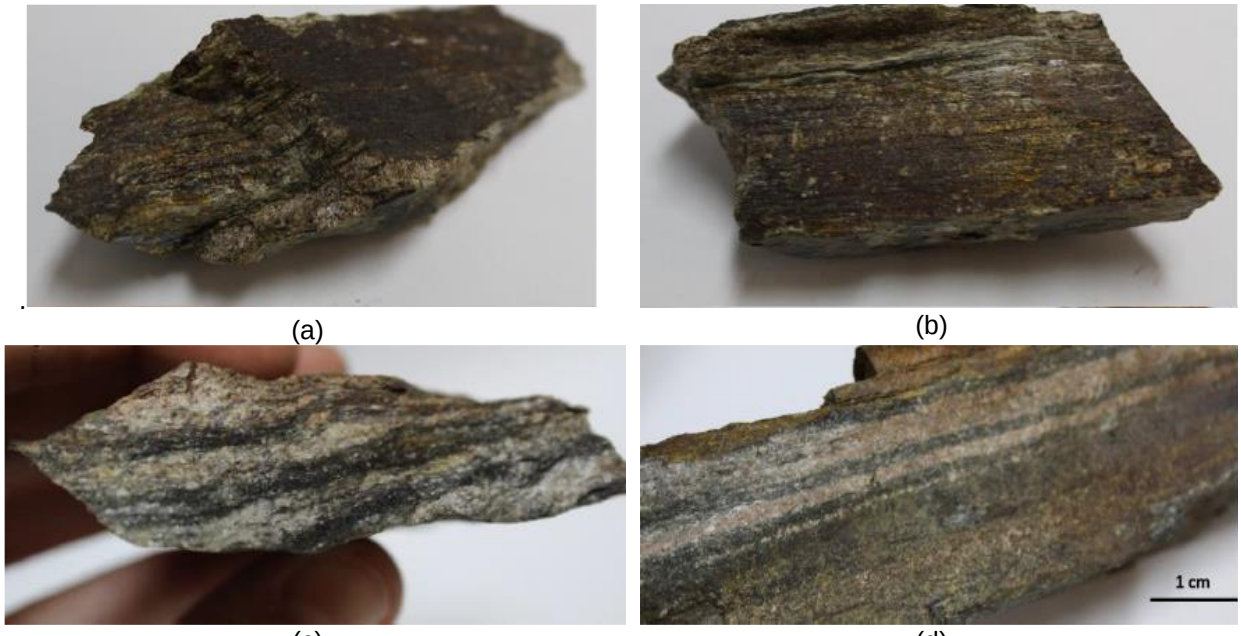


Figura 89 - Variação textural e composicional das rochas encontradas em campo (Fugro, 2019)

6.4.3.5 Correlação dos resultados e caracterização do perfil geológico-geotécnico

As informações obtidas da campanha de investigação geofísica foram confrontadas com os resultados das sondagens diretas, as quais permitiram a definição das principais camadas presentes na subsuperfície. Para as linhas geofísicas que não apresentaram sondagens diretas posicionadas ao longo de seu segmento, a

interpretação baseou-se exclusivamente na junção entre os resultados de ambos os métodos geofísicos aplicados. As seções de correlação entre os ensaios geofísicos e as seções geológico-geotécnicas finais interpretadas para cada uma das linhas de ensaio estão apresentadas no Apêndice 18. O modelo tridimensional obtido a partir dessas seções encontra-se no Apêndice 19.

Com referência às interpretações geradas, a seguir são descritas as principais características determinadas para a subsuperfície da área de estudo. Ao longo das seções, observaram-se algumas regiões onde era esperada a continuidade do embasamento, que não apresentaram variações nos valores da velocidade sísmica mas apresentaram uma queda nos valores de resistividade (Figura 90). Estas regiões foram interpretadas como zonas de descontinuidades, que podem estar associadas a sistemas de fraturas subverticais, veios com minerais sulfetados disseminados ou sistemas intrusivos. No perfil geológico-geotécnico elaborado, estas zonas foram relacionadas com a provável presença de maciço com alto grau de fraturamento/intrusão subvertical, indicadas principalmente por feições de cortes abruptos. A redução observada para o parâmetro geofísico da resistividade foi associada com a percolação de água por um sistema estrutural presente na subsuperfície da área estudada (Fugro, 2019).

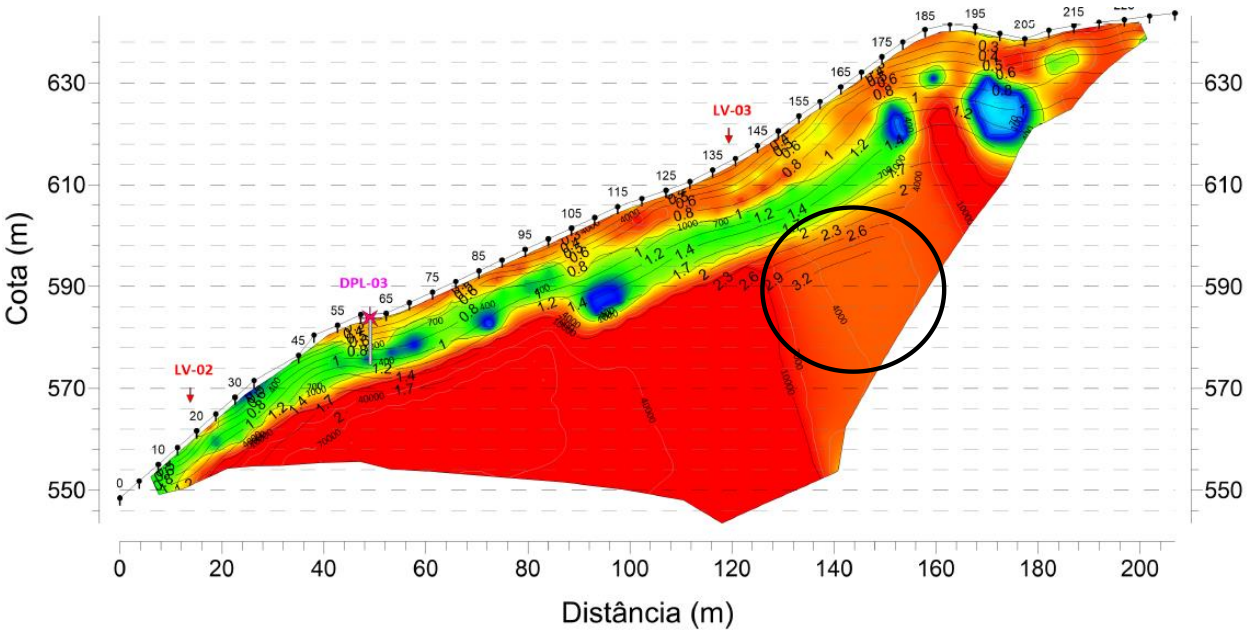


Figura 90 - Perfil da correlação entre os resultados da sísmica de refração e da eletrorresistividade, linha LH-01 (Fugro, 2019)

Uma camada de solo coluvionar foi inferida por meio da combinação dos dados geofísicos, das sondagens mistas e DPL, além de uma análise geológica da superfície baseada em observações de campo. O solo coluvionar foi definido, pois as propriedades físicas deste material indicaram um comportamento típico de solos transportados mal selecionados, com padrão variável de resistividade e de baixas velocidades sísmicas (Figura 91), característico de materiais inconsolidados. Depósitos coluvionares apresentam pedregulhos de tamanhos variáveis, esparsos em uma matriz desagregada de material mais fino. Portanto, os valores de resistividade mais altos foram relacionados com a resposta à passagem da corrente elétrica nos níveis compostos por pedregulhos, enquanto que os valores de baixa velocidade de onda sísmica foram associados com o material desagregado com baixa compactação. As sondagens com o DPL indicaram o impenetrável em algumas porções onde estaria presente a camada de solo coluvionar e, isto pode estar relacionado com o fato do equipamento ter atingido blocos de rocha pertencentes ao colúvio, já que quando o ensaio foi deslocado para um furo ao lado, o mesmo apresentou uma maior profundidade de penetração (Fugro, 2019).

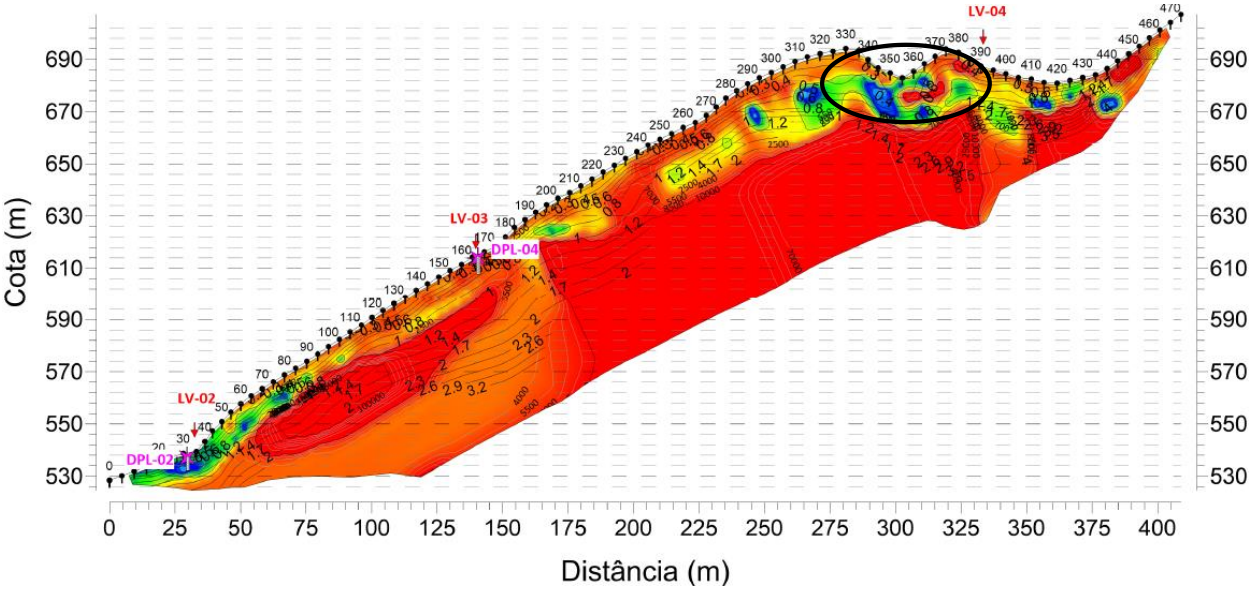


Figura 91 - Perfil da correlação entre os resultados da sísmica de refração e da eletrorresistividade, linha LH-05 (Fugro, 2019)

Uma camada de solo residual foi determinada por apresentar valores de resistividade e de velocidade de onda intermediários. Os solos residuais tendem a apresentar valores mais elevados que os solos coluvionares ou solos transportados em geral, para ambos os parâmetros geofísicos, principalmente devido à sua compactação, já que são solos encontrados *in situ*.

Porções de rocha alterada e rocha sã foram relacionadas com altas resistividades e altos valores de velocidade das ondas sísmicas. Velocidades de aproximadamente 2,3 km/s e resistividades superiores a 5000 Ohm.m foram classificados, com base na literatura, como indicativos da ocorrência deste tipo de solo. Destaca-se que a transição entre tais materiais é gradual, uma vez que a alteração mineralógica não é algo uniforme.

Por fim, uma camada de aterro foi inferida por meio das suas características geofísicas e com base em observações de campo. Tal material apresentou valores de resistividade e de velocidade de onda baixos, característica comum ao fato de ser normalmente saturado e pouco compacto. A baixa compacidade do material também foi indicada pelo perfil obtido pelo ensaio DPL-06, o qual foi executado ao lado da rodovia. A seção geofísica de eletrorresistividade da linha LV-01 indicou anomalias de alta resistividade, com forma ovalada, possivelmente relacionadas com bueiros de greide, os quais foram identificados em campo.

A correlação entre os valores obtidos nos ensaios geofísicos, velocidades sísmicas e resistividade, mostrou-se coerente e permitiu a inferência de algumas características relacionadas aos materiais identificados na área de estudo. A variação da velocidade de propagação da onda com mudanças bruscas possibilitou a identificação da transição entre as camadas de solo e o topo rochoso. Ressalta-se, contudo, que as transições entre as camadas de solo são ilustrativas e não exatas, uma vez que a passagem de rocha sã para rocha alterada, por exemplo, é gradual e não pode ser mapeada com precisão na resolução dos dados obtidos pela geofísica, podendo neste caso ser deslocada para cima ou para baixo nos perfis aqui apresentados. Para uma determinação mais precisa da transição gradual entre as camadas seria necessária uma

campanha de amostragens diretas (sondagens com recuperação de amostras) mais densa (Fugro, 2019).

6.4.3.6 Análise estrutural do maciço rochoso

De modo a complementar a interpretação dos resultados de investigação geológico-geotécnica optou-se, também, por avaliar as atitudes das descontinuidades presentes ao longo de pontos de afloramento da rocha ao longo da rodovia. As medidas foram realizadas em pontos mais acessíveis, em um raio de 500 m, com o auxílio de bússola tipo Brunton e do aplicativo Field Move Clino. As principais direções medidas foram NE-SW e NW-SE, sendo que as direções NE-SW com mergulhos médios a altos para SE foram as mais abundantes. Tais medidas são coerentes com dados obtidos em outros trabalhos da literatura, como Siga Jr. (1995), para a mesma região.

No total, foram identificadas três famílias de fraturas, sendo duas sub-horizontais e uma sub-vertical, conforme apresentado no diagrama de Schmidt (Figura 92). As três principais medidas das famílias de fraturas foram plotadas em conjunto com o modelo de resistividade tridimensional (Figura 93). Desta forma, foi possível estabelecer uma relação íntima entre as fraturas com atitude 110/74 e a foliação com atitude 115/63, as quais mostraram-se como planos semi-paralelos, sendo a foliação possivelmente uma zona de fraqueza a qual propicia a geração das fraturas (Figuras 94 e 95). Destaca-se que as medidas foram coletadas em torno do talude em questão, e suas direções e mergulhos foram preservadas quando plotadas no modelo tridimensional.

Além disso, no modelo 3D também foi possível identificar uma correspondência entre as direções medidas e feições de cortes abruptos nos resultados das seções de eletrorresistividade, geralmente com uma redução nos valores de resistividade (Figura 96). As famílias de fraturas 2 e 3 também apresentaram uma correspondência com o modelo tridimensional, com feições de cortes abruptos em regiões de redução dos valores de resistividade (Figura 97). Tal comportamento pode ser associado com o fato

do fraturamento ser uma região que propícia a percolação de água. Por fim, destaca-se que a família 2 de fraturas, com atitude no geral de 266/17, representa um maior nível de instabilidade por apresentar, espacialmente, concordância com o declive da encosta, indicando uma propensão a favorecer um possível deslizamento na região (Figura 98).

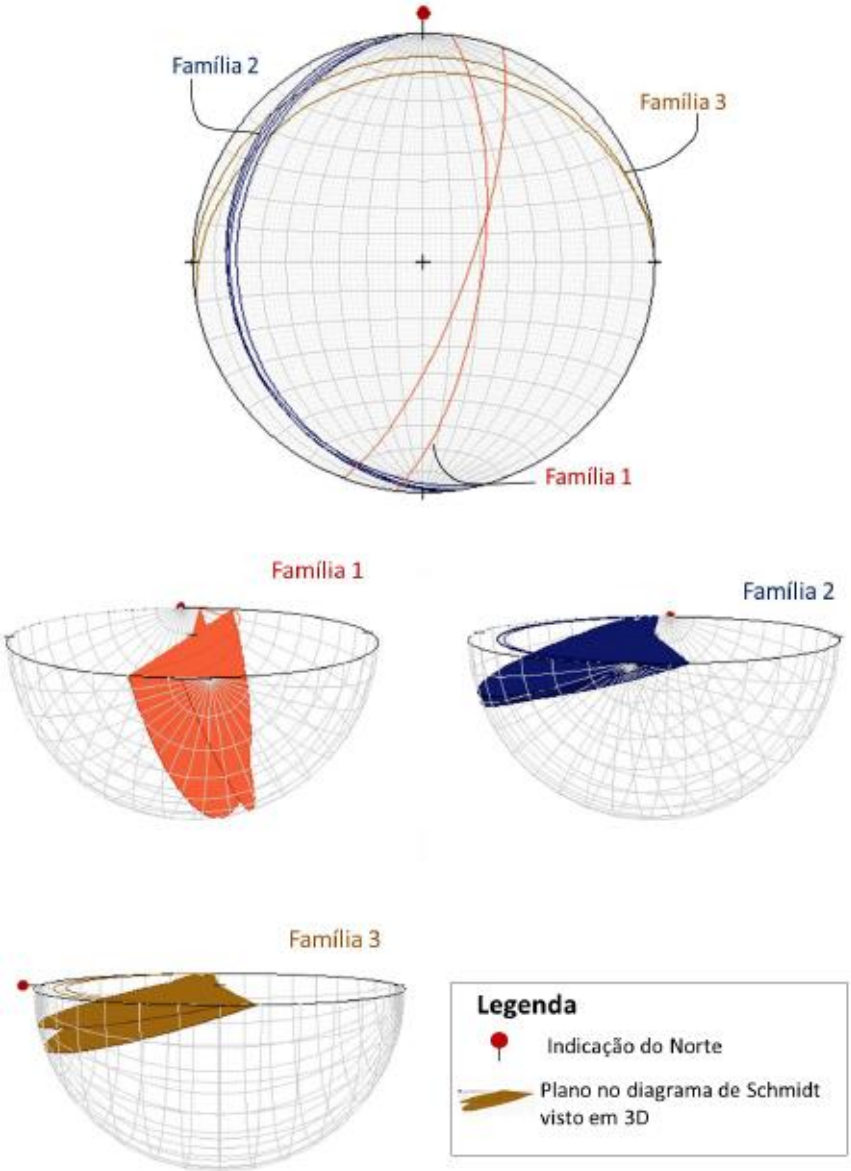


Figura 92 - Diagrama de Schmidt com a projeção dos planos de fraturas aferidos na área (Fugro, 2019)

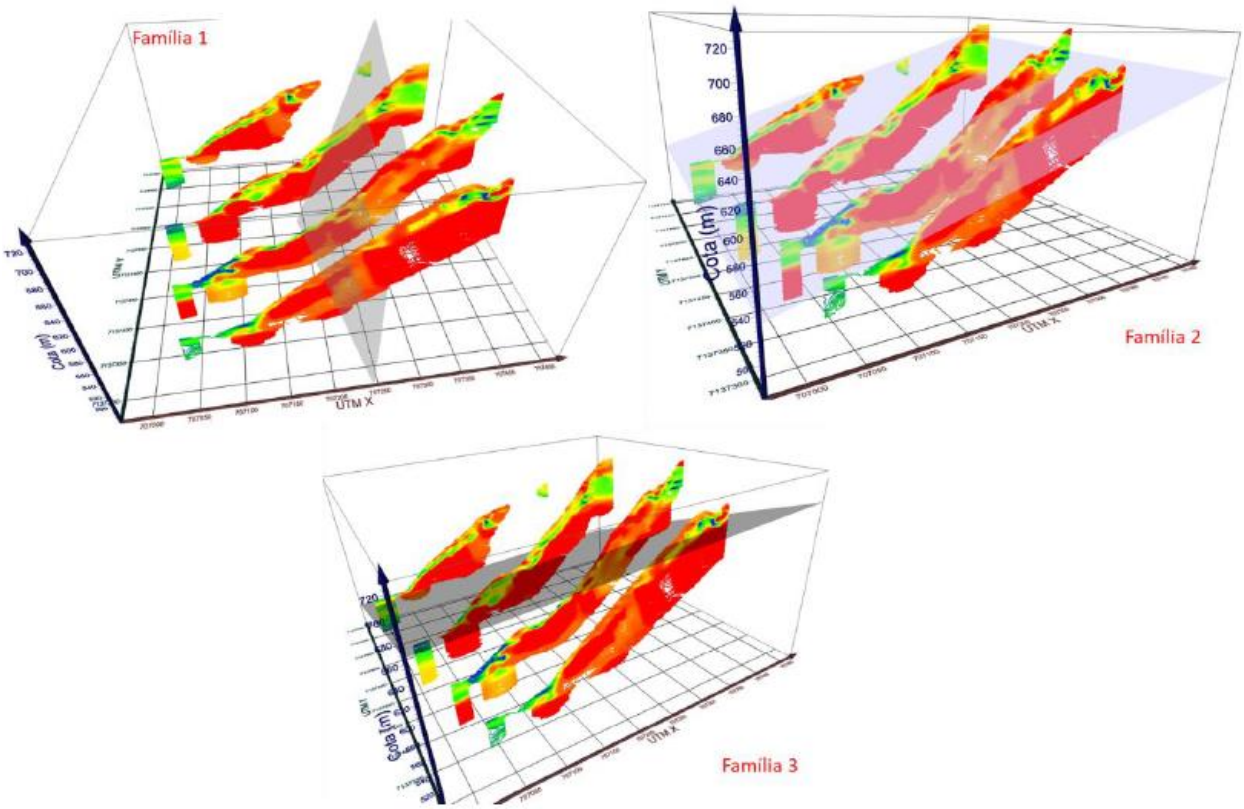


Figura 93 - Planos das famílias de fraturas projetados sobre modelo tridimensional de resistividade (Fugro, 2019)

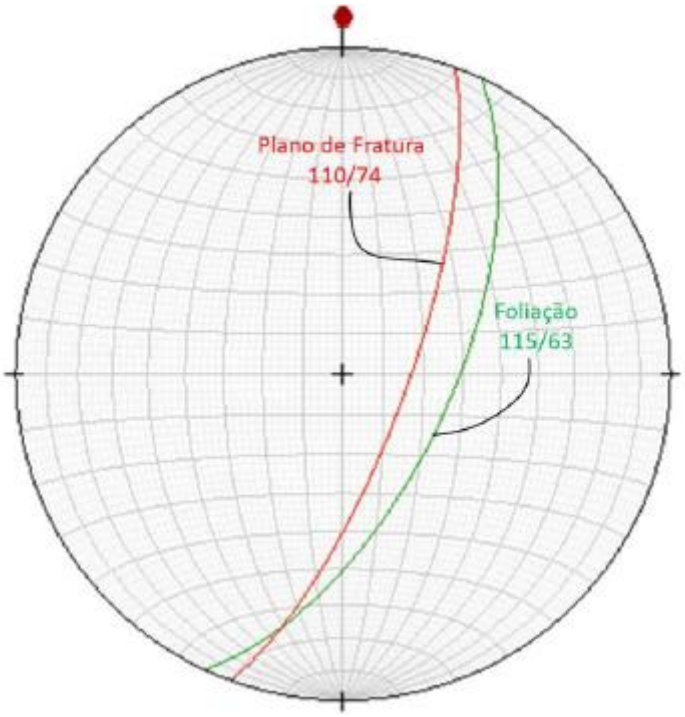


Figura 94 - Diagrama de Schmidt com plano de fratura semi-paralelo ao plano da foliação (Fugro, 2019)

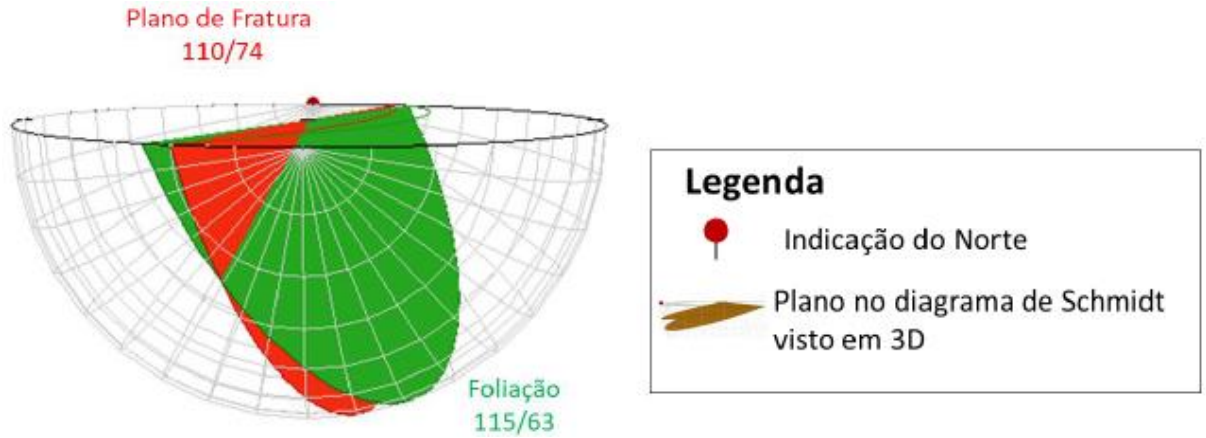


Figura 95 - Visão tridimensional do plano de fratura e do plano de foliação, semi-paralelos entre si

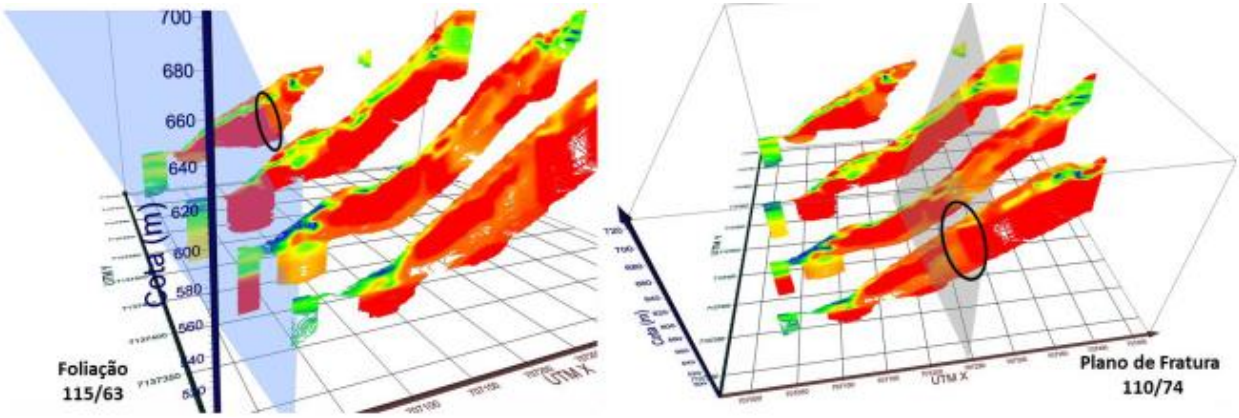


Figura 96 – Cortes abruptos nas seções elétricas que podem ser relacionados com os planos 115/63 e 110/74 (Fugro, 2019)

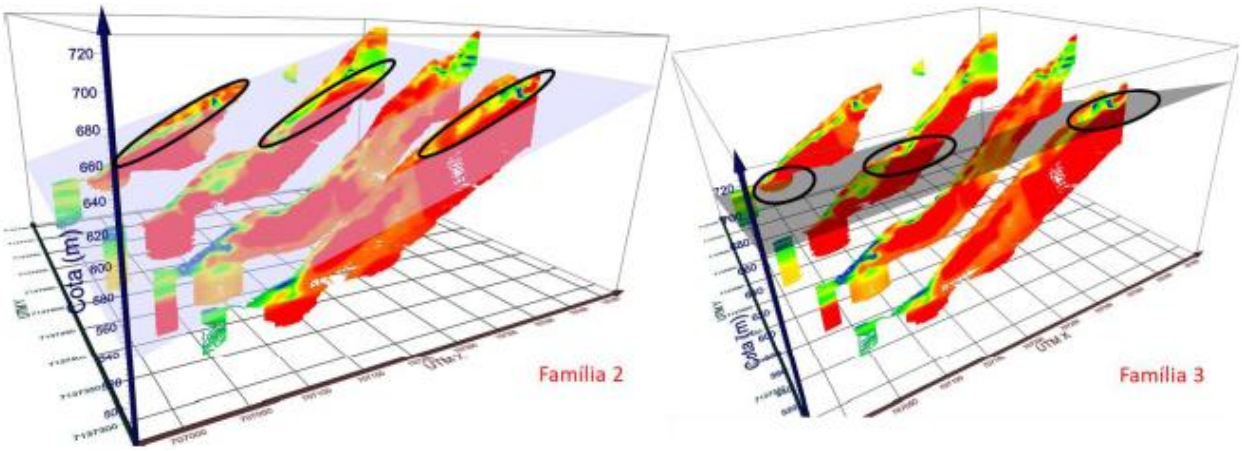


Figura 97 - Correspondência entre os planos de fratura das famílias 2 e 3 e áreas mais condutivas no modelo tridimensional (Fugro, 2019)

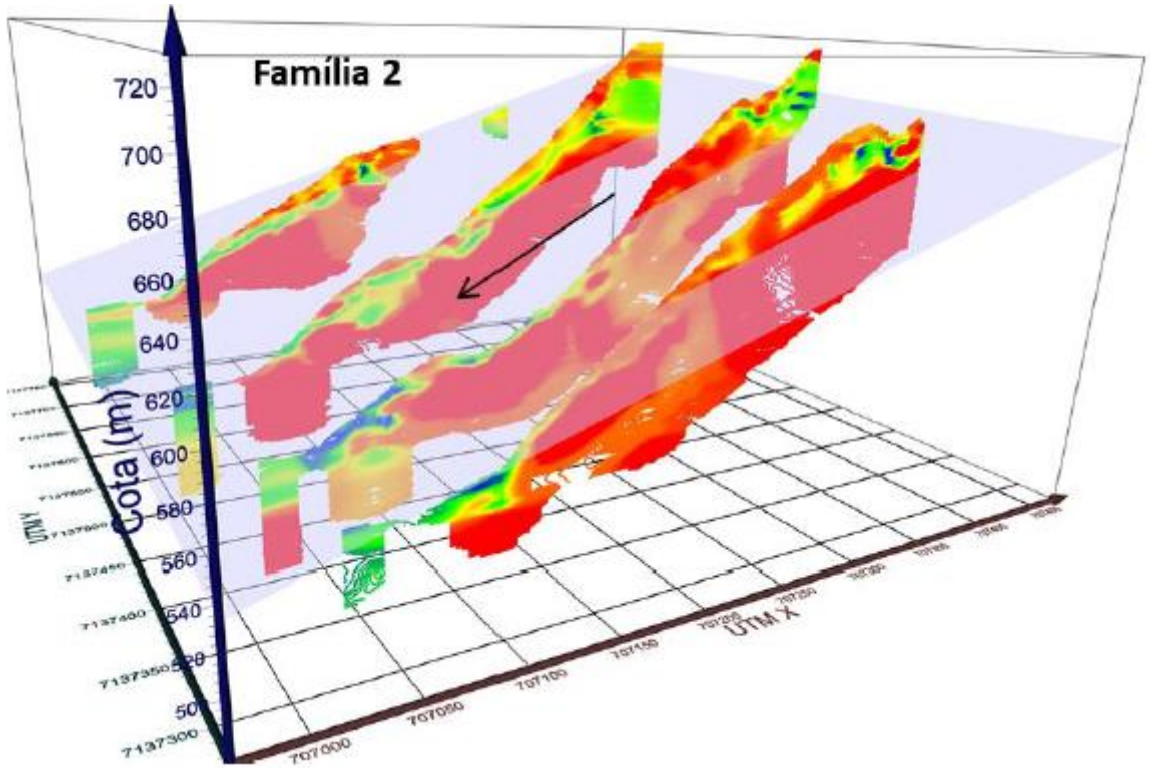


Figura 98 - Família 2 de fraturas concordante com o declive da encosta (Fugro, 2019)

6.4.4 Análises de estabilidade

Com base nos dados gerados pela campanha de investigação geológico-geotécnica descrita no item 6.4.2, foi possível definir um perfil estratigráfico da encosta e delimitar a posição do lençol freático nos pontos de sondagens mistas de modo a embasar o desenvolvimento de análises de estabilidade.

Para tal, o ângulo de atrito dos solos identificados pelas sondagens (colúvio e residual) foram determinados, a partir do número de golpes N_{SPT}, por meio das correlações de De Mello (1971), Teixeira (1996) e Hatanaka e Uchida (1996), apresentadas por Schnaid e Odebrecht (2012). Segundo os autores, não há metodologia confiável para a determinação do parâmetro de coesão do solo, também utilizado no cálculo da resistência ao cisalhamento.

A fim de validar os resultados obtidos com as correlações empíricas, os valores de ângulo de atrito determinados para cada camada foram comparados aos obtidos por

Victorino (2015) em ensaios de resistência por meio de cisalhamento direto realizados com amostras indeformadas coletadas em locais próximos ao trecho de estudo, além de outros trabalhos da literatura realizados ao longo da BR-376/PR, também baseados em ensaios de cisalhamento direto nas condições de pico (Tabela 18).

Tabela 18 - Parâmetros geotécnicos obtidos na literatura para solos coluvionares e residuais ao longo da BR-376

Autor	Solo Residual		Solo Coluvionar	
	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
Vaz (2014)	-	-	37	2,9
Millan Coy (2015)	27,6	7,11	23,1	8,88
	35,2	9,33		
	40,1	10,18		
Victorino (2015)	37	2,9	34,11	10,42
González (2017)	27,9	6,5	26	8,2
	38,3	0	37,9	14,8
	-	-	31,8	11,7

A Figura 99 apresenta os valores de ângulo de atrito em profundidade calculados a partir das correlações, os valores obtidos por Victorino (2015) através de ensaios e a média da literatura para solos com classificação similar. No furo SM-01, onde uma camada de 8,26 m de solo residual foi identificada, o ângulo de atrito de 37º determinado por Victorino (2015) e a média de 34° da literatura encontram-se dentro da faixa de valores obtidos por correlações empíricas. No furo SM-02, o mesmo foi observado para a camada de solo residual a partir de 3,00 m de profundidade com relação ao valor de Victorino (2015), enquanto que para a média da literatura no solo residual e para ambos na camada de solo coluvionar mais superficial, os ângulos de atrito foram mais conservadores do que os valores obtidos pelas correlações. Vale ressaltar que os parâmetros geotécnicos de ensaios laboratoriais são obtidos por meio de amostras coletadas na superfície, desta forma não é possível correlacionar estes dados com os valores calculados para maiores profundidades (linhas pontilhadas) do ensaio SPT. Além disso, os valores de ângulo de atrito calculados para maiores profundidades não foram

considerados como válidos, uma vez que diversas implicações do ensaio têm influência nos altos valores obtidos.

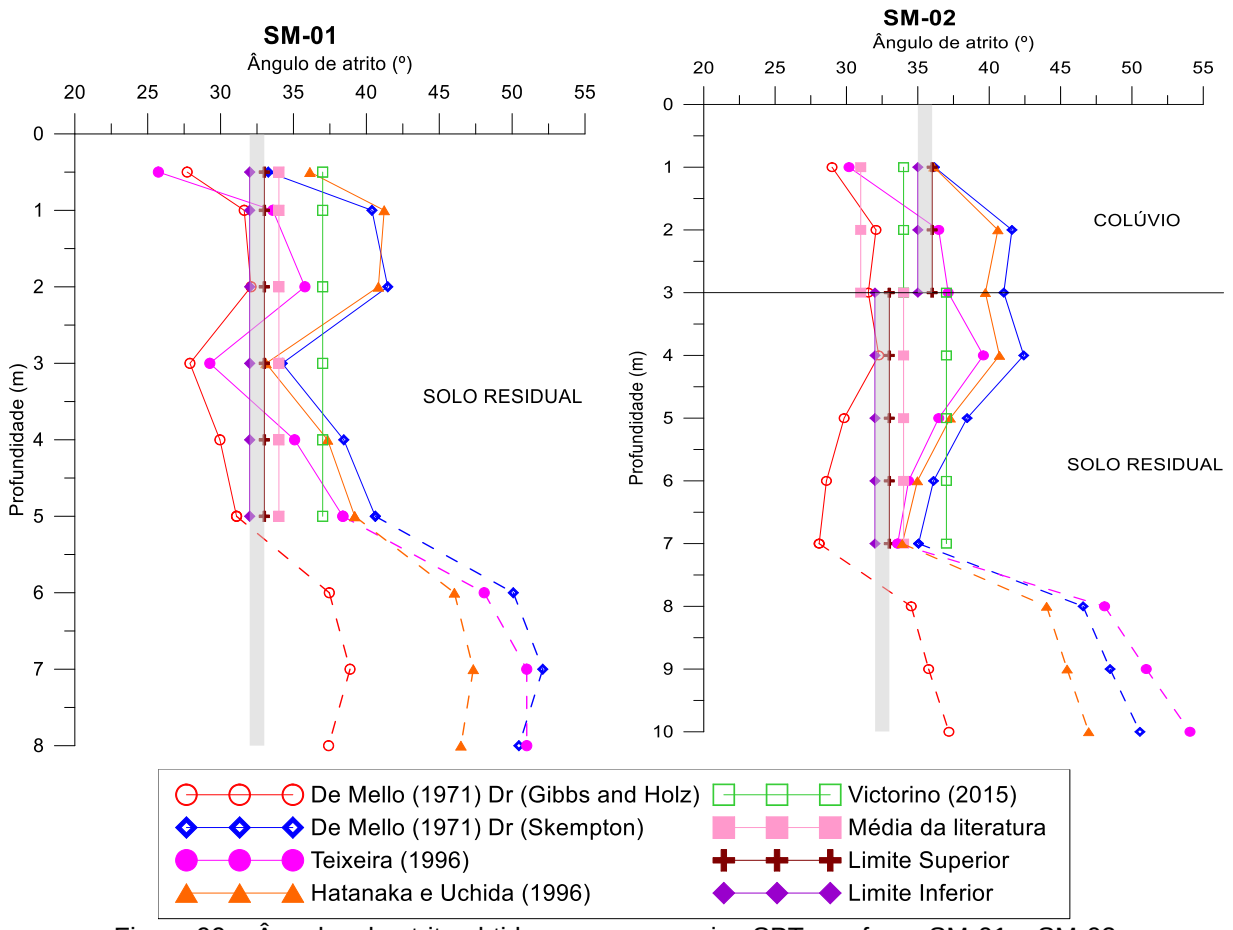


Figura 99 – Ângulos de atrito obtidos para os ensaios SPT nos furos SM-01 e SM-02

De forma a contemplar uma faixa de variação dos parâmetros de resistência existentes para ambos os solos, as análises foram realizadas sob duas condições, denominadas limite superior e limite inferior e destacadas na Figura 99 por uma faixa cinza, dentro dos limites obtidos por correlações. A análise de limite superior foi baseada em valores dos parâmetros de resistência obtidos da literatura, enquanto que a análise de limite inferior considera os pares de coesão e ângulo de atrito determinados por Victorino (2015) por meio de retroanálises elaboradas para a mesma área de estudo tratada neste relatório.

O peso específico dos solos foi fixado e também foi definido com base nos dados descritos na literatura (Tabela 19). Além disso, as análises foram realizadas considerando a influência da sucção dos solos na estabilidade da encosta. Para tal, os solos foram considerados como não saturados e o parâmetro ϕ_b foi determinado como sendo a metade do valor do ângulo de atrito. Este parâmetro representa o valor do ângulo de atrito, na equação de resistência ao cisalhamento estendida para solos não saturados, relacionado com a taxa de acréscimo de resistência relativo a presença da sucção matricial (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Também é importante destacar que os parâmetros adotados para a camada de rocha alterada foram determinados com base nos dados de Nery e Vieira (2015), e foram fixados, sem alterações entre as análises dos limites superiores e inferiores. Isso porque os parâmetros da camada não apresentaram influência direta nos resultados de estabilidade neste caso.

Tabela 19 - Limite superior e inferior dos parâmetros geotécnicos dos solos aplicados nas análises de estabilidade

Parâmetros dos solos				
Limite Superior				
Material	Ângulo de atrito (ϕ)	ϕ_b	Coesão	Peso específico
Colúvio	36	18	10	17
Solo Residual	33	16,5	10	18
Rocha Alterada	41	-	15	19
Limite Inferior				
Material	Ângulo de atrito (ϕ)	ϕ_b	Coesão	Peso específico
Colúvio	35	17,5	3	17
Solo Residual	32	16	3	18
Rocha Alterada	41	-	15	19

Os valores de sucção foram determinados também com base nos dados de ensaios de laboratório desenvolvidos por Victorino (2015), onde foram determinadas curvas de retenção para solos similares e próximos da área de estudo. Em geral, a autora obteve valores de sucção natural para o solo residual, do complexo gnáissico-migmatítico, em torno de 60 kPa, com máximo de 84 kPa e mínimo em torno

de 30 kPa. Já para o solo coluvionar a autora obteve um valor em torno de 20 kPa. Além disso, também foram avaliados os dados dos tensiômetros TENS-01 (1,5 m) e TENS-02 (2,0 m) localizados na área de estudo durante o ano de 2015, sendo os valores registrados entre 15 kPa e 40 kPa (Apêndice 3).

É válido ressaltar que não é necessário que a sucção do solo seja anulada por meio da infiltração de água da chuva para que um processo de instabilidade seja desencadeado. Uma redução da sucção já é suficiente para que um evento ocorra, como abordado por Victorino (2015), que através de retroanálises identificou um valor de sucção média na ruptura de 25 kPa.

As análises de estabilidade foram elaboradas pelo *software SVSlope*, com base no método ϕ_b para solos não saturados e considerando superfícies de ruptura circulares compostas, com 40 fatias e um número máximo de 50 iterações. Foram aplicados os métodos de cálculo de Morgenstern-Price e do General Limit Equilibrium (GLE) proposto por Fredlund. A sucção foi inserida nas análises de forma crescente a partir do nível do lençol freático, até atingir o valor pré-definido de 60 kPa, 40 kPa ou 20 kPa, seguindo constante nesse valor máximo até a superfície. A Figura 100 apresenta um exemplo de seção transversal modelada no *SVSlope* utilizada para a realização das análises de estabilidade com as especificações dos tipos de solo em cada camada e modelo constitutivo escolhido.

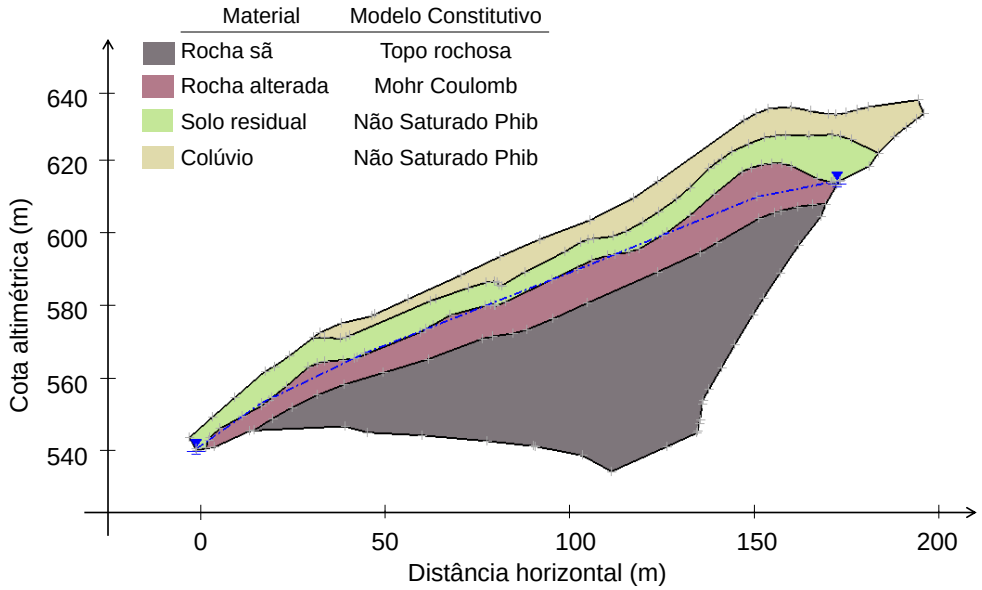


Figura 100 – Seção transversal modelada em *software* para análise de estabilidade

Os métodos de equilíbrio limite para análises de estabilidade utilizam a definição de resistência ao cisalhamento do solo e tensões atuantes na massa de solo para a determinação de um fator de segurança. Fatores de segurança iguais a 1,00 indicam que a encosta se encontra na iminência da ruptura; superiores a 1,00 indicam que a resistência é superior às tensões atuantes, significando estabilidade, e valores inferiores não possuem significado físico. A norma NBR 11682 (2009) apresenta valores de fator de segurança mínimos para cobrir as incertezas naturais de projetos e construções de obras geotécnicas. Tais valores dependem dos riscos associados ao projeto, em termos de perdas de vidas humanas e danos materiais e ambientais, e variam entre 1,20 e 1,50. Para a área de estudo, um fator de segurança de 1,50, relacionado a alto nível de segurança contra danos a vidas humanas e médio nível contra danos materiais e ambientais, seria o adequado. Ressalta-se, contudo, que em condições naturais, encostas como as da Serra do Mar tendem a apresentar fatores de segurança marginalmente superiores à unidade.

Com relação à variação da sucção nos solos, foram avaliadas 3 condições (20 kPa, 40 kPa e 60 kPa) dentro de uma faixa de valores considerando dados da

literatura, uma condição crítica definida por Victorino (2015) e dados da instrumentação geotécnica, parte integrante do monitoramento descrito neste relatório para a BR-376/PR. Ressalta-se que o monitoramento da variação da sucção em combinação com o registro de precipitação é de grande importância na gestão de risco da área, devendo-se atentar principalmente para condições de chuva extremas.

No total foram realizadas 32 análises, sendo 8 análises para cada uma das 4 linhas geofísicas posicionadas transversalmente à rodovia (LH-01, LH-03, LH-04 e LH-5). Os perfis analisados e as superfícies críticas de ruptura relacionadas com o menor fator de segurança obtido estão apresentados no Apêndice 20. As Tabelas 20 e 21 apresentam todos os fatores de segurança obtidos para cada uma das análises, para superfícies de ruptura próximas à rodovia. Em termos gerais, como esperado, os fatores de segurança determinados para as análises de limite superior foram maiores com relação aos das análises de limite inferior. As linhas LH-01 e LH-05 apresentaram superfícies mais críticas próximas da rodovia, enquanto que as linhas LH-03 e LH-04 apresentaram superfícies críticas distantes da rodovia, sendo a superfície da linha LH-04 a mais distante. A linha LH-05 encontra-se posicionada na encosta em suas condições naturais e a linha LH-01 está posicionada sobre um retaludamento antigo que está completamente florestado atualmente. Já as linhas LH-03 e, principalmente, LH-04 estão localizadas na região com o retaludamento mais recente.

A linha LH-01 apresentou, para as análises de limite superior, fatores de segurança elevados. Para as análises considerando o limite inferior de parâmetros pré-definidos, os fatores de segurança sofreram uma redução significativa em seu valor, principalmente para os níveis mais baixos de sucção (20 kPa).

Tabela 20 - Fatores de segurança obtidos para as análises nas condições do limite superior

Limite Superior				
Sucção	LH-01	LH-03	LH-04	LH-05
60 kPa	1,502	1,461	2,000	1,440
40 kPa	1,484	1,449	1,964	1,336
20 kPa	1,419	1,432	1,899	1,212

Tabela 21 - Fatores de segurança obtidos para as análises nas condições do limite inferior

Limite Inferior				
Sucção	LH-01	LH-03	LH-04	LH-05
60 kPa	1,326	1,424	1,779	1,252
40 kPa	1,296	1,370	1,719	1,149
20 kPa	1,197	1,266	1,602	1,003

A linha LH-03 apresentou tanto para as análises do limite superior quanto para o limite inferior com sucção de 60 kPa fatores de segurança próximos ao sugerido pela norma para as superfícies próximas à rodovia. O limite inferior, assim como para a linha LH-01, apresentou um fator de segurança mais crítico para o caso de sucção de 20 kPa. Conforme mencionado e apresentado no Apêndice 20, as superfícies mais críticas encontram-se distantes da rodovia, com fatores de segurança próximos de 1,00 para o limite inferior. Essas superfícies localizam-se a cerca de 250 m da pista e possivelmente representam um risco baixo à operação rodoviária.

A linha LH-04 apresentou as condições mais favoráveis de estabilidade para região próxima à rodovia, comportamento esperado visto que compreende a área estabilizada com retaludamento. Tanto para o limite superior quanto para o limite inferior, em todas as condições de sucção, os fatores de segurança ficaram acima de 1,50. Os menores fatores de segurança encontram-se, também, em superfícies distantes cerca de 250 m da rodovia. O caso mais crítico, de limite inferior com 20 kPa de sucção, apresentou superfície com 1,005 de fator de segurança. Ainda que um processo de movimento de massa ocorra nessa superfície, a profundidade da cunha de ruptura e sua posição em relação à faixa de domínio possivelmente oferecem pouco risco à rodovia.

Por fim, tem-se a linha LH-05, que apresentou as condições mais críticas de estabilidade, em especial para as análises com o limite inferior dos parâmetros de resistência e para sucções de 20 kPa e 40 kPa (Figura 101).

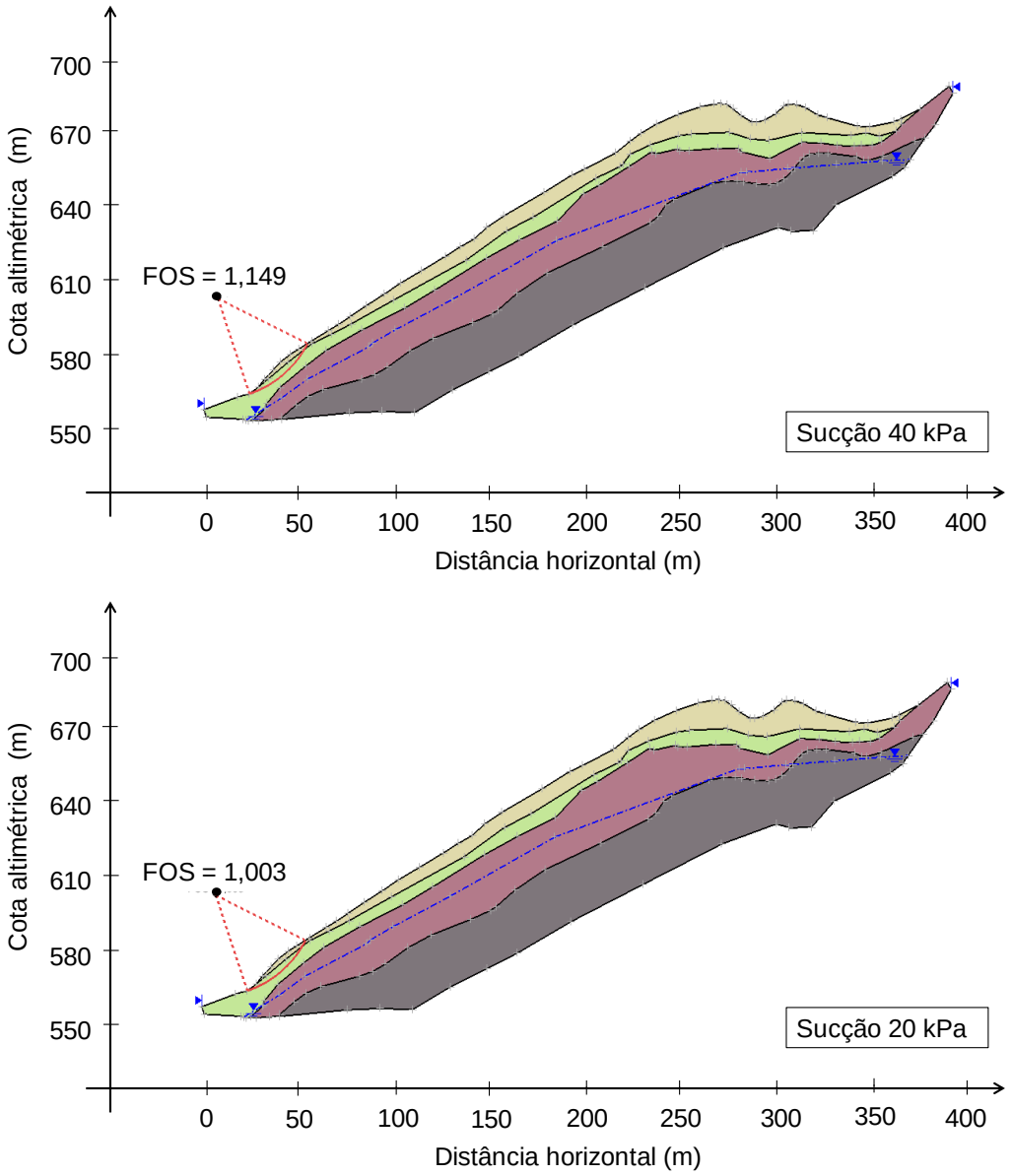


Figura 101 - Análises de estabilidade da linha LH-05 para o limite inferior nas condições de sucção de 40 kPa e 20 kPa

Durante a execução dos ensaios de investigação em campo foi observada na linha LH-05 a presença de uma possível fenda de tração no solo (Figura 102), a qual pode já indicar uma condição de instabilidade na região desse perfil em específico. Essa fenda de tração pode estar associada à descontinuidade identificada pelo ensaio geofísico da eletrorresistividade, conforme a Figura 103.



Figura 102 - Possível fenda de tração localizada na linha LH-05, registro fotográfico realizado descendo a linha geofísica, em direção à rodovia

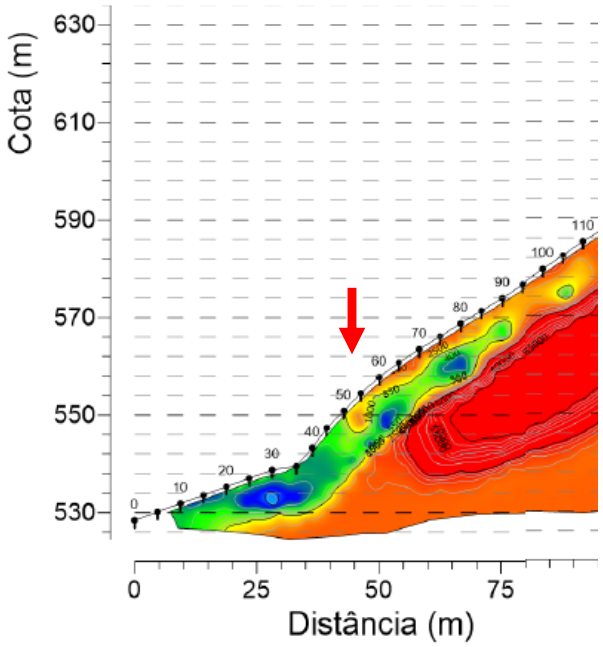


Figura 103 - Possível indicativo da fenda de tração pelo ensaio geofísico de eletrorresistividade

Os gráficos da Figura 104 apresentam de forma visual os resultados das análises de estabilidade para as condições consideradas neste relatório. Ressalta-se novamente que as linhas LH-03 e LH-04 apresentaram superfícies de ruptura mais críticas em pontos distantes da rodovia. Na proximidade da pista, a linha LH-04 foi a que apresentou a melhor condição de estabilidade, sendo esta coincidente com uma obra de estabilização por retaludamento realizada após a ruptura ocorrida em 2011. A linha LH-05 apresentou a condição de estabilidade mais desfavorável, sendo que para todas as condições analisadas os fatores de segurança foram baixos e muito próximos de 1,00 para o limite inferior. Cabe ressaltar que a linha LH-05 abrange a área com condições naturais da encosta, ou seja, esta região não apresenta nenhuma influência antrópica.

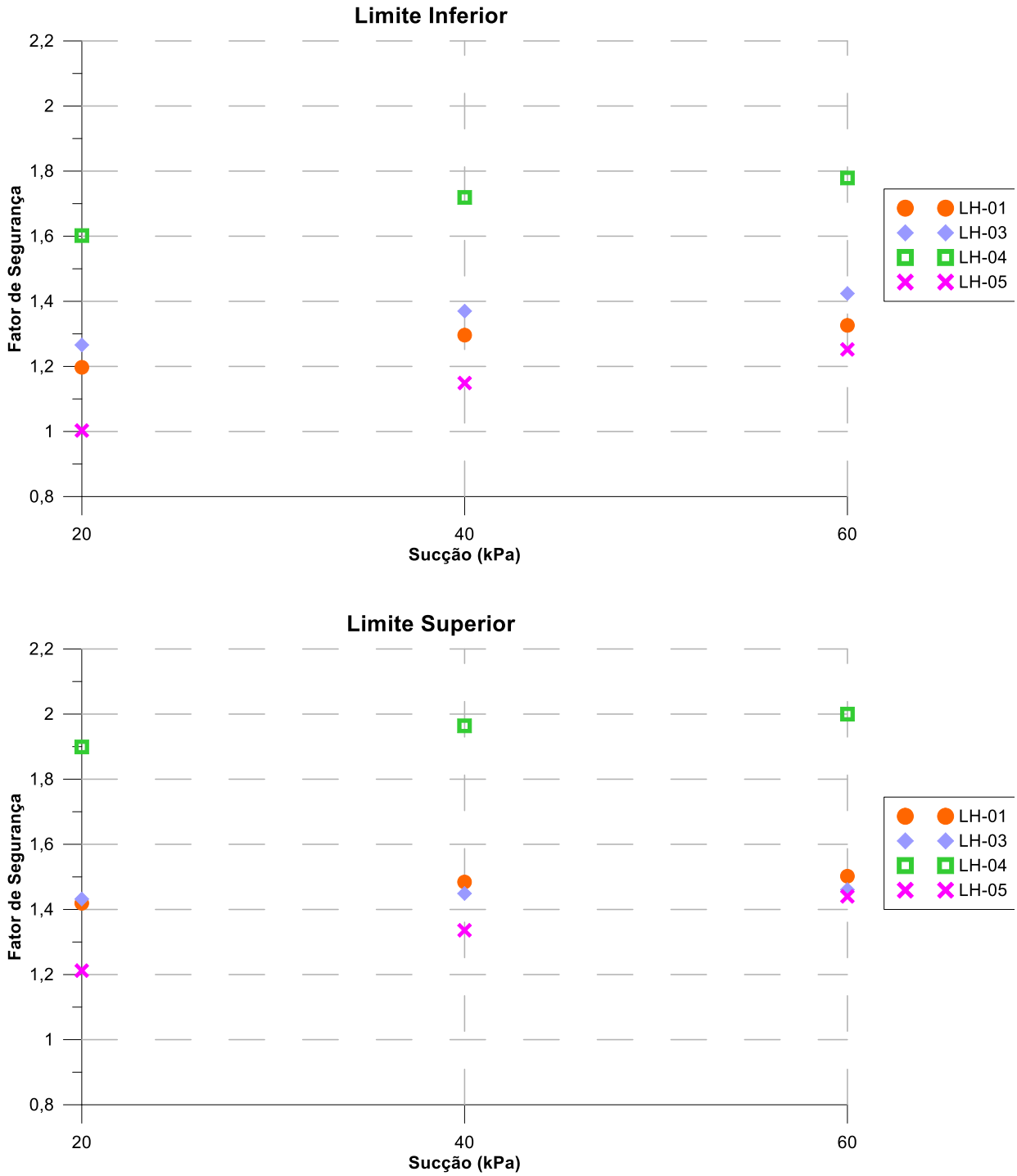


Figura 104 - Gráficos dos fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade

6.5 Análise crítica integrada

6.5.1 Limiares pluviométricos

Como parte do escopo desenvolvido nas etapas iniciais da presente pesquisa (Fase 1), propôs-se limiares pluviométricos para a região da Serra do Mar da BR-376/PR e para a BR-101/SC (Morro do Boi), buscando-se relacionar os registros de precipitação e o histórico disponível de deslizamentos. Tal ferramenta representa um importante instrumento para a gestão da operação rodoviária, uma vez que permite identificar a possibilidade futura de ocorrência de eventos críticos. O número de eventos (deslizamentos) nos quais se dispõe de registros pluviométricos assim como o volume de dados disponíveis representaram algumas limitações inerentes à sua aplicação. Contudo, a calibração contínua dos limites propostos, atentando-se à evolução dos processos naturais e antrópicos que podem reduzir ou aumentar valores de pluviometria crítica, torna-se importante em um processo de gestão de riscos.

Com base no inventário de ocorrências de deslizamentos e na ampliação da série histórica dos registros pluviométricos alcançada na presente pesquisa, buscou-se aperfeiçoar os limiares pluviométricos pré-definidos. Para tal, deu-se continuidade nas análises com base nos estudos desenvolvidos em âmbito nacional e internacional (Victorino, 2015; Victorino *et al*., 2017; Trevizoli *et al*., 2018; Ferreira *et al*., 2018).

O aumento da série histórica dos dados de ocorrências de deslizamentos e dos pluviógrafos localizados na BR-376/PR e na BR-101/SC (Morro do Boi) permitiu o aperfeiçoamento dos limiares com base na metodologia proposta por D'Orsi (2011), cujos resultados apresentam uma melhor correlação com os dados de ambos os locais em estudo. Segundo o autor, não há uma metodologia única que seja adequada para todas as situações, mas cada região, a depender da disponibilidade dos dados e das características físicas, apresenta uma metodologia específica que é mais adequada.

Os trabalhos na literatura que tratam do desenvolvimento de limiares pluviométricos para diferentes regiões apresentam uma tendência em fixar valores de acumulado diário de precipitação (mm/24h) e os relacionar com diferentes acumulados, como 24h, 48h, 72h e 96h, buscando a melhor configuração que proporciona a separação dos eventos pluviométricos que não causam deslizamentos daqueles eventos que os causam (D'Orsi, 2011). Os limiares desenvolvidos para a BR-376/PR e para o Morro do Boi (BR-101/SC) apresentaram diferentes configurações que se mostraram mais adequadas conforme as características dos eventos pluviométricos relacionados aos deslizamentos, conforme será apresentado nos subitens 6.5.1.1 e 6.5.1.2.

Nos gráficos foram plotados todos os eventos pluviométricos, independente da ocorrência ou não de deslizamentos. Os eventos relacionados a deslizamentos foram destacados para, a partir deles, traçarem-se as linhas que delimitam o limiar. Além disso, é importante ressaltar que o acumulado relacionado à precipitação diária não a incluiu em seu somatório, conforme Figura 105.

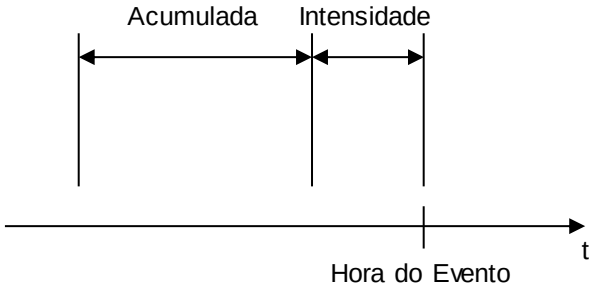


Figura 105 – Linha do tempo mostrando a não sobreposição da precipitação acumulada (D'Orsi, 2011)

Com o intuito de aplicar os limiares pluviométricos para a gestão de riscos geotécnicos nas áreas de estudo foram definidos quatro diferentes cenários de precipitação acumulada, os quais são utilizados para definição de parâmetros de controle ou "critérios de alerta". O limite inferior representa a fronteira entre os volumes de chuva que não tendem a provocar escorregamentos (Cenário 1) e aqueles com maior probabilidade de deflagrar movimentos de massa. O Cenário 4 representa a ocorrência de eventos cataclísmicos como os registrados em 2008 e 2011, estando associados a

acumulados de precipitações em 24h de pelo menos 100 mm. Já os Cenários 2 e 3 representam condições que podem deflagrar processos de instabilização em pontos específicos e diferenciam-se de acordo com a precipitação acumulada.

Os limiares pluviométricos elaborados apresentam a indicação da “condição atual”, a qual se refere à condição do último evento pluviométrico registrado no processamento dos dados. Ou seja, é possível realizar o acompanhamento da situação atual relativa à instabilidade e movimentação de massa dos taludes rodoviários próximos a localização de cada um dos pluviógrafos. Neste relatório, a condição atual se refere ao último dia considerado dentro das análises desta pesquisa, ou seja, 31 de dezembro de 2018.

Destaca-se ainda que o preenchimento de falhas dos dados de precipitação não modificou de forma significativa os limiares pluviométricos. Dessa forma, esses gráficos não contemplam tal procedimento. Com base nesse contexto, nos itens subsequentes são apresentados a seguir os limiares elaborados e as interpretações individuais para cada região (BR-376/PR e BR-101/SC) desenvolvidas a partir da série histórica de cada pluviógrafo e dos deslizamentos registrados.

6.5.1.1 BR-376/PR

Os limiares pluviométricos desenvolvidos para a BR-376/PR levaram em consideração a área de contribuição das bacias Norte e Sul onde estão instalados os pluviógrafos (Figura 3) e, ainda, a área de influência de cada pluviógrafo (Tabela 9). Os limiares dos pluviógrafos localizados na Bacia Norte apresentaram como melhor configuração a relação entre precipitação acumulada em 24h (mm/24h ou mm/1 dia) e precipitação acumulada em 480h (mm/480h ou mm/20 dias). Já os da Bacia Sul apresentaram como melhor configuração a relação entre precipitação acumulada em 24h (mm/24h ou mm/1 dia) e precipitação acumulada em 168h (mm/168h ou mm/7 dias).

Como ressaltado anteriormente, os limiares para cada bacia apresentaram diferentes configurações devido a diferenças com relação às séries históricas de dados e de processos de movimentos de massa de cada pluviógrafo. As bacias apresentaram comportamento pluviométrico divergente: a Bacia Sul apresentou maiores registros de precipitação do que a Bacia Norte. Desta forma, um menor acumulado de precipitação (7 dias) foi necessário para separar eventos que provocaram ou não deslizamentos na Bacia Sul, enquanto que para a Bacia Norte foi necessário um maior acumulado de precipitação (20 dias).

Para a delimitação dos limiares foram utilizados os eventos apresentados na Tabela 22. Para cada evento de deslizamento foi atribuído um código de identificação. As ocorrências nomeadas com letras correspondem aos registros pluviométricos do pluviógrafo de Itararé (operado pela Transpetro) e aquelas nomeadas com números representam dados dos registros obtidos a partir de cada pluviógrafo. O instrumento de Itararé está localizado na Bacia Sul, próximo ao pluviógrafo P3, e sua série histórica foi utilizada com o intuito de considerar os eventos de deslizamento registrados anteriormente à instalação dos equipamentos pertencentes à Autopista Litoral Sul. Logo, para as ocorrências registradas antes do ano de 2014 foram utilizados dados de precipitações registradas pelo pluviógrafo de Itararé.

A ocorrência denominada pela sigla “M” não foi apresentada no gráfico pois, além do pluviógrafo ter apresentado falha no registro dos dados pluviométricos no mesmo período deste evento, o intervalo de dados também incluiu a transição entre o pluviógrafo de Itararé e o pluviógrafo P6. Para possibilitar a inclusão da ocorrência denominada pelo número “3”, excepcionalmente, foi aplicada a metodologia de preenchimento de falha do pluviógrafo P3.

Os limiares pluviométricos para cada uma das bacias são apresentados nas Figuras 106 e 107. Para validar os cenários dentro de cada limiar foram avaliados os números de pontos que estão localizados dentro de cada cenário (Tabelas 23 e 24). Como esperado, o cenário 1 apresentou as maiores porcentagens (> 90%) de eventos

pluviométricos não associados à deslizamentos. Em complemento a isso, para todos os limiares, 100% dos pontos localizados no cenário 4 corresponderam a escorregamentos.

No ano de 2017 foram registradas 4 ocorrências de deslizamentos ao longo da rodovia, sendo estes identificados pelo número “9” dentro do limiar pluviométrico desenvolvido para a área de abrangência do pluviógrafo P4. As ocorrências registradas no ano de 2017 estavam relacionadas com um acumulado de chuva de 201,4 mm em 1 dia e acumulados de 44 mm nos 7 dias anteriores a este evento. Desta forma, estas ocorrências (“9”) foram inseridas no cenário 4, sendo este o cenário mais crítico do limiar. Ainda vale ressaltar que para a área de abrangência do pluviógrafo P4 o evento de 2017 apresentou o maior acumulado diário (24h) dentro de toda a série histórica de eventos de deslizamento que se tem registrada. Já em 2018 não foi registrada nenhuma ocorrência de deslizamento na região da BR-376/PR. Assim como já abordado no item 6.2.1, o ano de 2018 apresentou o menor acumulado anual de precipitação em relação a toda a série histórica de monitoramento na região para todos os pluviógrafos, desde 2014.

Apesar do Cenário 1 não estar relacionado a condições que desencadeiam a ocorrência de deslizamentos na BR-376/PR, para os limiares pluviométricos dos instrumentos P1, P2, P3, P4 e P5 foram registrados eventos nestas condições. Neste caso, sugere-se que estes deslizamentos deveriam ser avaliados individualmente. Os limiares desenvolvidos são aplicados para eventos de instabilidade ocasionados principalmente por precipitações, desta forma as ocorrências que foram inseridas no Cenário 1 podem estar relacionadas também com outros fatores.

Ressalta-se, assim como já abordado anteriormente, que os limiares pluviométricos desenvolvidos para a BR-376/PR podem ser refinados com o aumento das séries históricas dos dados de precipitação e dos registros de ocorrências de deslizamentos na área.

Tabela 22 - Relação das ocorrências de deslizamento registradas e pluviógrafos considerados para elaboração dos limiares pluviométricos

ANO	CÓD.	km	P5 - 652+900	km	P1 – 660+570	km	P6 - 662+000	km	P2 - 667+900	km	P3 - 669+300	km	P4 - 676+800
2010 (*)	A			657+700	22/02/10								
	B							668+950	03/06/10	668+950	03/06/10		
	C	645+240	07/06/10										
	D			658+100	09/08/10								
	E							667+160	06/12/10				
2011 (*)	F	657+050	11/03/11	660+570	11/03/11	662+150	11/03/11	667+360	11/03/11	669+600	11/03/11	672+260	11/03/11
	G	657+050	12/03/11	660+570	12/03/11	662+150	12/03/11	667+360	12/03/11	669+600	12/03/11	672+260	12/03/11
	H	657+050	13/03/11	660+570	13/03/11	662+150	13/03/11	667+360	13/03/11	669+600	13/03/11	672+260	13/03/11
	I											672+350	08/12/11
2012 (*)	J	652+640	06/06/12					668+150	06/06/12	668+150	06/06/12		
	K	652+640	07/06/12					668+150	07/06/12	668+150	07/06/12		
2014	L	651+870	19/02/14 (**)										
	M					662+950	17/03/14 (**)						
	1											675+830	03/04/14
2015	2							669+000	12/03/15	669+000	12/03/15		
	3									670+280	13/03/15(***)		
	4											675+820	30/10/15
	5			660+267	20/11/15								
	6			657+200	25/11/15								
2016	7											672+757	20/07/16
	8			658+100	01/08/16								
2017	9											676+070 678+870 680+400 681+270	11/02/2017

(*) Registros do pluviômetro de Itararé.
(**) Pluviógrafos P5 e P6 com registro a partir de setembro de 2014.
(***) Falha de registro a partir do dia 13/03/2015, pluviógrafo P3.

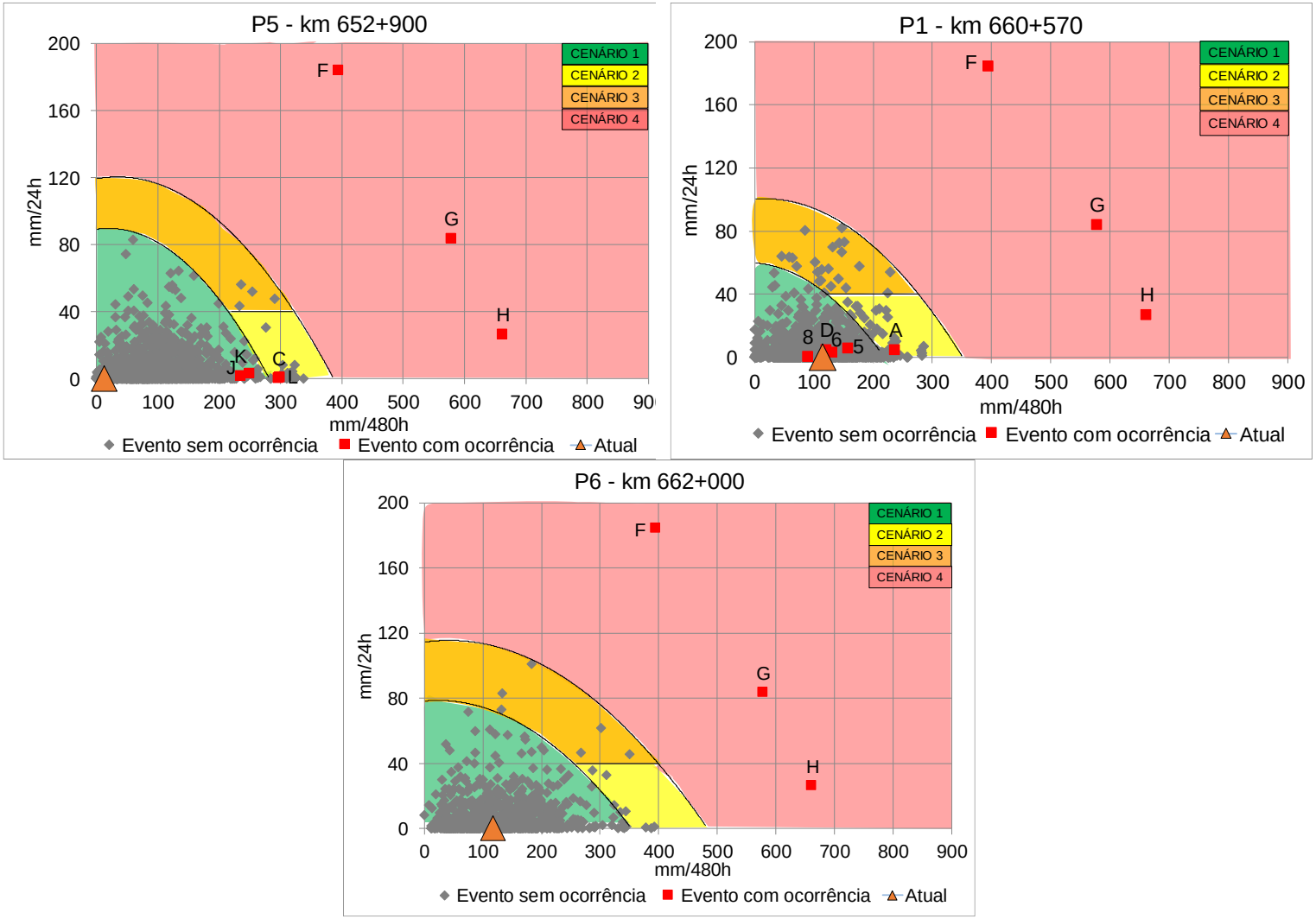


Figura 106 - Limiares pluviométricos correspondentes à Bacia Norte (pluviógrafos P5, P1 e P6)

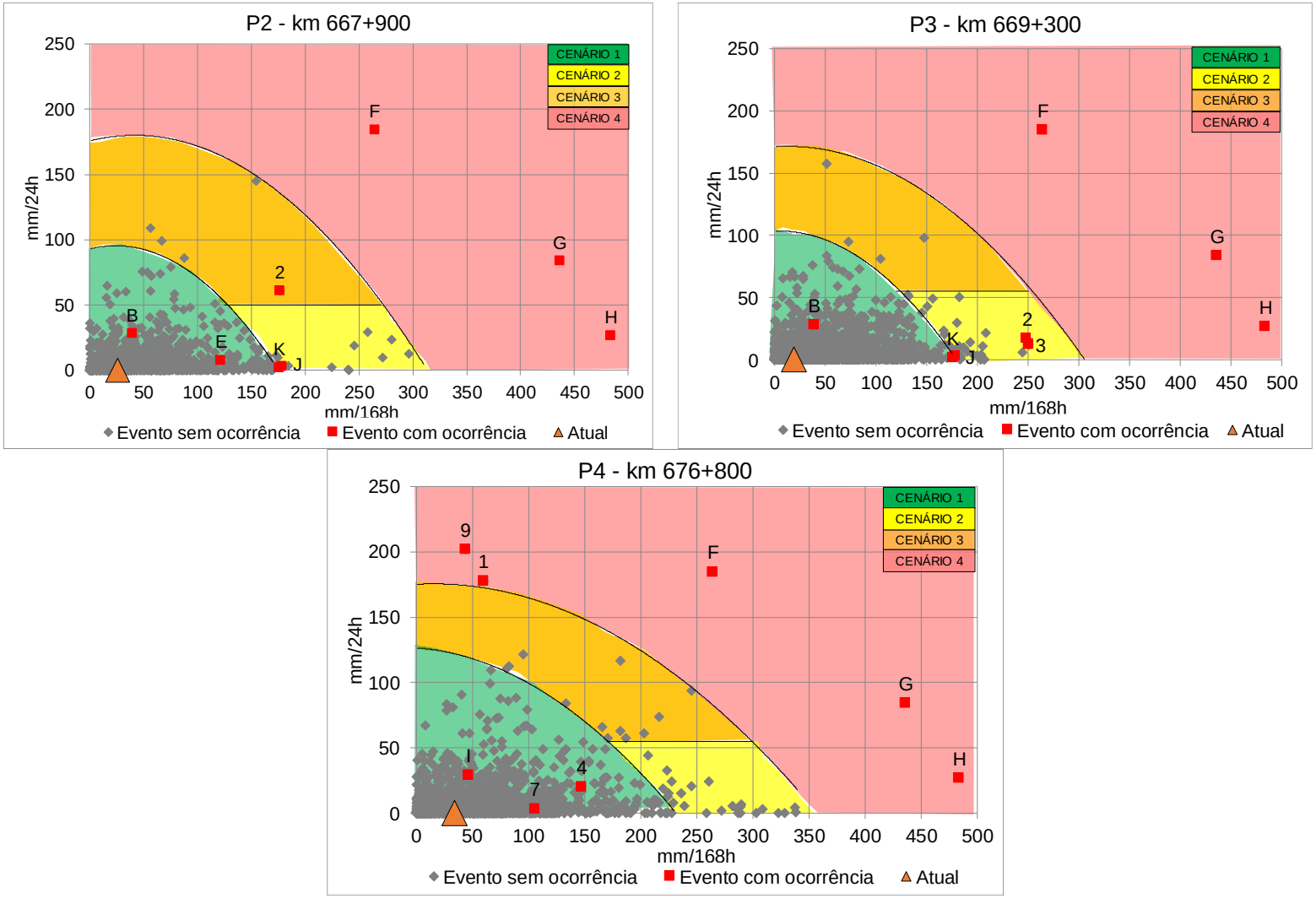


Figura 107 - Limiares pluviométricos correspondentes à Bacia Sul (pluviógrafos P2, P3 e P4)

Tabela 23 - Percentual de eventos em cada cenário para os limiares pluviométricos dos pluviógrafos da Bacia Norte

Pluviógrafo	Cenário	Número de eventos	Ocorrências	Total de eventos (%)	Eventos com ocorrência (%)
P1	1	1531	4	94,51	0,26
	2	62	1	3,83	1,61
	3	24	0	1,48	0,00
	4	3	3	0,19	100,00
P5	1	1464	2	98,19	0,14
	2	20	2	1,34	10,00
	3	4	0	0,27	0,00
	4	3	3	0,20	100,00
P6	1	1656	0	98,34	0,00
	2	11	0	0,65	0,00
	3	14	0	0,83	0,00
	4	3	3	0,18	100,00

Tabela 24 - Percentual de eventos em cada cenário para os limiares pluviométricos dos pluviógrafos da Bacia Sul

Pluviógrafo	Cenário	Número de eventos	Ocorrências	Total de eventos (%)	Eventos com ocorrência (%)
P2	1	1468	2	98,39	0,14
	2	16	2	1,07	12,50
	3	5	1	0,34	20,00
	4	3	3	0,20	100,00
P3	1	1622	1	97,01	0,06
	2	43	4	2,57	9,30
	3	4	0	0,24	0,00
	4	3	3	0,18	100,00
P4	1	1633	3	97,55	0,18
	2	25	0	1,49	0,00
	3	11	0	0,66	0,00
	4	5	5	0,30	100,00

6.5.1.2 BR-101/SC

Para a definição do limiar pluviométrico relacionado ao km 140+700 m, no Morro do Boi, foram utilizados os dados de ocorrência (Tabela 25) registrados dentro da área de contribuição da bacia em que o pluviógrafo se encontra, entre os quilômetros 135 e 151, conforme apresentado na Figura 108.

Tabela 25 - Relação das ocorrências de deslizamento registradas para o pluviógrafo do Morro do Boi

Código	Data	Local (km)	Pista
A	04/04/2013	131+250	Sul
		141+190	Sul
		145+250	Sul
B	28/09/2015	140+570	Sul
		141+500	Sul
C	14/10/2015	145+220	Sul
D	25/03/2016	140+740	Sul
E	13/04/2016	138+700	Sul
		139+540	Sul
		139+710	Sul
		140+060	Sul
		140+230	Sul
		140+890	Sul
		141+020	Sul
		141+080	Sul
		145+290	Sul
F	10/01/2018	148+760	Norte

Para este local, a configuração de precipitação acumulada que melhor representou as ocorrências registradas foi a precipitação acumulada diária (mm/24h) e a precipitação acumulada em 72h (mm/72h ou mm/3 dias), conforme Figura 109. Dentro dessa configuração, a maior parte dos pontos se localizou no cenário 1 e um pequeno percentual no cenário 4, como esperado. Além disso, 100% dos eventos que se encontraram no cenário 4 são relacionados à deslizamentos (Tabela 26).

Tabela 26 - Percentual de eventos em cada cenário para o limiar pluviométrico do Morro do Boi

Cenário	Número de eventos	Ocorrências	Total de eventos (%)	Eventos com ocorrência (%)
1	1515	0	94,75%	0,00%
2	57	2	3,56%	3,39%
3	24	1	1,50%	8,33%
4	3	3	0,19%	100,00%

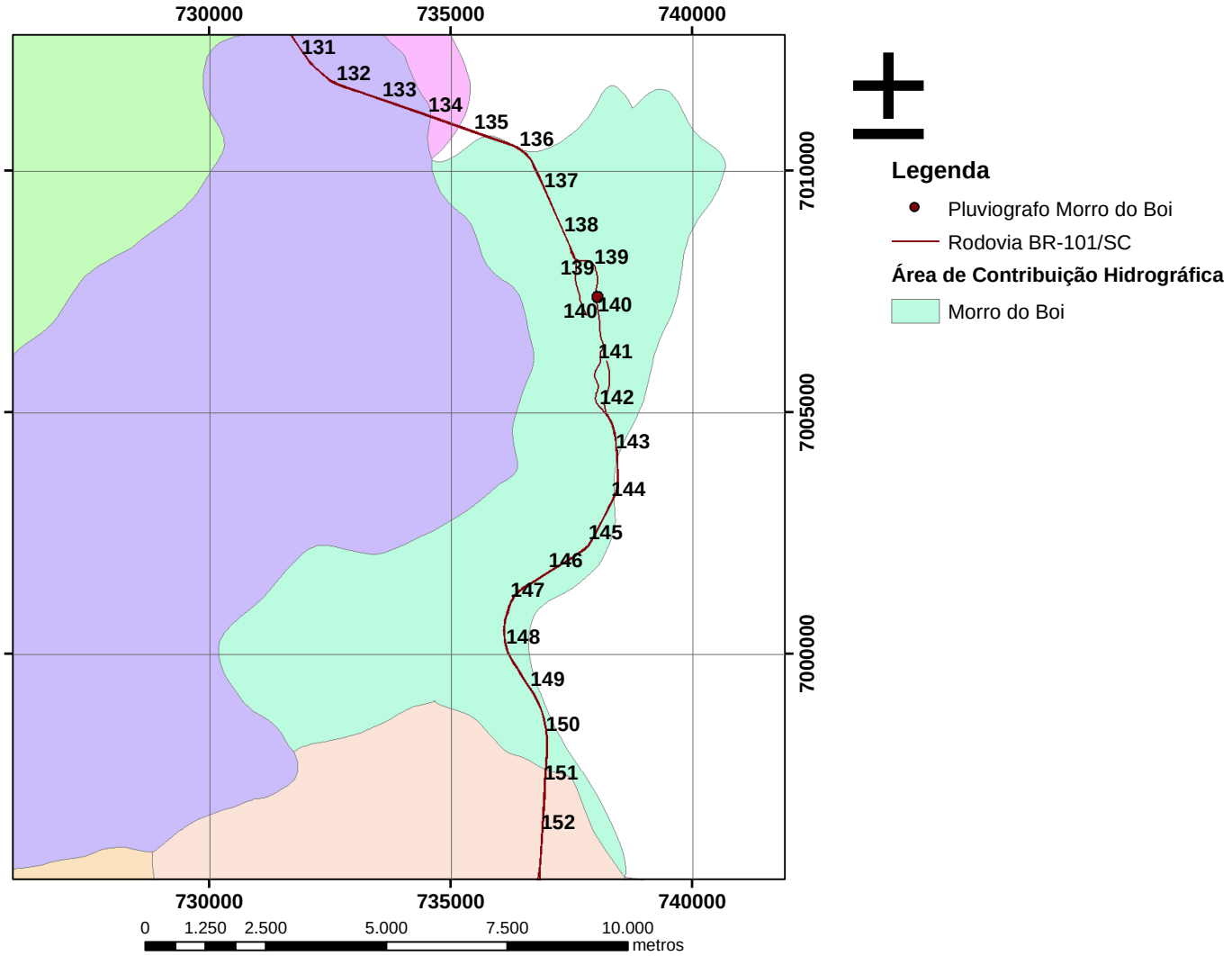


Figura 108 - Área de contribuição hidrográfica de bacias da BR-101/SC

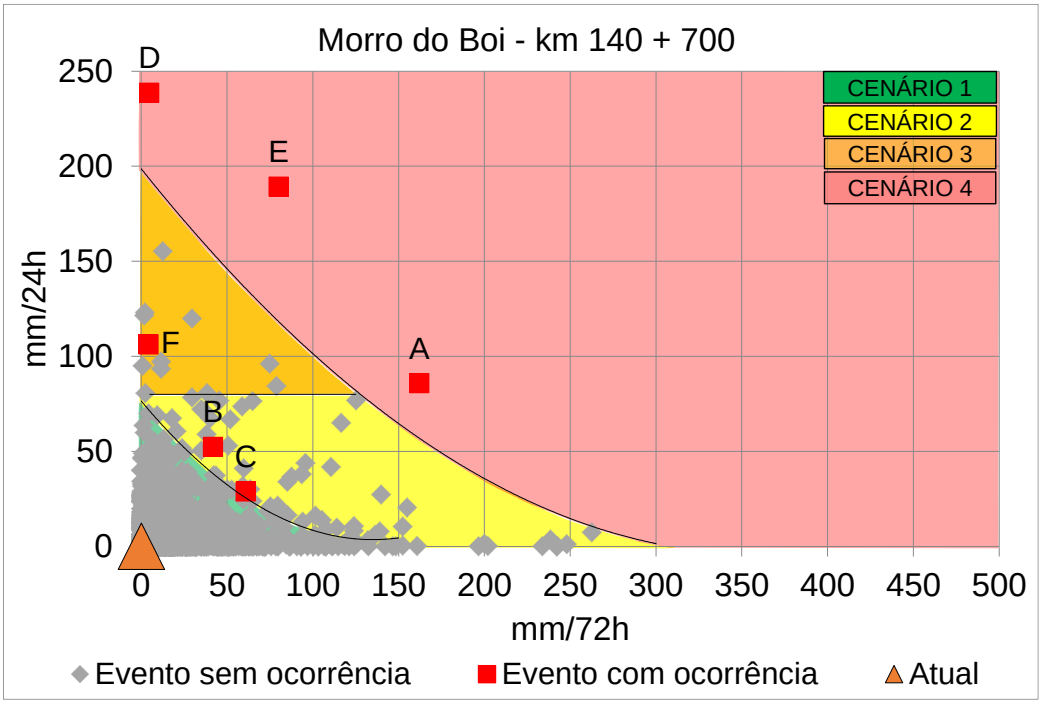


Figura 109 - Limiar pluviométrico correspondente ao pluviógrafo do Morro do Boi

Em complemento ao desenvolvimento do limiar pluviométrico baseado na metodologia de D'Orsi (2011), buscou-se, durante a pesquisa, encontrar outras correlações entre precipitação e deslizamentos. Notou-se que, ao se analisar acumulados de chuva durante um ano hidrológico (julho de um ano e junho do ano seguinte), alguns picos eram perceptíveis e estavam relacionados às ocorrências de deslizamentos. As Figuras 110 a 112 apresentam os gráficos elaborados para os anos em que há registro de ocorrências. Nelas observou-se que das 6 datas com ocorrências, 4 delas encontravam-se num pico de precipitação. A análise dos gráficos e da base de dados permitiu identificar que tais picos estavam relacionados a acumulado de dois dias maior que 200 mm ou acumulado diário maior que 100 mm. Essa conclusão permitiu aperfeiçoar os limiares pluviométricos, a fim de garantir a segurança da rodovia.

Os gráficos de precipitação acumulada anual mostram picos de precipitação fáceis de identificar nos anos de 2013 (Figura 110) e 2016 (Figura 111). Esses pontos correspondem exatamente a dias com registros de escorregamentos. A ocorrência registrada em janeiro/2018 também está relacionada a um pico no gráfico (Figura 112), que, devido a sua precipitação mais baixa, não é tão atenuado.

Os deslizamentos registrados em 2015, conforme descrito no item 6.2.2.1, estão relacionados a chuvas de maior duração, com elevada precipitação mensal, mas volume diário de precipitação inferior aos demais. Assim, o gráfico de acumulado anual aumenta rapidamente no ano de 2015, mas não há picos de precipitação. Eventos pluviométricos com essas características são mais difíceis de identificar pelos gráficos de precipitação acumulada anual, mas são identificados como risco pelo limiar pluviométrico apresentado anteriormente.

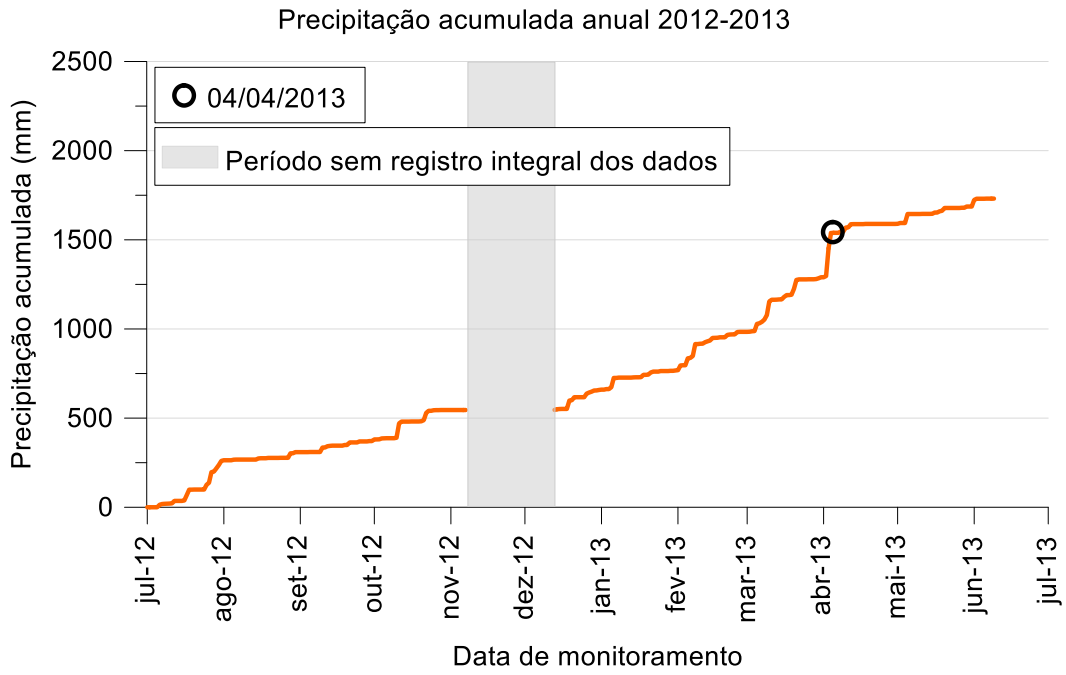


Figura 110 - Acumulado de precipitação entre julho/2012 e junho/2013

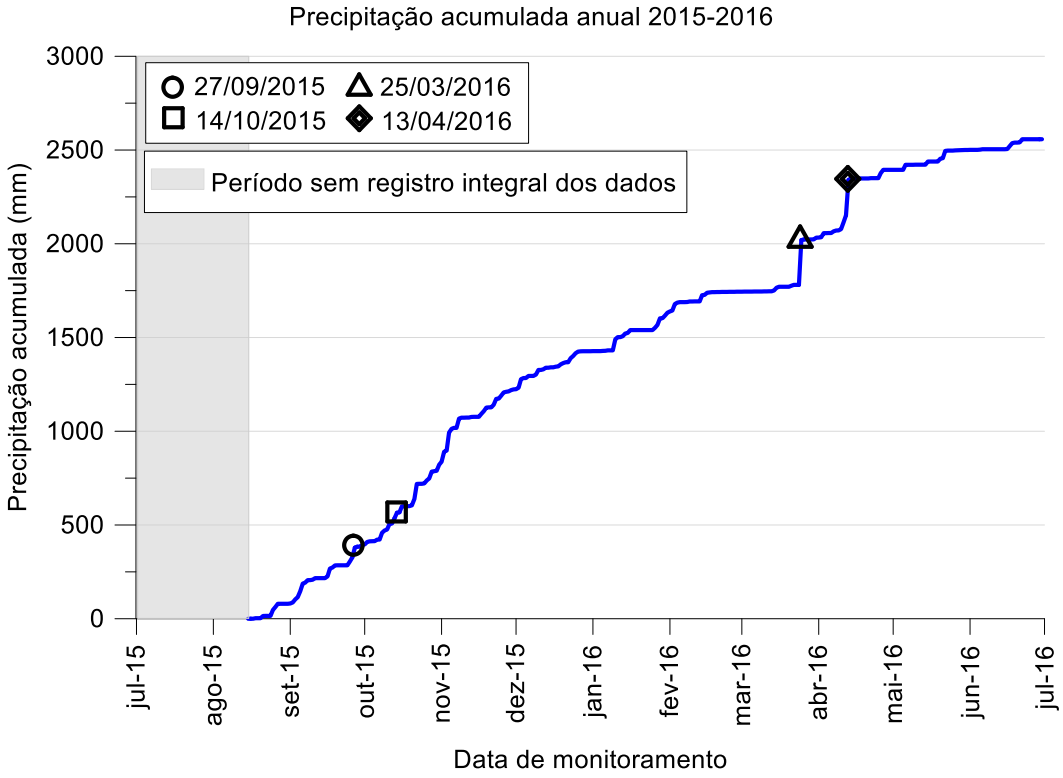


Figura 111 - Acumulado de precipitação entre julho/2015 e junho/2016

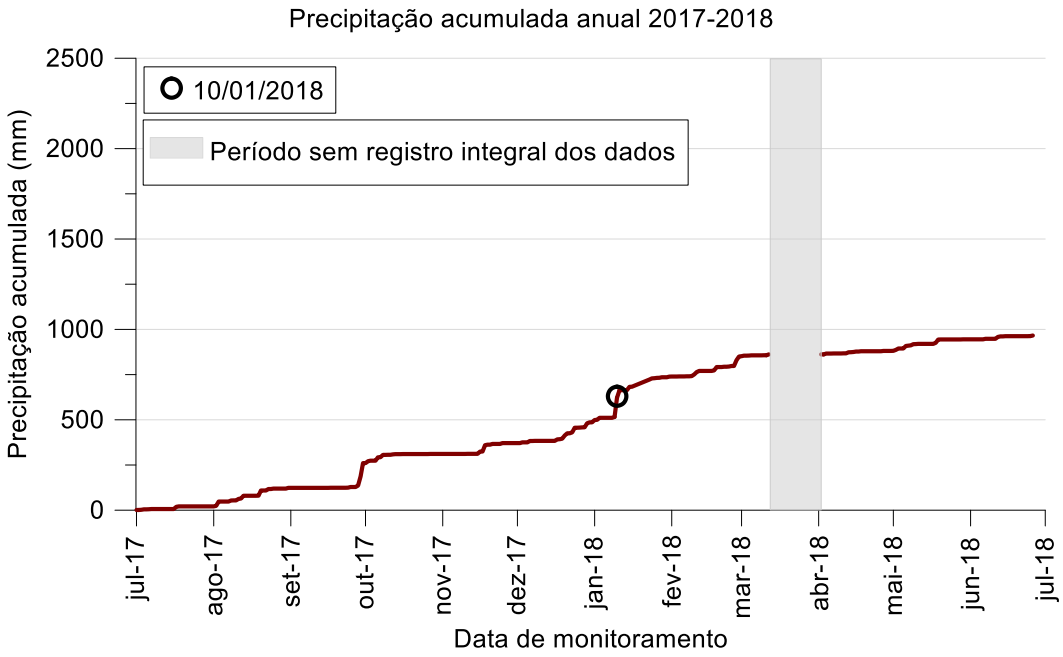


Figura 112 - Acumulado de precipitação entre julho/2017 e junho/2018

As correlações entre a precipitação e os movimentos do solo definidos para o trecho que compreende o Morro do Boi são uma boa alternativa para o gerenciamento do risco geotécnico da rodovia quando se analisam os escorregamentos provocados por

chuvas de maior intensidade e menor duração. Tanto o limiar pluviométrico quanto os gráficos de precipitação cumulativa anual representaram bem os registros de ocorrências de escorregamentos relacionados à alta precipitação em 1 ou 2 dias. Os picos encontrados nos gráficos anuais, com ou sem ocorrência de deslizamento, são plotados em cenários críticos do limiar pluviométrico, confirmando a utilidade de ambas as correlações para a predição de deslizamentos relacionados a eventos com essas características.

As ocorrências relacionadas à precipitação de maior duração, entretanto, não são visíveis nos gráficos anuais, impossibilitando seu uso na previsão de movimentos deflagrados por eventos pluviométricos com essas características. No limiar pluviométrico, essas ocorrências são encontradas em cenários críticos.

6.5.1.3 Limiares pluviométricos da literatura

Buscou-se avaliar comparativamente os limiares propostos para as duas áreas de estudo com base em trabalhos da literatura relacionados ao tema. Mendes *et al*. (2015), desenvolveram um limiar pluviométrico para o município de São José dos Campos, São Paulo. Assim como observado para os limiares elaborados para a região da BR-376/PR, os autores identificaram a incidência de alguns deslizamentos localizados na região do limiar a qual teoricamente indica condições que não promovem a ocorrência desses eventos, correspondente ao Cenário 1 no caso dos limiares da BR-376/PR e BR-101/SC. Os autores também destacaram que, conforme Santoro *et al.* (2010), esse tipo de discrepância deve estar relacionada com o fato de que os limiares pluviométricos não levam em consideração outros fatores condicionantes aos movimentos de massa, com destaque para fatores antrópicos.

A partir disso, Mendes *et al*. (2015) elaboraram um limiar baseado apenas em ocorrências associadas a processos induzidos em taludes de corte/aterro e aquelas deflagradas por fatores antrópicos. Desta forma, sugeriram que os limiares devem ser estabelecidos de maneira discretizada, levando em consideração as particularidades

naturais e antrópicas de cada região, além da adoção de limiares críticos mais conservadores para a deflagração de deslizamentos exclusivamente induzidos e pontuais. O limiar proposto pelos autores relaciona a intensidade da chuva em mm/24h e precipitação acumulada em 3 dias, semelhante ao limiar desenvolvido para o Morro do Boi (BR-101/SC).

Mendes *et al*. (2015) também identificaram que para alguns eventos de deslizamento, a chuva diária desempenhou um papel mais importante para sua deflagração do que a chuva acumulada. Isso também foi observado para os eventos “D” e “F” no limiar pluviométrico da BR-101/SC.

Além disso, os autores ressaltaram a importância de se considerar em estudos de correlação entre precipitações e deslizamentos a variabilidade espacial das chuvas. Para o município de São José dos Campos uma variação espacial da precipitação média anual possui grande peso na deflagração de processos instabilizantes. Desta forma, é possível enfatizar a importância da distribuição dos pluviógrafos ao longo da BR-376/PR, posicionados em diferentes bacias, com comportamentos distintos, e do desenvolvimento dos limiares pluviométricos para cada área de abrangência destes instrumentos.

Zêzere *et al.* (2015) apresentaram em seu trabalho um estado da arte para limiares pluviométricos desenvolvidos para algumas regiões de Portugal. Um dos limiares analisados foi o de Intensidade-Duração, que correlaciona a intensidade do evento pluviométrico em mm/h com sua duração em horas. De acordo com Li *et al*. (2017), esse tipo de limiar é geralmente utilizado em correlações de movimentos de massa com precipitações de curta duração (inferior a 48 horas). Ainda que alguns dos deslizamentos registrados, tanto na BR-376/PR quanto na BR-101/SC, estejam relacionados a eventos com essa característica, não foi possível aplicar esse tipo de limiar nesta pesquisa, pois não há informações acerca do horário exato de cada ocorrência.

Os autores observaram diferenças entre os limiares de Intensidade-Duração para as diferentes regiões de Portugal, as quais foram atribuídas tanto a fatores geológicos e

geomorfológicos, quanto a fatores climáticos. Para qualquer região em particular, as encostas tendem a um estado de equilíbrio que se adequa à quantidade de chuva dessa região (Zêzere *et al*., 2015). Tal observação coube, também, aos limiares desenvolvidos para esta pesquisa, uma vez que foram obtidos diferentes acumulados de precipitação que melhor se adequaram a cada trecho estudado.

Outro limiar pluviométrico apresentado por Zêzere *et al.* (2015) correlaciona eventos pluviométricos contínuos entre 24 e 72 horas com acumulados de chuva antecedentes, entre 3 e 30 dias. Segundo os autores, esse tipo de correlação abrange eventos de chuva em que a relação Intensidade-Duração não é evidente, quando a precipitação deflagrante do movimento é de longa duração. Esse tipo de limiar se assemelha ao que foi desenvolvido nessa pesquisa, com a exceção de que se considerou o acumulado diário independentemente do número de horas em um dia sem registro de chuva. A abordagem sugerida pelos autores é interessante, entretanto, aplicável apenas nos casos em que há registro horário do deslizamento.

Com relação aos cenários definidos para os limiares neste projeto, observou-se que os limiares da literatura, em geral, representam ferramentas simplificadas em comparação às desenvolvidas pois a maior parte dos limiares desenvolvidos apresenta apenas uma “linha” que representa o limiar que separa as condições que condicionam ou não a ocorrência de deslizamentos.

Chaves (2016) apresentou níveis de alerta aplicados em limiares da Fundação Geo-Rio, os quais representam uma expectativa de acidentes geotécnicos e/ou geológicos para a cidade do Rio de Janeiro. Os níveis de alerta foram classificados em baixo, médio, alto e muito alto e também foram inseridos nos limiares com base em diferentes cores para cada região do gráfico. Com base nisso, Chaves (2016) também sugeriu a definição de três regiões de alerta: crítica, atenção e segura.

Além dos níveis de alerta propostos por Chaves (2016), Zêzere *et al*. (2015) apresentaram uma abordagem similar aos cenários de criticidade propostos neste projeto. Os autores os denominaram como limite superior e limite inferior, delimitando três faixas. Abaixo do limite inferior não é esperada a ocorrência de movimentos de

massa e acima do limite superior há elevada probabilidade de ocorrência, sendo que a região intermediária define a faixa de incerteza das condições críticas de precipitação. O limite inferior, de acordo com os autores, é determinado empiricamente como a condição de chuva em que nenhuma ocorrência foi registrada no passado. Neste caso, portanto, não há qualquer registro de movimento de massa na faixa inferior do limiar, mas há uma quantidade muito elevada de eventos pluviométricos que ocorrem na faixa de incerteza, dificultando a utilização deste como critério de alerta.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir são descritas as conclusões gerais obtidas para cada etapa de trabalho desenvolvido ao longo da presente fase desta pesquisa, como o monitoramento da instrumentação geotécnica, implantação de uma plataforma de gerenciamento dos dados de instrumentação, reavaliação de áreas de risco e o aperfeiçoamento dos limiares pluviométricos.

7.1 Monitoramento geotécnico

O monitoramento geotécnico da presente pesquisa foi subdividido em duas áreas: BR-376/PR e BR-101/SC. As principais conclusões obtidas para cada um destes locais de estudo são expostas nos subitens a seguir.

7.1.1 BR-376/PR

Com relação ao monitoramento da instrumentação geotécnica instalada ao longo da BR-376/PR, foi possível ampliar e validar a série histórica dos dados de precipitação por meio da rede de 6 pluviógrafos concebida em fases anteriores das pesquisas. O processamento e análise dos dados permitiu observar a ocorrência de um aumento crescente das precipitações médias diárias registradas na direção Curitiba-Florianópolis, estando os maiores volumes de chuva registrados para níveis de altitude mais próximos ao nível do mar. Além disso, observou-se que em 2017 foram registrados acumulados anuais semelhantes aos do ano de 2015, que foi o mais chuvoso de toda a série histórica. As precipitações observadas mostram-se compatíveis com faixas descritas na literatura para a Serra do Mar, com máximas de 3250 mm. Já o ano de 2018 apresentou o menor acumulado anual de toda a série de dados, onde nem todos os pluviógrafos atingiram a média anual de 1700 mm.

Durante esta etapa do projeto, uma metodologia para o preenchimento dos dados de chuva de todos os pluviógrafos também foi desenvolvida. Tal procedimento foi adotado para estabelecer a continuidade da série histórica dos dados dos instrumentos quando os mesmos apresentam falhas específicas de funcionamento. A metodologia se mostrou eficiente no complemento da série dos dados e pode ser muito útil na análise

de precipitações relacionadas a escorregamentos quando dados da instrumentação mostrarem lacunas temporais ou requererem validação.

O monitoramento na rodovia também englobou o acompanhamento dos dados de medidores de nível d'água. No geral, esses instrumentos indicaram baixas variações na profundidade do lençol freático, confirmando-se o comportamento identificado em etapas anteriores da pesquisa e informações da literatura referente à Serra do Mar, o qual é relacionado com a presença de sistemas de fraturas nas rochas subjacentes.

Por fim, quanto ao monitoramento de medidas de sucção por meio de 4 tensiômetros instalados em campo, as atividades envolveram a calibração e troca de equipamentos da composição destes instrumentos, as quais possibilitaram a correção dos dados obtidos. Destaca-se, contudo, que a continuidade do acompanhamento dos dados é fundamental para garantir o correto funcionamento dos instrumentos.

7.1.2 BR-101/SC

Como parte do monitoramento da BR-101/SC deu-se continuidade às leituras da instrumentação instalada no Morro do Boi em fase anterior do projeto. Com relação à precipitação pluviométrica, os dados do pluviógrafo ao longo de todo o período de monitoramento permitiram identificar que a precipitação acumulada anual, em geral, se aproximou da média proposta para a região, com exceção dos anos de 2015 e 2018, em que os volumes registrados foram consideravelmente superiores e inferiores a esta, respectivamente. Além disso, foi possível identificar as características dos eventos pluviométricos relacionados aos deslizamentos ocorridos nesse trecho da rodovia, auxiliando na elaboração do limiar pluviométrico local. Buscou-se, também, aplicar a metodologia de preenchimento de falhas, assim como elaborado para a instrumentação implantada na BR-376/PR. A correlação entre os dados do pluviógrafo do Morro do Boi e equipamentos próximos foi baixa, não se viabilizando, com isso, a utilização dessa técnica de preenchimento. O monitoramento contou com leituras de nível d'água em um medidor instalado em um furo de sondagem e nos tubos dos inclinômetros. Ao longo de

todo o período, percebeu-se pouca variação nos dados, característica já discutida pelos autores para a região, dado o alto grau de fraturamento das rochas. O aumento do nível d'água foi notado também nas leituras de poropressão dos piezômetros instalados em maior profundidade. Em geral, precipitações diárias superiores a 100 mm ocasionaram uma alteração na poropressão positiva registrada pelos instrumentos.

Os piezômetros instalados em menor profundidade, na região não saturada do talude, tiveram seus valores oscilando devido à infiltração da água da chuva. Os tensiômetros, instalados mais superficialmente, registraram valores de poropressão positiva e negativa, relacionados também à dinâmica da infiltração de água durante o período de monitoramento. Os valores máximos de sucção registrados por tais instrumentos chegaram a 65 kPa.

Em relação aos inclinômetros, as leituras de deslocamento horizontal dos instrumentos permitiram analisar a evolução dos movimentos da encosta. O eixo A do inclinômetro INCL-01 apresentou os maiores deslocamentos, tendo-se observado um deslocamento constante da ordem de 1 mm ao ano, exceto em 2016, em que o deslocamento aumentou para 3 mm, e em 2017, em que o deslocamento ocorreu no sentido oposto, ou seja, contrário à rodovia. O deslocamento máximo acumulado foi de, aproximadamente, 9 mm.

Por fim, o monitoramento da abertura da tela através dos *crackmeters* e das solicitações nas barras através dos *strain gages* não apresentaram variações significativas.

7.2 Implantação de uma plataforma de gerenciamento dos dados

Uma das etapas desta fase da pesquisa consistiu na implementação de uma plataforma de gerenciamento de dados de todo o monitoramento implantado ao longo do trecho de concessão da Autopista Litoral Sul, o qual abrangeu a série histórica completa dos dados e transmissão de novos dados de forma remota.

Para que as leituras fossem transmitidas, algumas modificações em campo foram necessárias. Além disso, as equações utilizadas no processamento foram inseridas na plataforma, de forma que na apresentação gráfica e no *download* dos dados, estes estivessem em sua forma final. A implantação da plataforma permitiu a visualização dos dados em gráficos personalizáveis, tabelas e através do mapa de localização dos instrumentos. Além disso, tornou-se possível inserir alertas para valores críticos pré-determinados pelo usuário.

A implantação da plataforma permitiu o acesso aos dados da instrumentação de forma simplificada e dinâmica. Dessa forma, o monitoramento pode ser realizado por qualquer usuário com acesso à plataforma, *online*, e de maneira rápida, facilitando-se o gerenciamento de riscos da rodovia.

7.3 Reavaliação de áreas de risco

A combinação dos diferentes métodos de investigação permitiu determinar aspectos importantes das duas áreas escolhidas para reavaliação de riscos de escorregamentos. Uma zona composta por depósito de colúvio/tálus foi inferida a partir de valores de resistividade variáveis, baixas velocidades de propagação de ondas sísmicas e informações das sondagens mistas e DPL. Sistemas de fraturas/sistemas intrusivos também foram identificados por meio dos altos valores de velocidade sísmica e descontinuidade das camadas resistivas. Uma camada de aterro foi inferida por apresentar baixos valores de resistividade e de velocidade de onda sísmica, com uma profundidade de penetração do DPL elevada. Destaca-se que todas as interpretações foram baseadas em dados da literatura e nos resultados das sondagens diretas, sendo necessária a extrapolação das informações para porções da área de estudo com menor quantidade de informações diretas.

Com relação às análises de estabilidade, foram considerados diferentes cenários a fim de se avaliar a variação dos parâmetros de resistência dos solos, assim como do nível de sucção matricial. As análises indicaram condições de estabilidade mais críticas,

com superfícies de ruptura próximas à rodovia, para áreas que se encontram em condições naturais típicas da Serra do Mar, particularmente na linha LH-05. Em contrapartida, em região estabilizada por meio de retaludamento foram encontradas condições de maior estabilidade, com superfícies de ruptura críticas distantes da rodovia.

O decréscimo da sucção nos solos, como já esperado, levou a uma redução dos fatores de segurança das regiões analisadas. Observou-se que um possível processo de instabilidade pode ser provocado sem a necessidade de saturação completa do terreno, para sucções da ordem de 20 kPa. Dessa forma, salienta-se a importância do acompanhamento dos dados de instrumentação geotécnica instalada no local, principalmente para o controle dos riscos relacionados a eventos causados pela ocorrência de chuvas extremas e consequente diminuição da sucção dos solos.

Levando-se em consideração as interpretações dos dados obtidos, o grupo de pesquisadores destaca algumas recomendações que podem ser adotadas a fim de aumentar a segurança geotécnica das áreas analisadas: instalação de drenos superficiais na região do km 667+900 m, podendo ser ampliada para regiões próximas com características similares; e investigações adicionais para se avaliar a viabilidade de técnicas de estabilização com retaludamento ou contenção com solo grampeado.

Salienta-se que a instalação de drenos horizontais profundos (DHP) possivelmente não se mostraria efetiva, uma vez que o lençol freático tende a não apresentar influência na instabilidade das áreas avaliadas, visto que o mesmo não mostra variações significativas como consequência do alto nível de fraturamento no maciço. Conforme abordado nas análises dos medidores de nível d'água no subitem 6.2.1.2, com base na descrição dos testemunhos de rocha obtidos no local e avaliação em campo de afloramentos rochosos, foi possível concluir que a região apresenta rocha muito fraturada, controlando a posição do lençol freático.

Por fim, uma análise estrutural do maciço rochoso também foi considerada na avaliação das condicionantes para eventos de instabilidade. Os resultados apresentaram uma correspondência com as respostas obtidas por meio dos perfis de eletrorresistividade e a família de fraturas 2, com atitude geral de 266/17, indicando uma

orientação que pode favorecer a ocorrência de processos de instabilidade no maciço rochoso.

7.4 Limiares Pluviométricos

O aumento da série histórica dos dados pluviométricos e dos eventos de instabilidade registrados ao longo das áreas em estudo (BR-376/PR e BR-101/SC) permitiu o aperfeiçoamento dos limiares pluviométricos desenvolvidos em fases anteriores desta pesquisa. Os limiares baseados na metodologia de D'Orsi (2011) apresentaram uma melhor compatibilidade com os dados da série histórica para a separação de eventos de precipitação que condicionam ou não a instabilidade das encostas nas áreas de estudo.

Para a área de estudo do Morro do Boi (BR-101/SC), também foi desenvolvido um método baseado em acumulados de chuva em um ano hidrológico (julho a junho). A metodologia permitiu identificar uma correlação dos dados de escorregamentos com picos nos gráficos de chuva anual. Além disso, observou-se que condições de 2 dias acumulados de chuva maiores que 200 mm ou 1 dia de chuva com mais de 100 mm tendem a aumentar as condições locais de instabilidade. Vale destacar que o método se mostrou mais aplicável na avaliação de chuvas de maior intensidade e curta duração, sendo seu uso ainda não validado para análise da influência de chuvas de menor intensidade e longa duração no desencadeamento de eventos de instabilidade. O método de acumulado de chuva em um ano hidrológico também foi testado para os dados disponíveis da região da BR-376/PR, contudo o mesmo não apresentou uma correlação com os eventos de escorregamentos registrados no local.

A divisão dos limiares pluviométricos em diferentes cenários aperfeiçoou o seu uso como ferramenta de auxílio à gestão de riscos na rodovia. Por fim, vale ressaltar que os limiares propostos podem ser gradualmente ajustados com o aumento da série histórica dos dados de chuva e de registros de escorregamentos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **Orientações para consistência de dados pluviométricos** / Agência Nacional de Águas; Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. -- Brasília: ANA, SGH, 2012. 21p.: il. Disponível em: <https://goo.gl/hQUwxo>. Acesso em: 09 out. 2017.

ALMEIDA, A. S.; ARAÚJO, F. S.; SOUZA, G. S. Determinação da curva parcial de retenção de água de um latossolo vermelho por tensiomêtria. **Scientia Plena**, v. 6, n. 9, 2010.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Mapa Iterativo da Precipitação Média Anual e Tempo de Retorno**. Disponível em: < http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=da8c9edf91804682b269e9d631117619>. Acesso em: 10 jan. 2019.

ASSAD, E. D.; MASUTOMO, R.; ASSAD, M. L. L. Estimativa das precipitações máximas prováveis com duração de 24 horas e de 30 minutos – caso dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 27, n. 5, p. 677-686, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5777-00: Standard guide for using seismic refraction method for subsurface investigation**. 2011.

AUTOPISTA LITORAL SUL – ALS. Relatório Final – **Riscos geológico-geotécnicos em taludes rodoviários: Desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento digital de informações para a BR-376, trecho da Serra do Mar (PR-SC)**. 2015.

BASTOS, N. J. **Interpretação racional do ensaio DPL**. 2016. Dissertação de mestrado – Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista, Área de concentração Geotecnia. Bauru, SP.

BEKLER, T.; EKINCI, Y. L.; DEMIRCI, A.; ERGINAL, A. E.; ERTEKIN, C. Characterization of a landslide using seismic refraction, electrical resistivity and hydrometer methods, Adatepe – Çanakkale, NW Turkey. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 16, n. 3, p. 115-126, 2011.

BENESTY J., CHEN J., HUANG Y., COHEN. **Pearson Correlation Coefficient.** In: Noise Reduction in Speech Processing. Springer Topics in Signal Processing, vol 2. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.

BICHLER, A.; BOBROWSKY, P.; BEST, M.; DOUMA, M.; HUNTER, J.; CALVERT, T.; BURNS, R. Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach: the Quesnel Forks landslide. **Landslides**, n. 1, p. 29-40, 2004.

BORGES, R. W. **Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletrorresistividade**. 2002. Dissertação de Mestrado em Geofísica – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

BRAGA, A. C. D. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. 2006. Tese de Livre-Docência – Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, SP.

BRAGA, A. C. O.; MALAGUTTI, W.; DOURADO, J. C.; CHANG, H. K. Correlation of electrical resistivity and induced polarization data with geotechnical survey standard penetration test measurements. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 4, p. 123-130, 1999.

CHAN, Y. H. (2003). **Biostatistics 104: Correlational Analysis**. Basic Statistics for Doctors. Singapore Med J. Vol 44(12): 614-619. Disponível em: <https://goo.gl/tsjGUu>. Acesso em: 09 out. 2017.

CHAVES, F. L. **Proposta de correlação chuva vs escorregamento aplicada à cidade do Rio de Janeiro**. 2016. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

COELHO, S. L.; TEIXEIRA, A. S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 536-545, 2004.

COSENZA, A. B. M.; ARIAS, M. E. S. **La equivalencia y supresión en la resolución del problema inverso en geoeléctrica: aplicación en Santa Lucía Cotzumalguapa, Guatemala**. Revista Geológica de América Central, n. 34-35, p. 99-108, 2006.

CUMMING, G., FIDLER, F., VAUX, D.L. Error Bars in Experimental Biology. **The Journal of Cell Biology**, 177, 7-11, 2007. <http://dx.doi.org/10.1083/jcb.200611141>.

D'ORSI, R. N. **Correlação entre Pluviometria e Escorregamentos no Trecho da Serra dos Órgãos da Rodovia Federal BR-116 RJ (Estrada Rio-Teresópolis).** Tese (Doutorado). UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2011.

FERREIRA, K. S. de M.; SESTREM, L. P.; GONZÁLEZ, A. A. M.; KORMANN, A. C. M.; FARO, V. P. Instrumentação geotécnica como ferramenta de gestão de riscos rodoviários: um estudo de caso no trecho de Serra do Mar da BR 376/PR. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, v. 1, n. 11, 2018.

GEOKON. Instruction **Manual: Model 4500**. Geokon, Incorporated, 2009.

GEOKON. **Instruction Manual: Model 4900**. Geokon, Incorporated, 2010.

GONZÁLEZ, A. A. M. **Estudo de séries de leituras obtidas através do monitoramento da instrumentação geotécnica implantada em uma encosta litorânea**. 2013. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, Área de concentração em Geotecnia. Curitiba, PR.

GONZÁLEZ, A. A. M. **Simulação geológico-geotécnica para avaliação de estabilidade de taludes a partir de técnicas de geoprocessamento**. 2017. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná, Área de concentração Geologia Ambiental. Curitiba, PR.

GONZÁLEZ, 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.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. Ensaio de Correlação entre Pluviometria e Deslizamentos em Meio Tropical úmido. In: SIMPÓSIO LANDSLIDES AND OTHER MASS MOVEMENT DA IAEG, Praga, 1977.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Cartas Climáticas do Paraná – Precipitação Média Anual**. Disponível em:<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=595>. Acesso em: jul. 2017.

ISRAIL, M.; PACHAURI, A. K. Geophysical characterization of a landslide site in the Himalayan foothill region. **Journal of Asian Earth Sciences**, n. 22, p. 253-263, 2003.

JONGMANS, D.; GARAMBOIS, S. Geophysical investigation of landslides: a review. **Bulletin Société Géologique de France**, v. 178, n. 2, p. 101-112, 2007.

KANJI, M. A., CRUZ, P. T.; MASSAD, F.; ARAUJO FILHO, H. A. Basic and Common Characteristics of Debris Flows. In: PAN AM. SYMPOSIUM E COBRAE, 2nd, 223-231, Rio de Janeiro, Brazil, 1997.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration**: Blackwell Science Ltd., 3ª ed, 2002.

KORMANN, A. C. M.; PRETTO, J. H. F.; SESTREM, L. P.; CAMPOS, A. L. **Avaliações de estabilidade e do desempenho de sistemas de proteção de taludes rodoviários em uma encosta litorânea**. In: IX Workshop Desenvolvimento Tecnológico nas Concessões de Rodovias: 'Soluções Técnicas e Aplicadas', 2014, Brasília. Anais do IX Workshop Desenvolvimento Tecnológico nas Concessões de Rodovias: 'Soluções Técnicas e Aplicadas', 2014. v. Único. p. 12-21.

KORMANN, A. C. M.; SESTREM, L. P. ; PRETTO, J. H. F. **Comportamento de encostas no estado de Santa Catarina: revisão de mecanismos geológico-geotécnicos e estudo de caso**. In: IX Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica

da Região Sul, 2013, Criciuma. Anais do IX Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 2013.

KORMANN, A. C. M.; SESTREM, L. P.; LAZARIM, T. P.; PASSINI, L. D. B.; ASAKAWA, S. S. **Integração de modelos geológico-geotécnicos e dados de instrumentação: um caso desafiador de reforço de maciço na Serra do Mar brasileira**. Geotecnia, nº. 138, pp. 61-84, 2016.

KORMANN, A. C. M.; SESTREM, L. P.; PRETTO, J. H. F. **Instrumentação de encostas: estudos de caso e técnicas de análise de séries históricas**. In: 6ª Conferência Brasileira de Encostas - COBRAE, 2013, Angra dos Reis. p. 25-40.

LI, W. Y.; LIU, C.; SCAIONI, M.; SUN, W. W.; CHEN, Y.; YAO, D.; CHEN, S.; HONG, Y.; ZHANG, K.; CHENG, G. Spatio-temporal analysis and simulation on shallow rainfall-induced landslides in China using landslide susceptibility dynamics and rainfall I-D thresholds. **Earth Sciences**, v. 60, n. 4, p. 720-732, 2017.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. J. Olympio, 1981.

MACHADO, W. M. **Análise estatística do tempo de recorrência da chuva pelo método de Kimball nos municípios de Morretes, Antonina e Guaratuba, estado do Paraná**. 2016. Curso de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

MENDES, R. M.; VALÉRIO FILHO, M.; BERTOLDO, M. A.; SILVA, M. F. Estudo de limiares críticos de chuva deflagradores de deslizamentos no município de São José dos Campos/SP (Brasil). **Territorium**, v. 22, p. 119-129, 2015.

MEZZOMO, S. M.; ARAÚJO, F. A. I.; ASAKAWA, S. Ações emergenciais adotadas nos acidentes geotécnicos ocorridos na BR376/PR em março de 2011. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLO E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), Porto de Galinhas, PE. Anais ABGE, 2012.

MILLAN COY, Y. S. **Avaliação da suscetibilidade das vertentes de um trecho da BR-376 entre os km 658+820 m e 660+690 m, PR**. 2015. Dissertação de mestrado – Curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

NAIDU, S.; SAJINKUMAR, K. S.; OOMMEN, T.; ANUJA, V. J.; SAMUEL, R. A.; MURALEEDHARAN, C. Early warning system for shallow landslides using rainfall threshold and slope stability analysis**. Geoscience Frontiers**, v. 9, p. 1871-1882, 2018.

OTTERO, C. R.; CHARGEL, L. T.; HORA, M. A. G. M. Análise de frequência dos dados pluviométricos observados em 2011 e 2013 na Região Serrana, estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, 2018.

PARIZZI, M. G.; SEBASTIÃO, C. S.; VIANA, C. S.; FLUEGER, M. C.; CAMPOS, L. C.; CAJAZEIRO, J. M. D.; TOMICH, R. S.; GUIMARÃES, R. N.; ABREU, M. L.; SOBREIRA, F. G.; REIS, R. Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. **Geografias**, v. 6, p. 49-68, 2010.

PRETTO, J. H. F. **Análise de estabilidade de uma encosta natural - Estudo de caso: Morro do Boi - Balneário Camboriú**. 2014. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação Em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

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: 6ª Conferência Brasileira de Encostas - COBRAE, 2013, Angra dos Reis. v. Único. p. 242-248.

SAMOUELIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. **Electrical resistivity survey in soil science: a review**. Soil and Tillage Research, Elsevier, 83, p. 2, 173-193, 2005.

SELL, I. Utilização da regressão linear como ferramenta de decisão na gestão de custos. In: IX CONGRESSO INTERNACIONAL DE CUSTOS – FLORIANÓPOLIS, Santa Catarina, 2005.

SESTREM, L. P. **Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea**. 2012. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação Em Construção Civil - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

SESTREM, L. P.; KORMANN, A. C. M. **Implantação de um sistema de monitoramento automatizado para monitoramento de uma encosta litorânea rodoviária**. In: 8º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 2013, Santos. Anais do 8º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 2013.

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: Stefano Aversa; Leonardo Cascini; Luciano Picarelli; Claudio Scavia. (Org.). Landslides and Engineered Slopes: Experience, Theory and Practice. 1ed. Roma: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016, v. 2, p. 1829-1834.

SESTREM, L. P.; KORMANN, A. C. M.; PRETTO, J. H. F.; MARINHO, F. A. M. Precipitation Influence on the Distribution of Pore Pressure and Suction on a Coastal Hillside. **Soils & Rocks**, v. 38, p. 81, 2015.

SHAN, C.; BASTANI, M.; MALEHMIR, A.; PERSSON, L.; ENGDAHL, M. Integrated 2D modeling and interpretation of geophysical and geotechnical data to delineate quick clays at a landslide site in southwest Sweden. **Geophysics**, v. 79, n. 4, 2014.

SILVA, A. C.; COSTA, R. V. C.; UAGODA, R. E. S.; AVELAR, A. S. Zona de fraturas e fluxos d'água em subsuperfície: influências na instabilidade de encostas? In: XI SINAGEO, Maringá, 2016.

SILVA, C. P. L. **Cartografia geotécnica tridimensional do setor noroeste de Brasília**. 2011. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SOARES, F. S.; FRANCISCO, C. N.; CARVALHO, C. N. Análise dos fatores que influenciam a distribuição espacial da precipitação no litoral sul fluminense, RJ. In: ANAIS XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia, Brasil, 16-21, INPE, p. 3365-3370, 2005.

SOIL MOISTURE. **2725 Series Jet Fill Tensiometers**. Disponível: <https://www.soilmoisture.com/2725ARL-JET-FILL-TENSIOMETER-SERIES/>. Acesso: jan. 2019.

SUDHA, K.; ISRAIL, M.; MITTAL, S.; RAI, J. **Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations**. Journal of Applied Geophysics, n. 67, p. 74-79, 2009.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M. Modelamento numérico da análise de correlação entre Chuvas e Escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar. 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, n. 2, p. 237-248, ABGE, 1987, São Paulo, Brazil.

TREVIZOLLI, M. N. B.; KORMANN, A. C. M.; FARO, V. P.; SESTREM, L. P.; PASSINI L.D. B. Análise de registros históricos de precipitações e rupturas de encostas para composição de limiares pluviométricos visando monitoramento de taludes rodoviários. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, 2018.

UNIVERSIDADE DE WAIKATO. **Weka 3 – Machine Learning Software in Java**. 2010. Disponível em: <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka>. Acesso em: 10 mar. 2018.

VASU, N. N.; LEE, S. R.; PRADHAN, A. M. S.; KIM, Y. T.; KANG, S. H.; LEE, D. H. A new approach to temporal modelling for landslide hazard assessment using an extreme rainfall induced-landslide index. **Engineering Geology**, v. 215, p. 36-49, 2016.

VAZ, A. P. M. **Estudo de áreas suscetíveis a escorregamento em sub-bacia do Rio São João, BR376 entre os km 665 e 668**. 2014. Dissertação de mestrado – Curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

VICTORINO, M. M. **Influência da chuva nas poropressões e estabilidade dos taludes rodoviários de um trecho da BR-376 na Serra do Mar Paranaense**. 2015. Dissertação de mestrado em Geotecnia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

VICTORINO, M. M.; SESTREM, L. P.; KORMANN, A. C. M. Definição de uma faixa pluviométrica crítica para deflagração de movimentos de terra em taludes rodoviários localizados no trecho da serra do mar da rodovia BR-376/PR. **Transportes**, v. 25, n.1, p. 113-120, 2017.

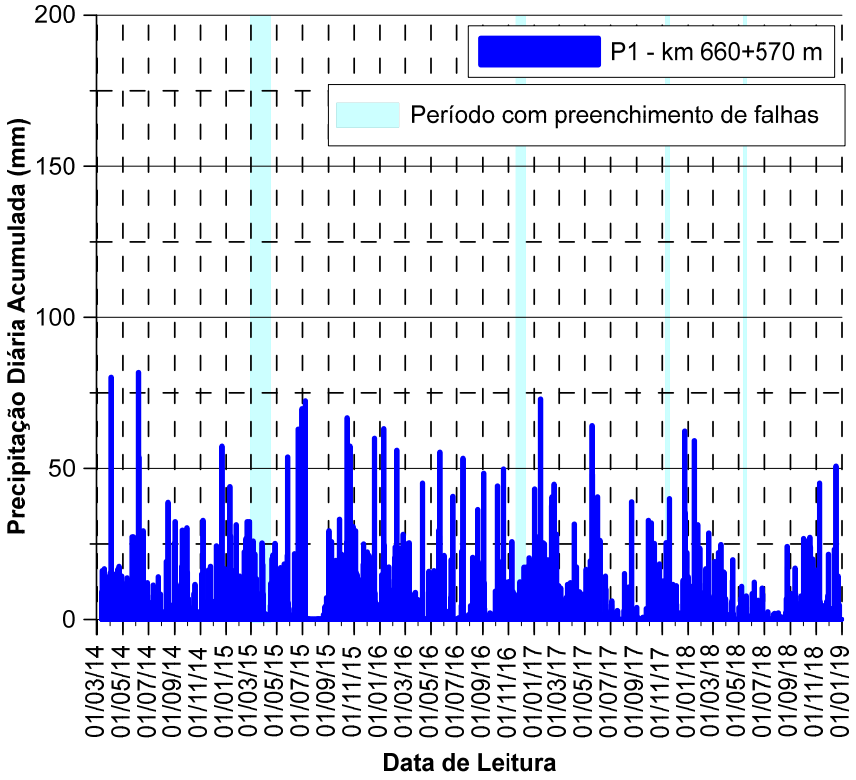
VICTORINO, M. M.; SESTREM, L. P.; KORMANN, A. C. M.; BENETTI, L. B. **Planejamento, Implantação e Operação de uma Rede de Pluviógrafos na Serra do Mar Paranaense**. In: 15° Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2015, Bento Gonçalves – RS.

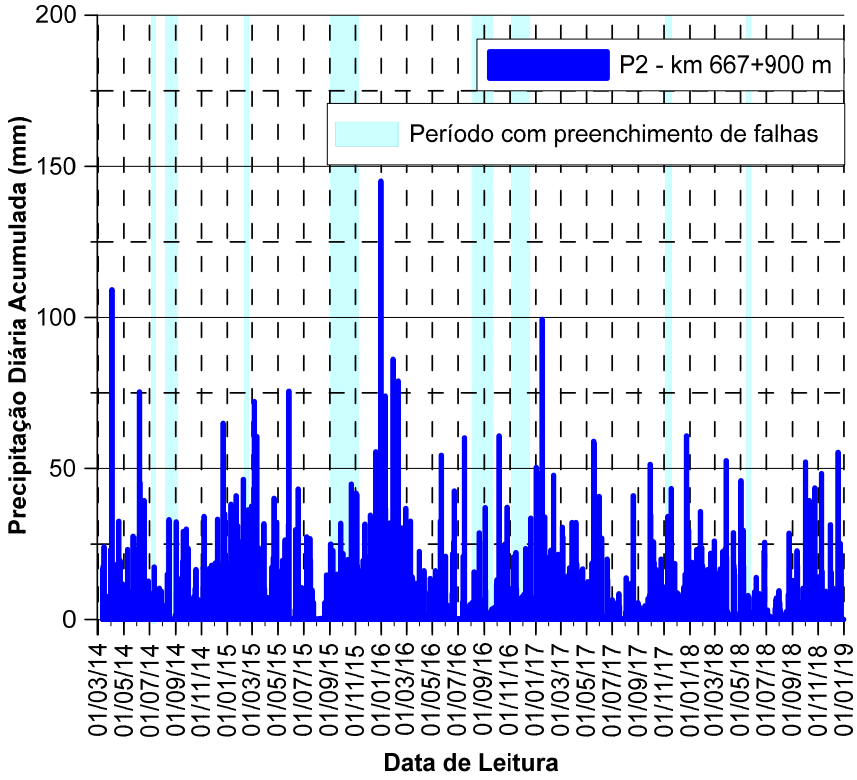
YOO, C.; LEE, K. M. Instrumentation of Anchored Segmental Retaining Wall. **Geotechnical Testing Journal**, v. 26, n. 4, 2003.

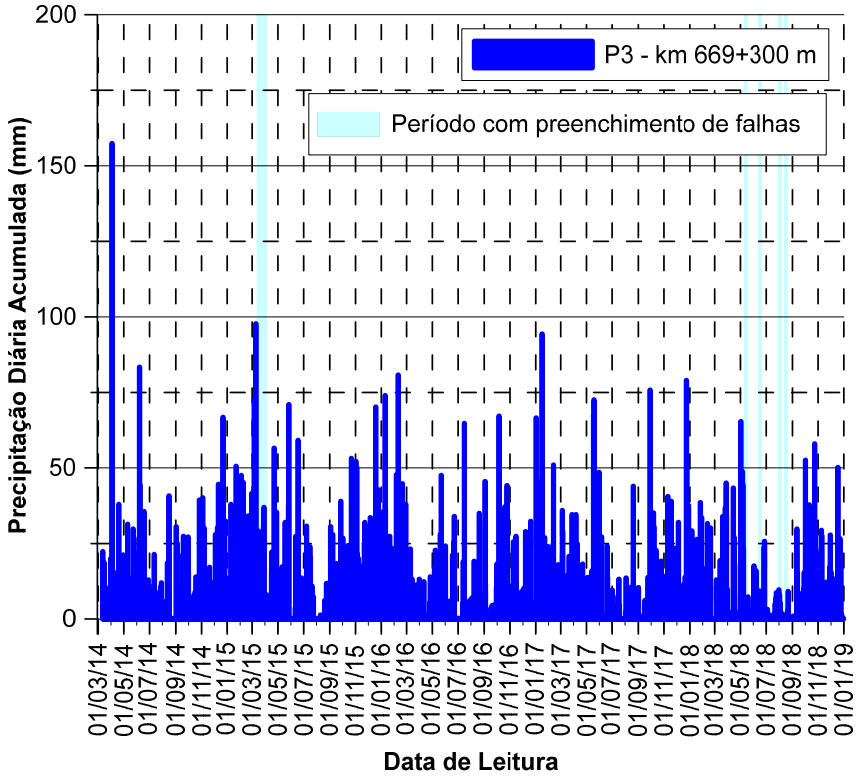
ZÊZERE, J. L.; VAZ, S.; PEREIRA, S.; OLIVEIRA, S. C.; MARQUES, R.; GARCIA, R. A. C. Rainfall thresholds for landslide activity in Portugal: a state of the art. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, p. 2917-2936, 2015.

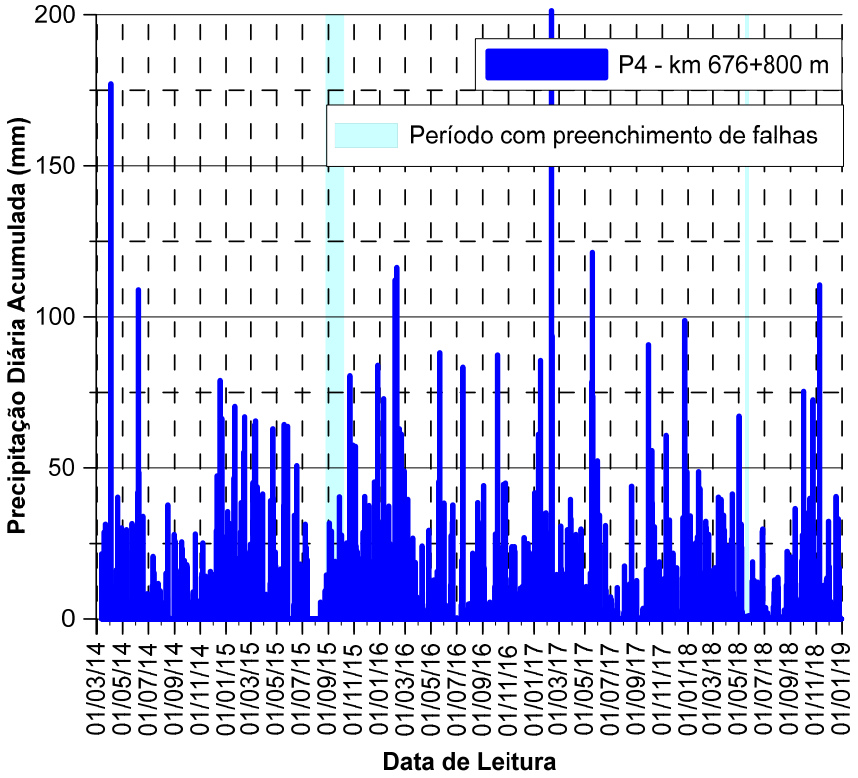
ZIPPARRO, V. B.; GUILHERME, F. A. G.; ALMEIDA-SCABBIA, R. J.; MORELLATO, L. P. C. Levantamento florístico de Floresta Atlântica no sul do Estado de São Paulo, Parque Estadual Intervales, Base Saibadela. **Biota Neotropica**, v. 5, n.1, Campinas, 2005.

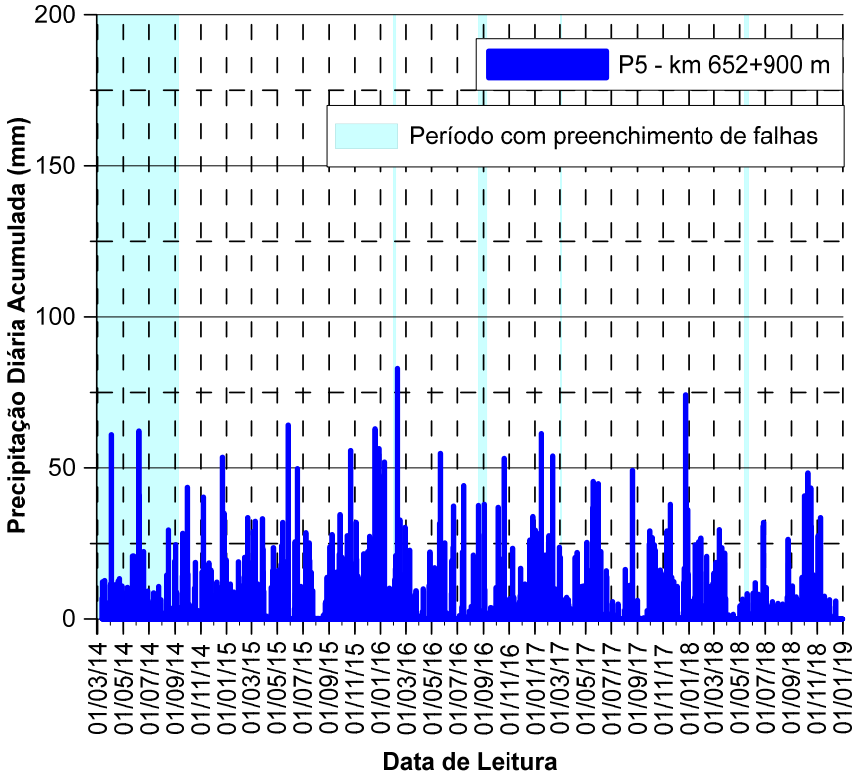
APÊNDICE 1 – Série histórica dos dados pluviométricos (mm/24h) com preenchimento das falhas

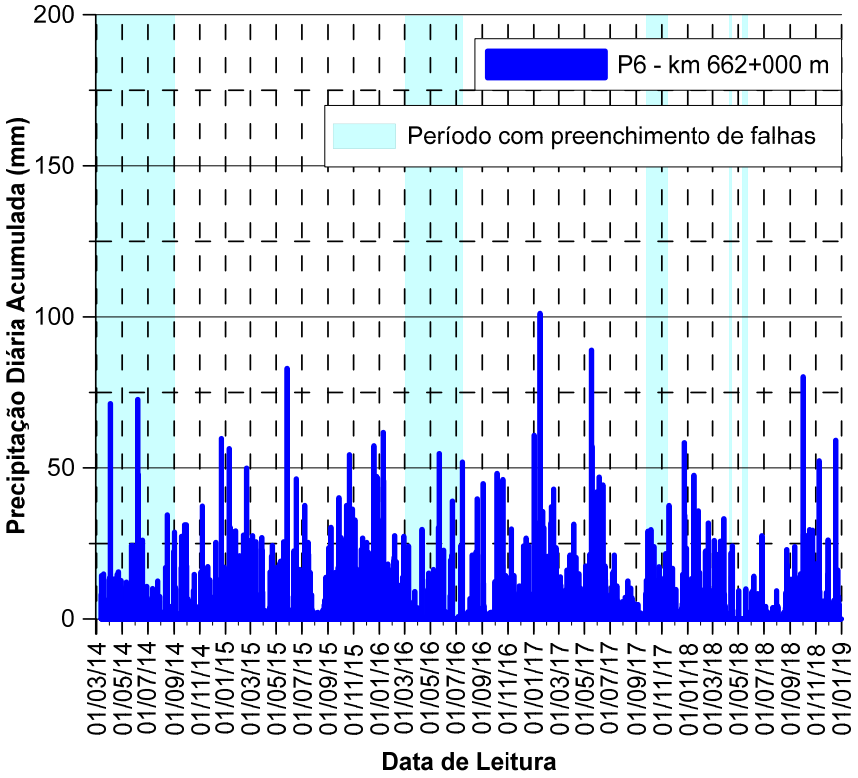




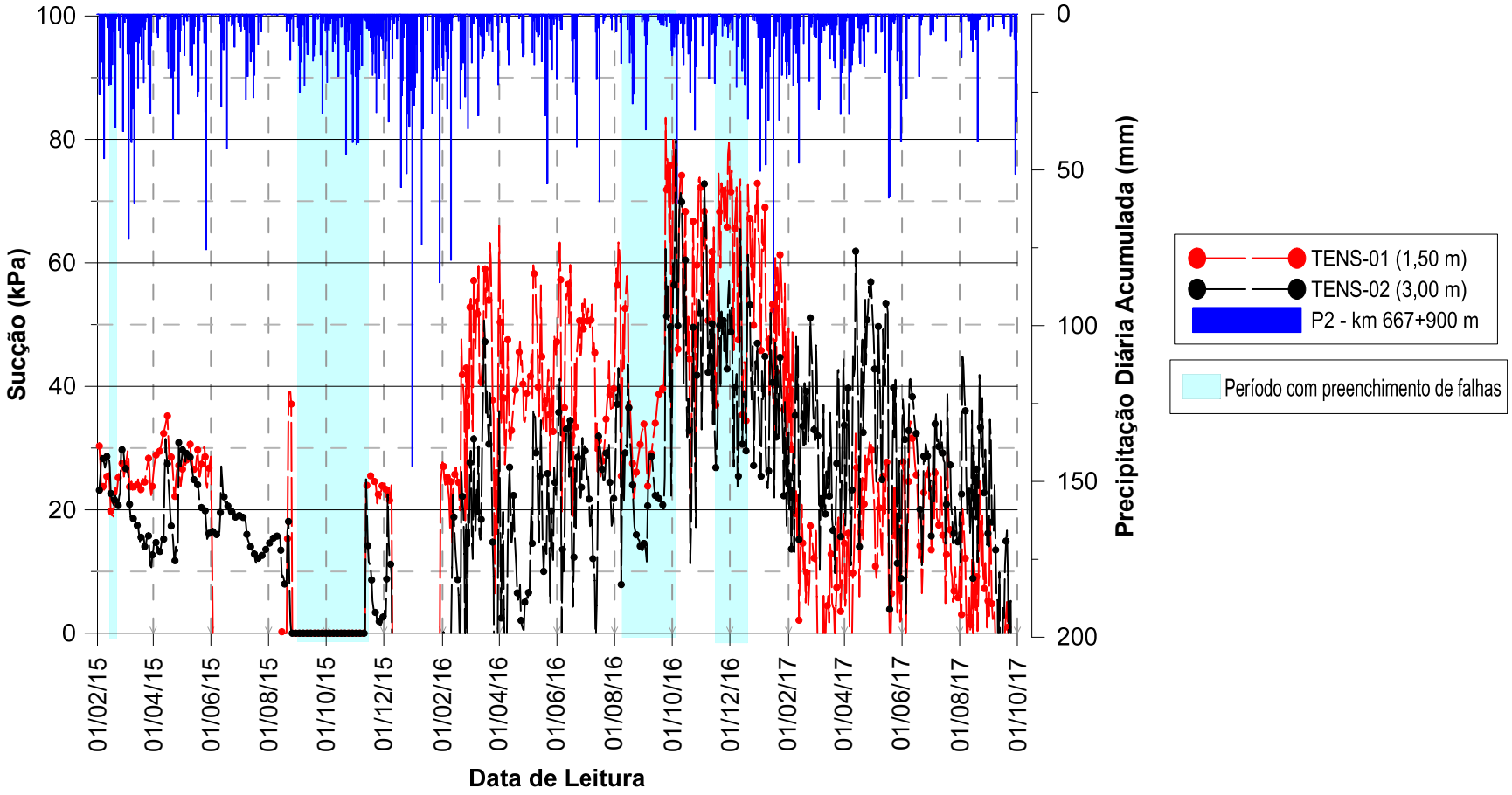

P3 - km 669+300 m
Período com preenchimento de falhas
Precipitação Diária Acumulada (mm)
200
150
100
50
0
01/03/14
01/05/14
01/07/14
01/09/14
01/11/14
01/01/15
01/03/15
01/05/15
01/07/15
01/09/15
01/11/15
01/01/16
01/03/16
01/05/16
01/07/16
01/09/16
01/11/16
01/01/17
01/03/17
01/05/17
01/07/17
01/09/17
01/11/17
01/01/18
01/03/18
01/05/18
01/07/18
01/09/18
01/11/18
01/01/19
Data de Leitura

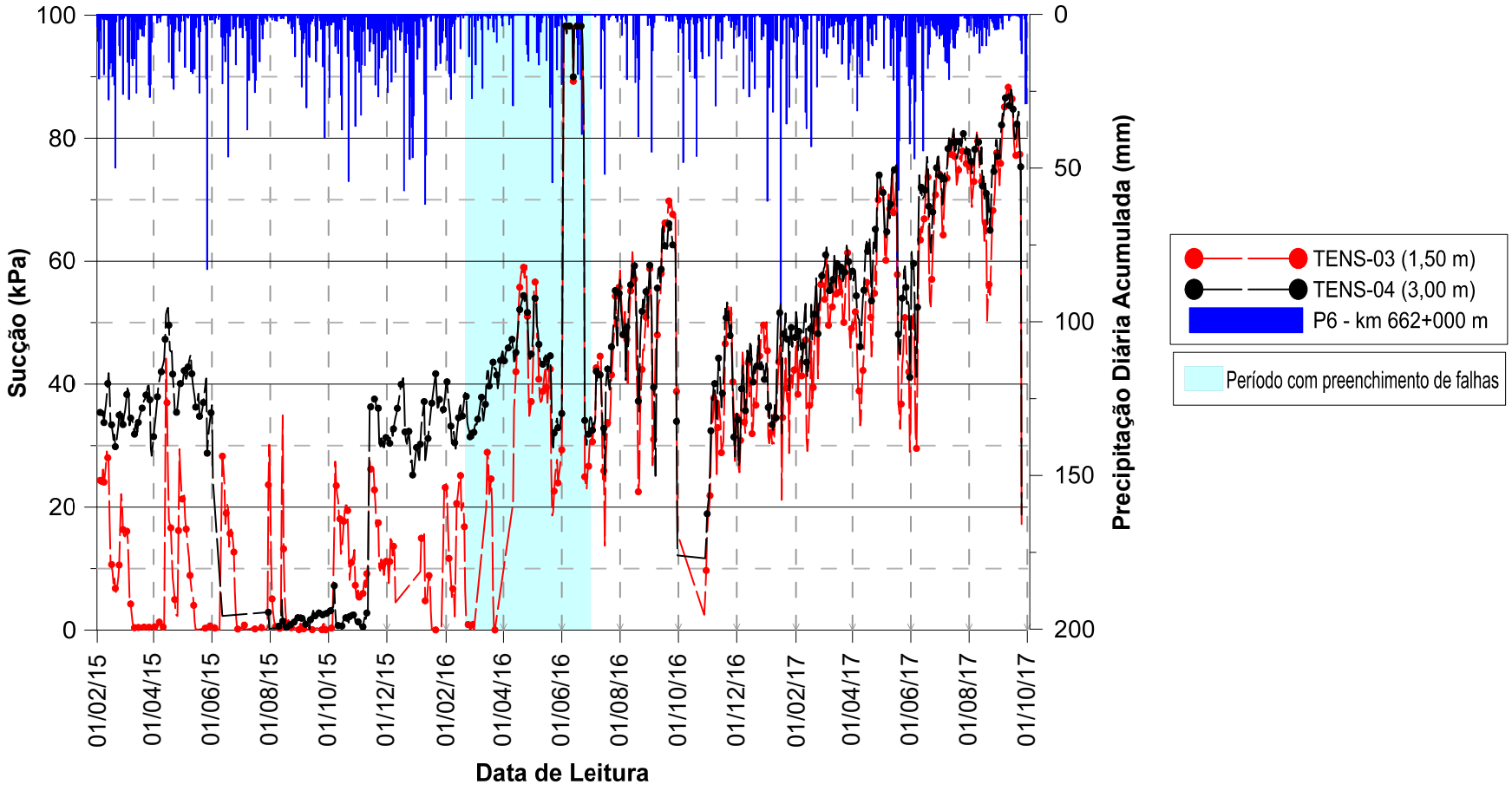

P4 - km 676+800 m
Período com preenchimento de falhas
Precipitação Diária Acumulada (mm)
200
150
100
50
0
01/03/14
01/05/14
01/07/14
01/09/14
01/11/14
01/01/15
01/03/15
01/05/15
01/07/15
01/09/15
01/11/15
01/01/16
01/03/16
01/05/16
01/07/16
01/09/16
01/11/16
01/01/17
01/03/17
01/05/17
01/07/17
01/09/17
01/11/17
01/01/18
01/03/18
01/05/18
01/07/18
01/09/18
01/11/18
01/01/19
Data de Leitura


P5 - km 652+900 m
Período com preenchimento de falhas
Precipitação Diária Acumulada (mm)
200
150
100
50
0
01/03/14
01/05/14
01/07/14
01/09/14
01/11/14
01/01/15
01/03/15
01/05/15
01/07/15
01/09/15
01/11/15
01/01/16
01/03/16
01/05/16
01/07/16
01/09/16
01/11/16
01/01/17
01/03/17
01/05/17
01/07/17
01/09/17
01/11/17
01/01/18
01/03/18
01/05/18
01/07/18
01/09/18
01/11/18
01/01/19
Data de Leitura

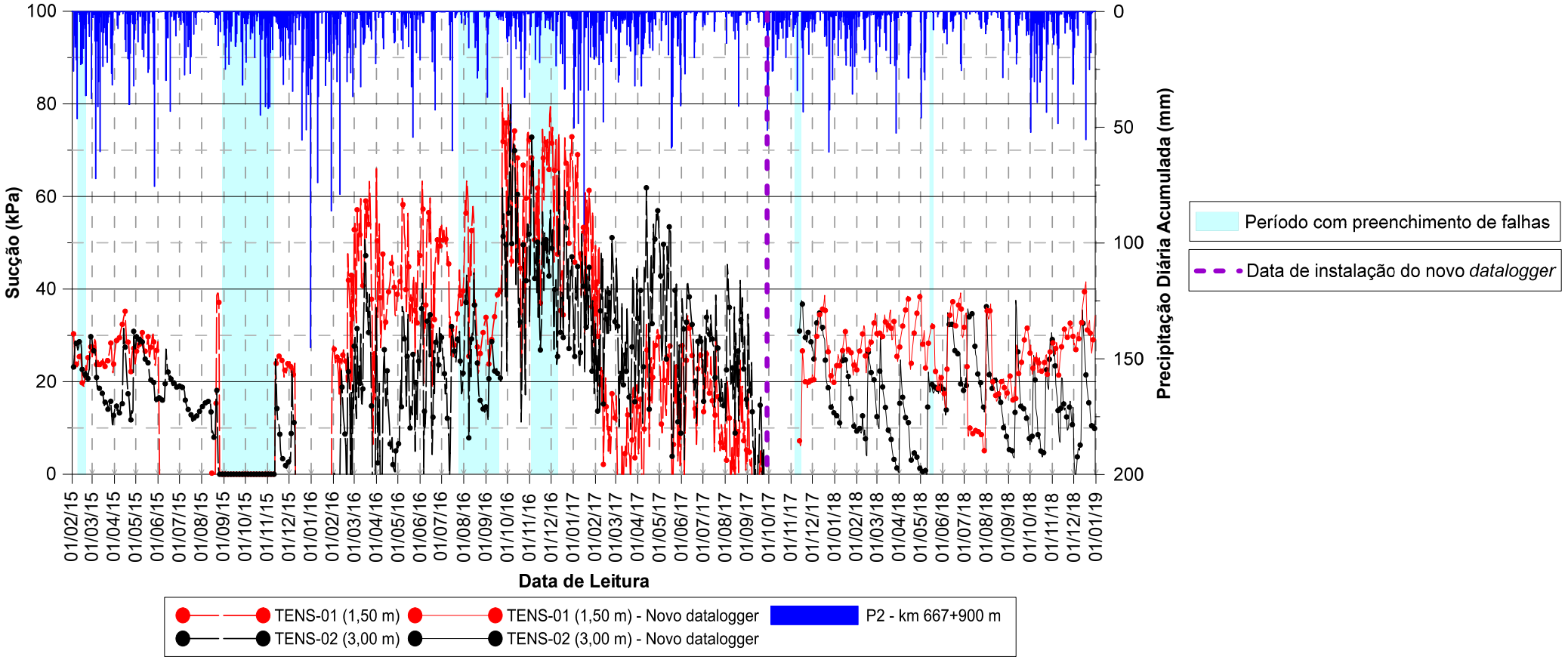

P6 - km 662+000 m
Período com preenchimento de falhas
Precipitação Diária Acumulada (mm)
200
150
100
50
0
01/03/14
01/05/14
01/07/14
01/09/14
01/11/14
01/01/15
01/03/15
01/05/15
01/07/15
01/09/15
01/11/15
01/01/16
01/03/16
01/05/16
01/07/16
01/09/16
01/11/16
01/01/17
01/03/17
01/05/17
01/07/17
01/09/17
01/11/17
01/01/18
01/03/18
01/05/18
01/07/18
01/09/18
01/11/18
01/01/19
Data de Leitura

APÊNDICE 2 – Série histórica dos registros de sucção dos tensiômetros acoplados a antigos *dataloggers*

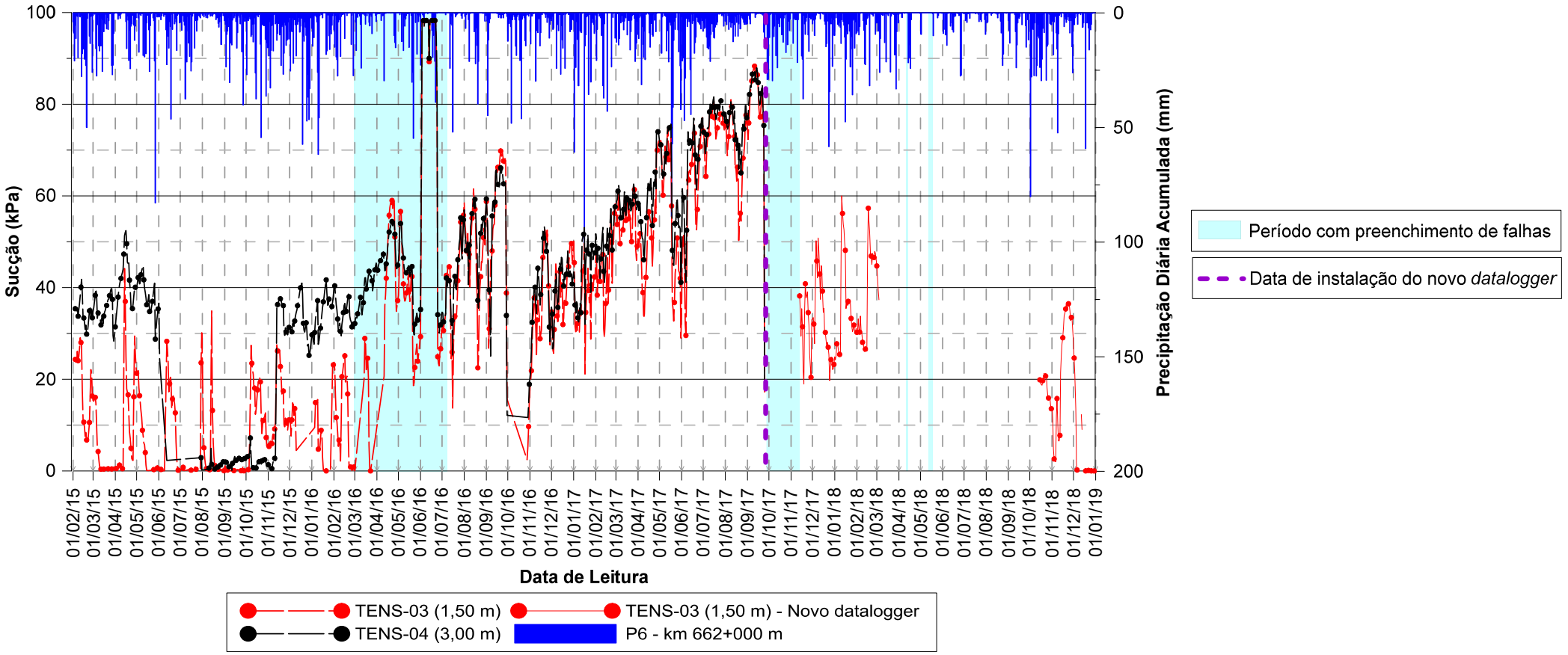



Sucção (kPa)
Precipitação Diária Acumulada (mm)
Data de Leitura
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
01/02/15
01/04/15
01/06/15
01/08/15
01/10/15
01/12/15
01/02/16
01/04/16
01/06/16
01/08/16
01/10/16
01/12/16
01/02/17
01/04/17
01/06/17
01/08/17
01/10/17
TENS-03 (1,50 m)
TENS-04 (3,00 m)
P6 - km 662+000 m
Período com preenchimento de falhas

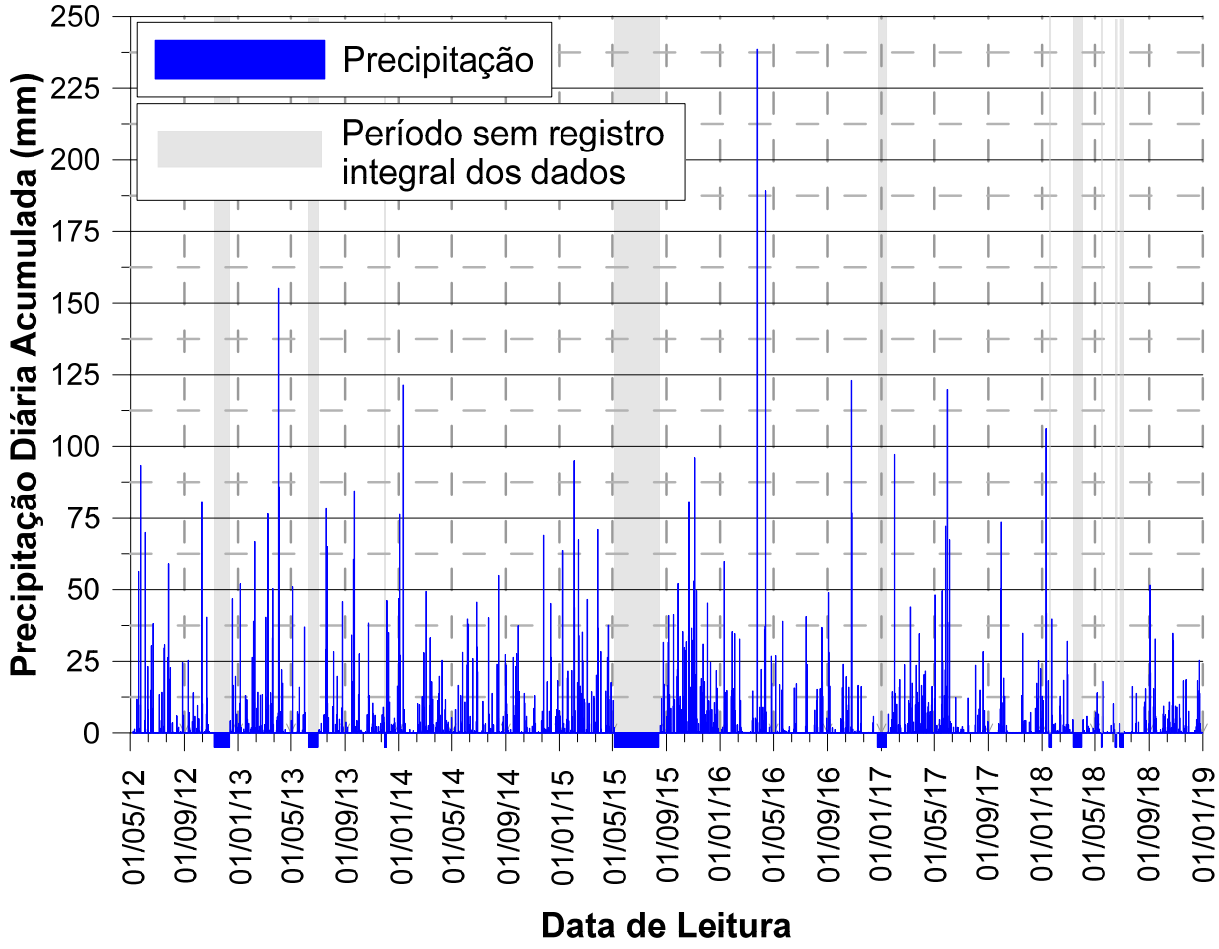
APÊNDICE 3 – Série histórica dos registros de sucção dos tensiômetros TENS-01 e TENS-02 acoplados a antigos e novos *dataloggers*



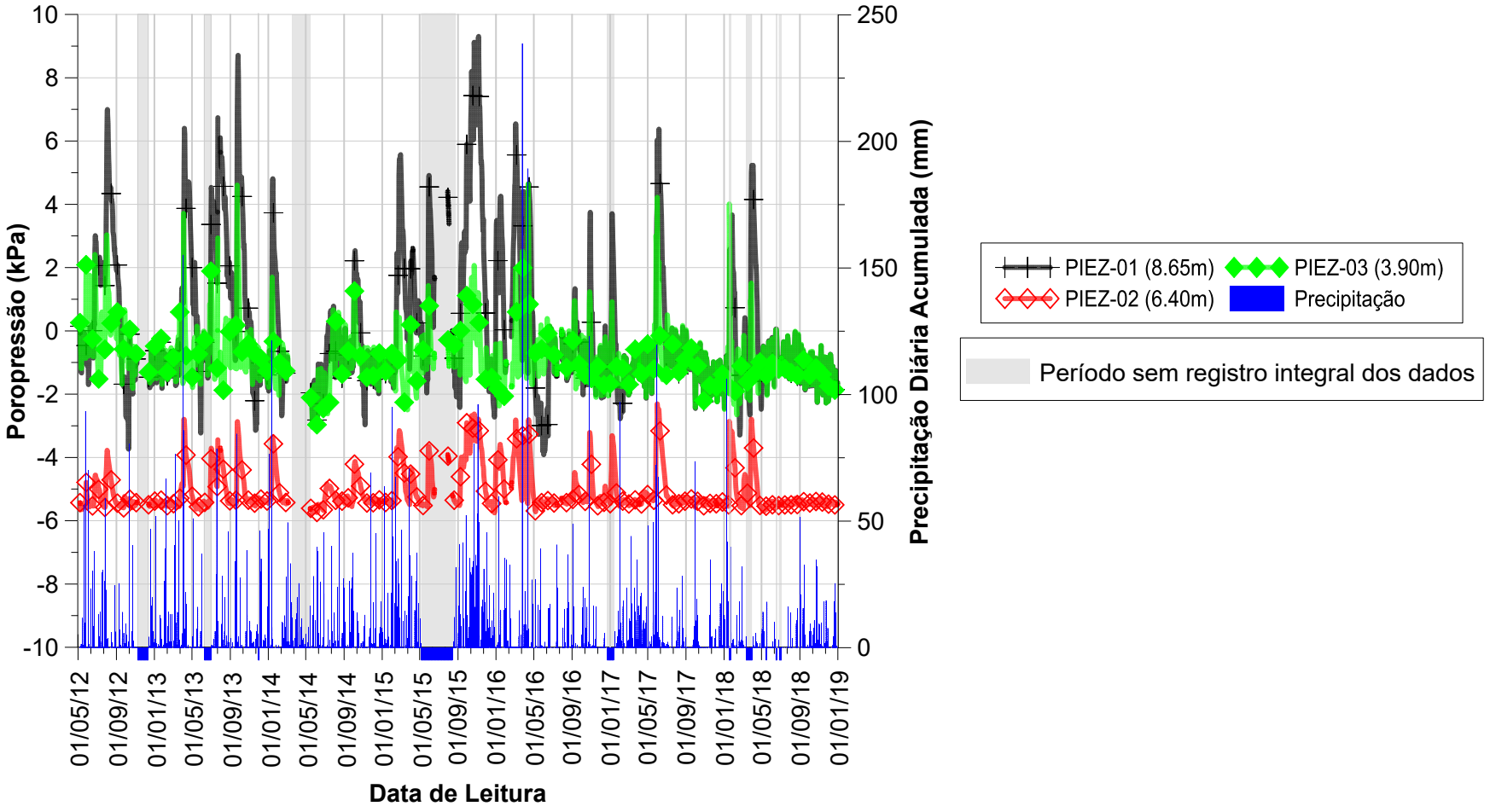
APÊNDICE 4 – Série histórica dos registros de sucção dos tensiômetros TENS-03 e TENS-04 acoplados a antigos e novos *dataloggers*

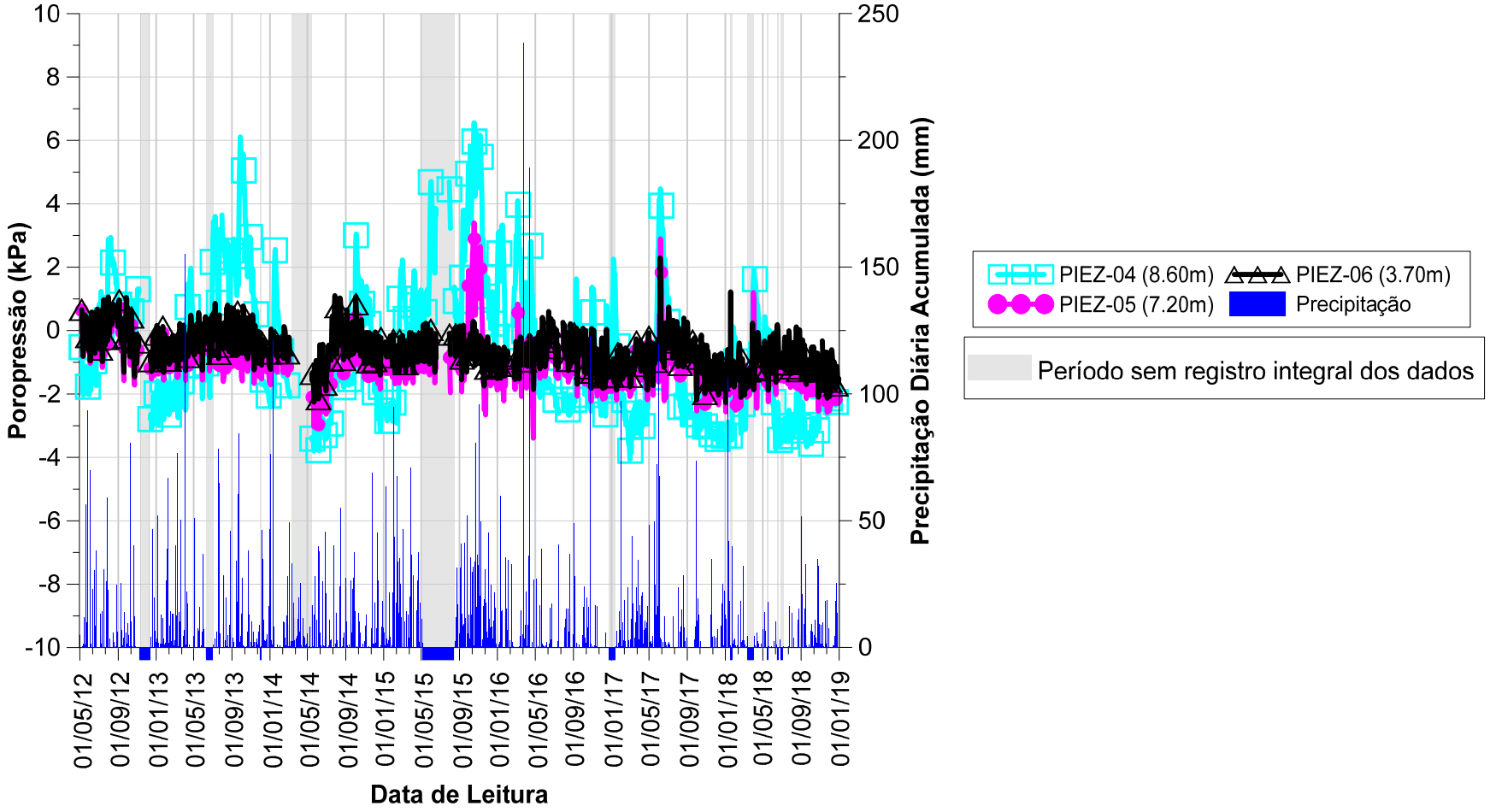


APÊNDICE 5 – Série histórica dos dados pluviométricos (mm/24h) para o pluviógrafo instalado no Morro do Boi

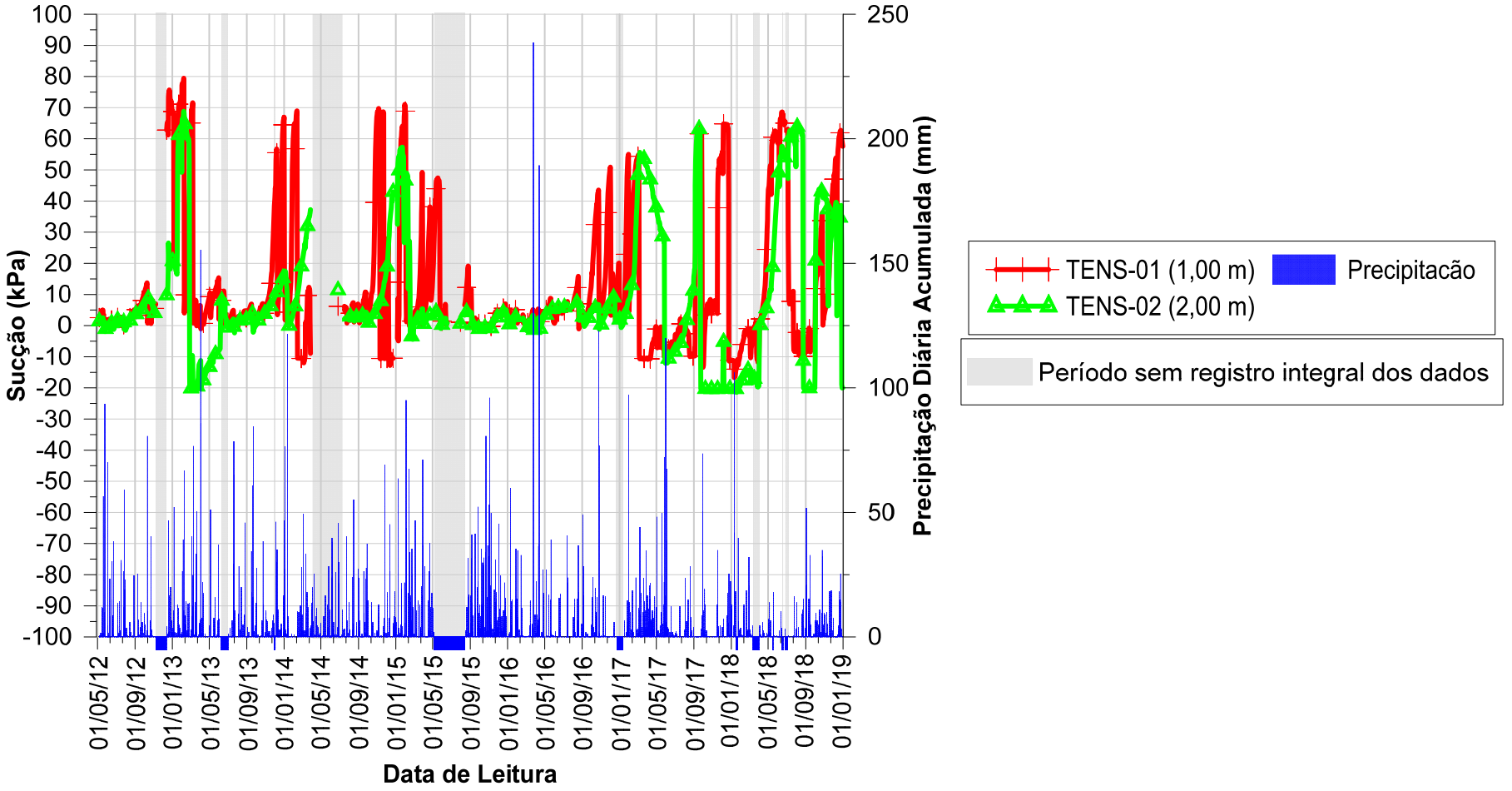


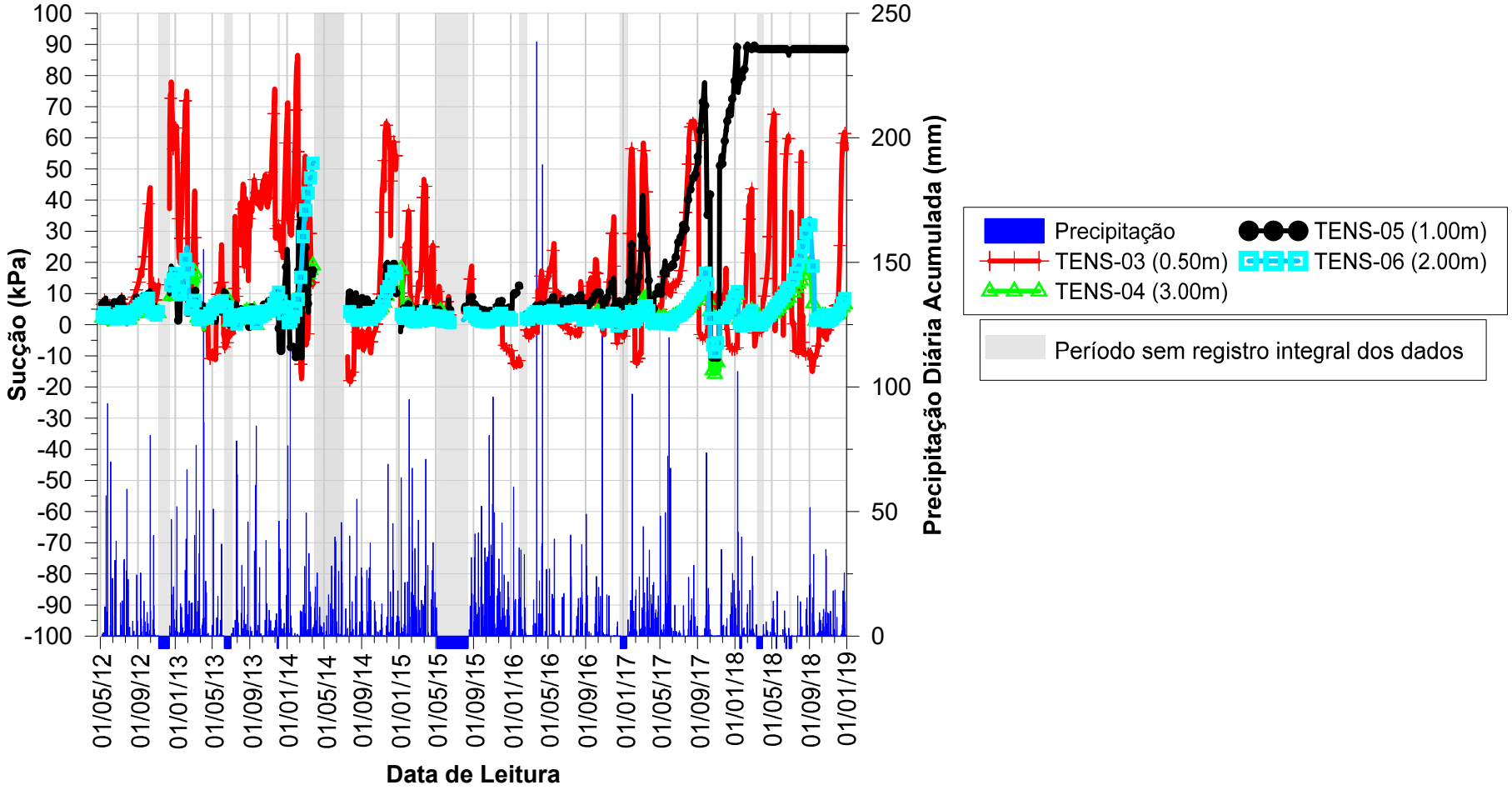
APÊNDICE 6 – Série histórica dos dados de piezômetros instalados no Morro do Boi

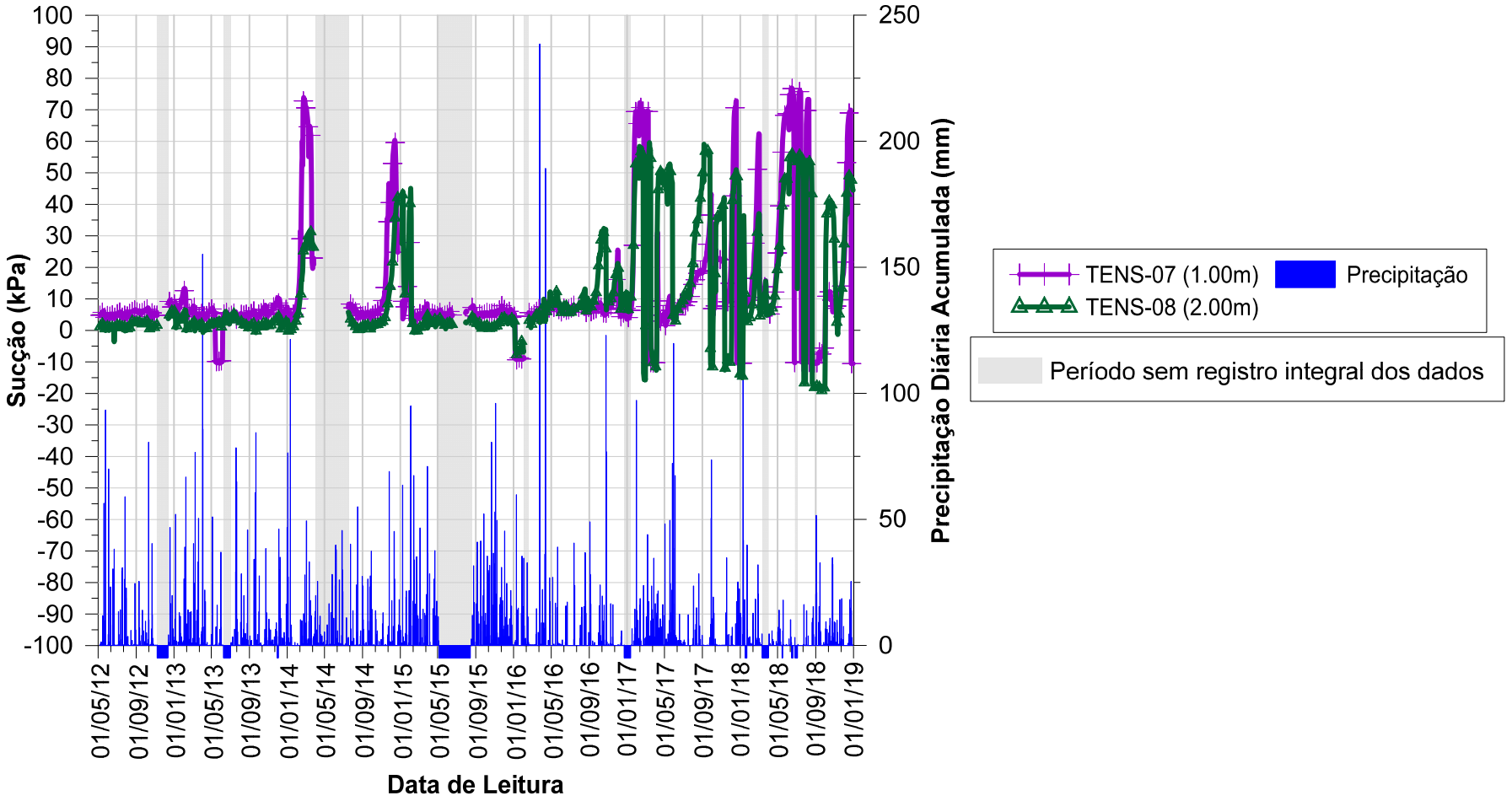



Poropressão (kPa)
Precipitação Diária Acumulada (mm)
Data de Leitura
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
250
200
150
100
50
0
01/05/12
01/09/12
01/01/13
01/05/13
01/09/13
01/01/14
01/05/14
01/09/14
01/01/15
01/05/15
01/09/15
01/01/16
01/05/16
01/09/16
01/01/17
01/05/17
01/09/17
01/01/18
01/05/18
01/09/18
01/01/19
PIEZ-04 (8.60m)
PIEZ-06 (3.70m)
PIEZ-05 (7.20m)
Precipitação
Período sem registro integral dos dados

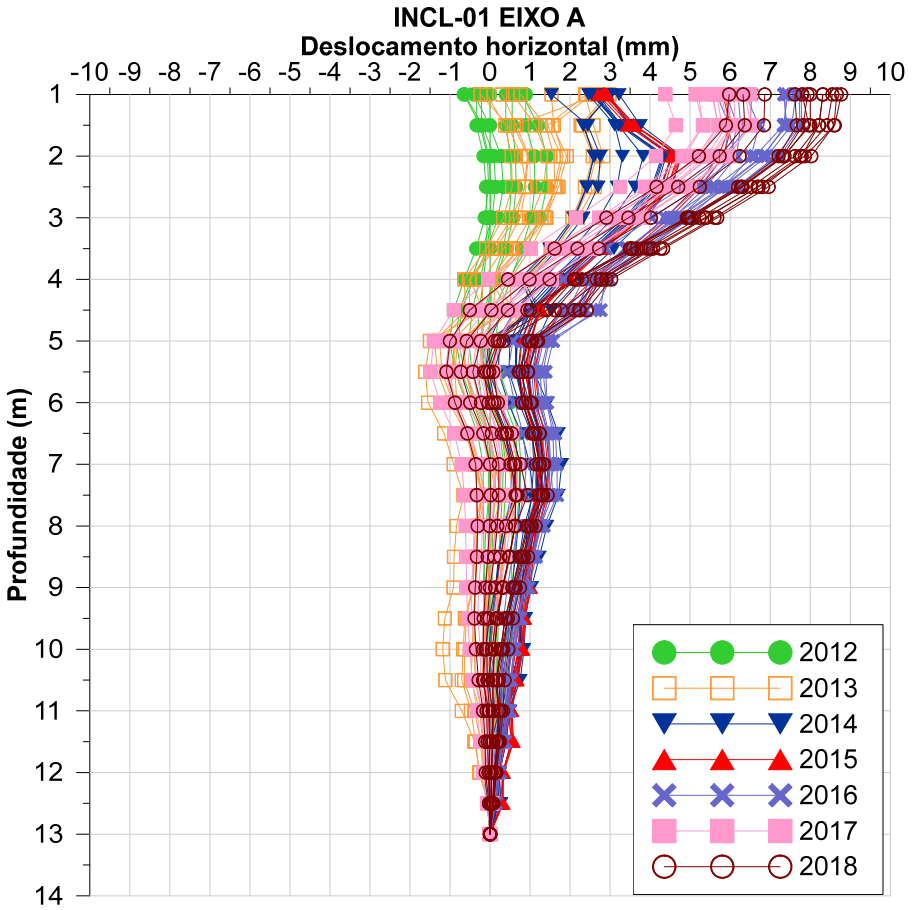
APÊNDICE 7 – Série histórica dos dados de tensiômetros instalados no Morro do Boi

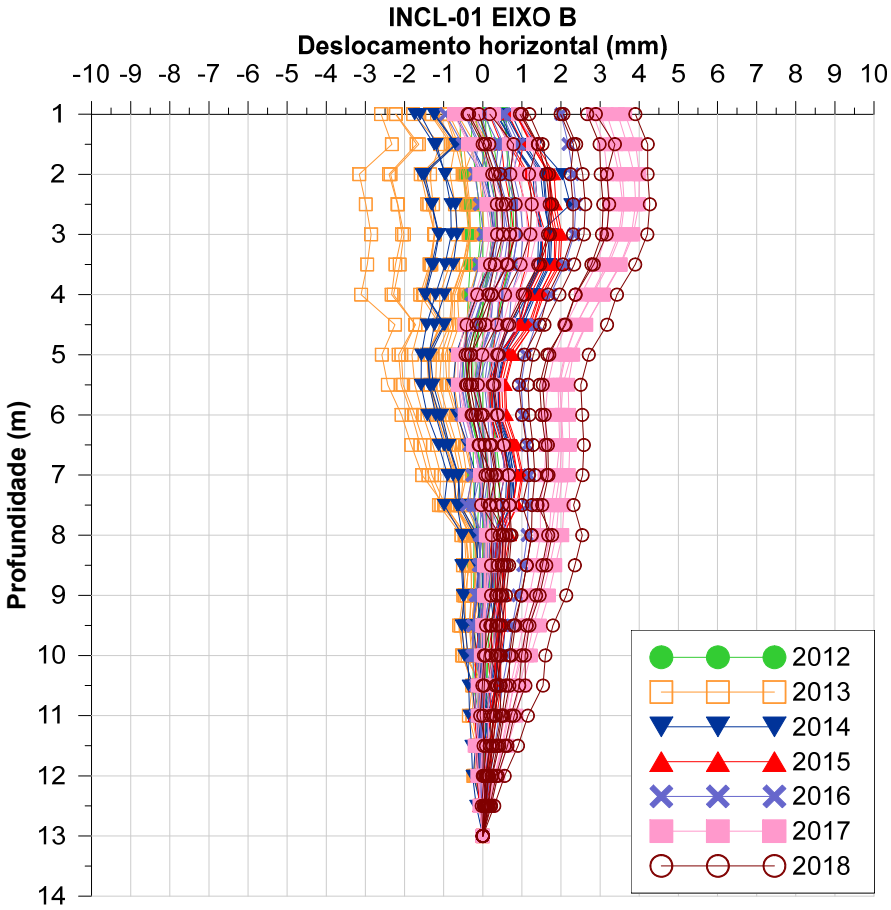


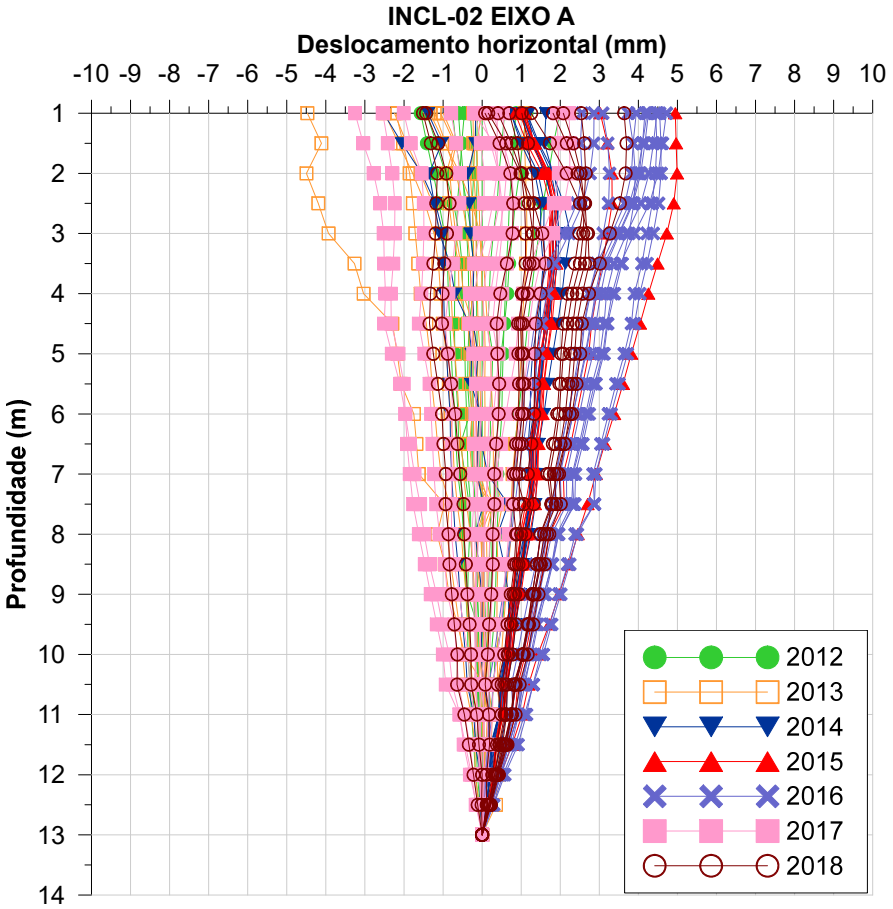

Sucção (kPa)
Precipitação Diária Acumulada (mm)
Data de Leitura
Precipitação
TENS-03 (0.50m)
TENS-04 (3.00m)
TENS-05 (1.00m)
TENS-06 (2.00m)
Período sem registro integral dos dados

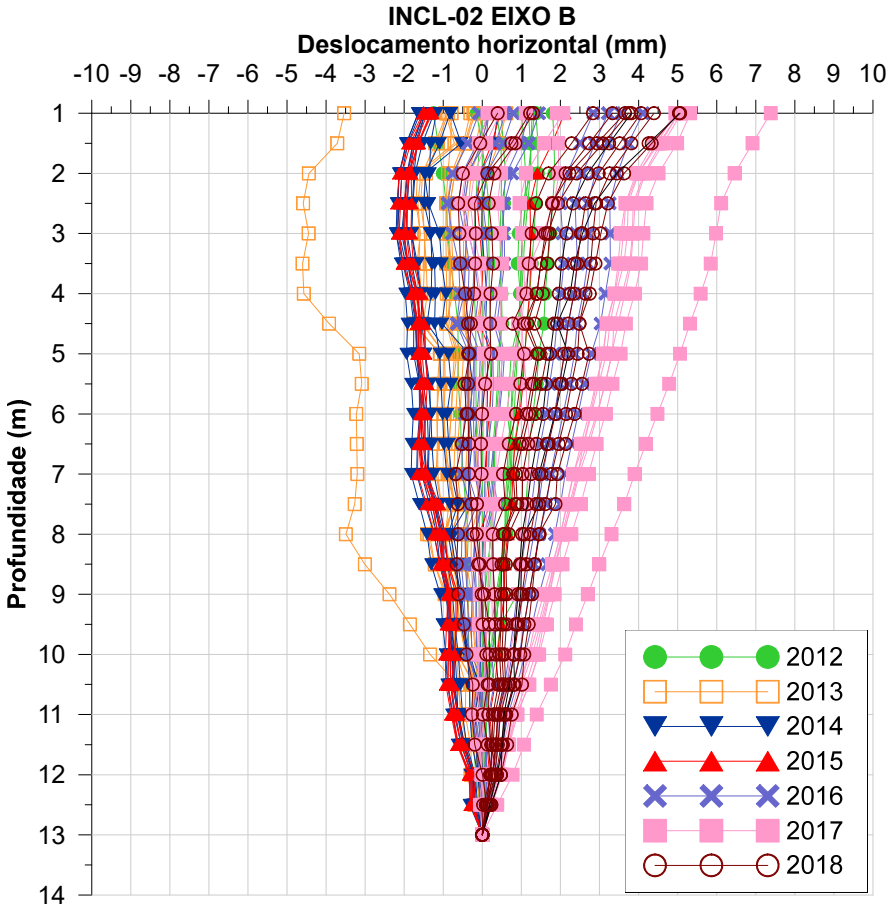

Sucção (kPa)
Precipitação Diária Acumulada (mm)
Data de Leitura
TENS-07 (1.00m)
TENS-08 (2.00m)
Precipitação
Período sem registro integral dos dados

APÊNDICE 8 – Série histórica dos dados de inclinômetros instalados no Morro do Boi

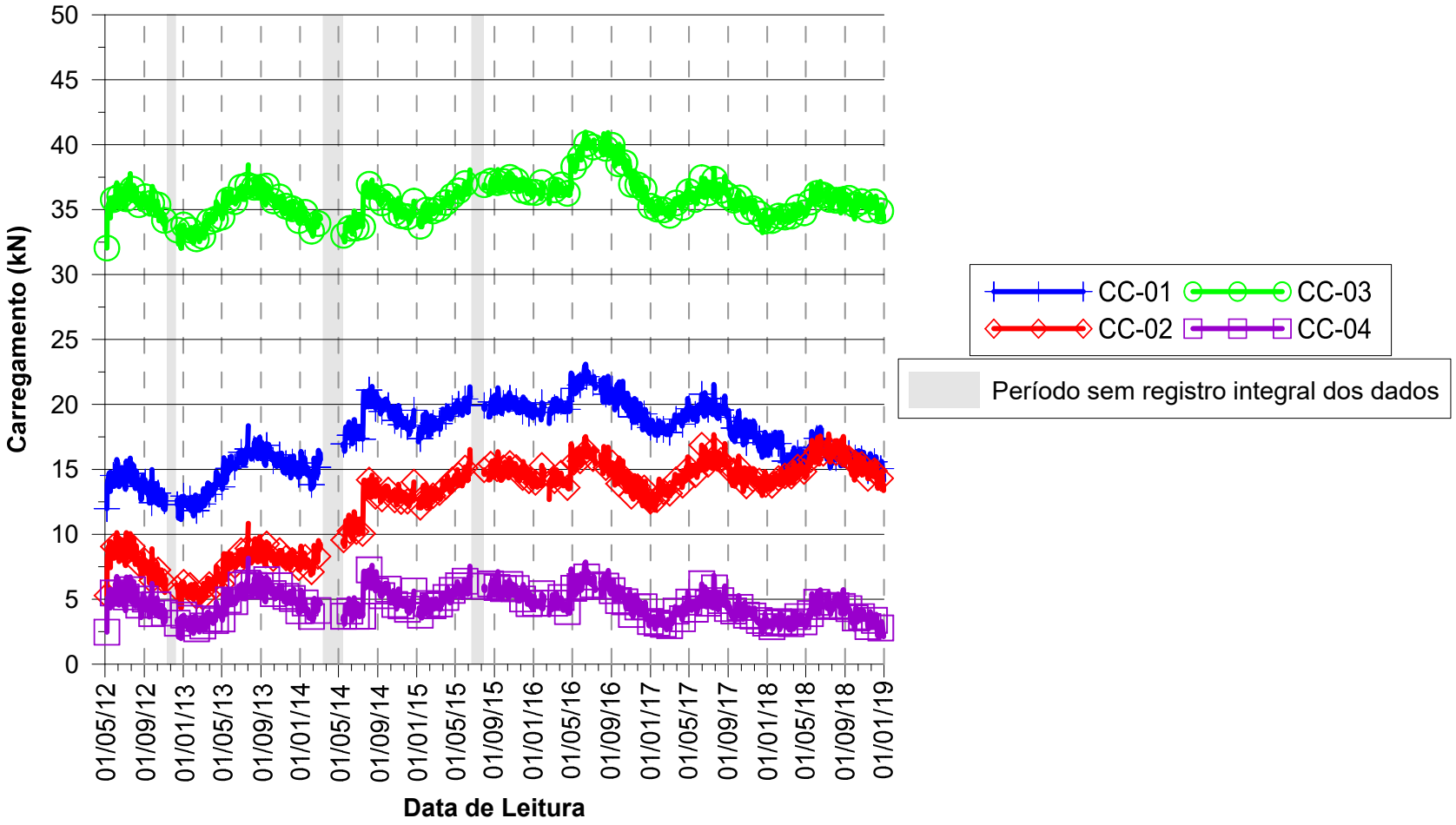




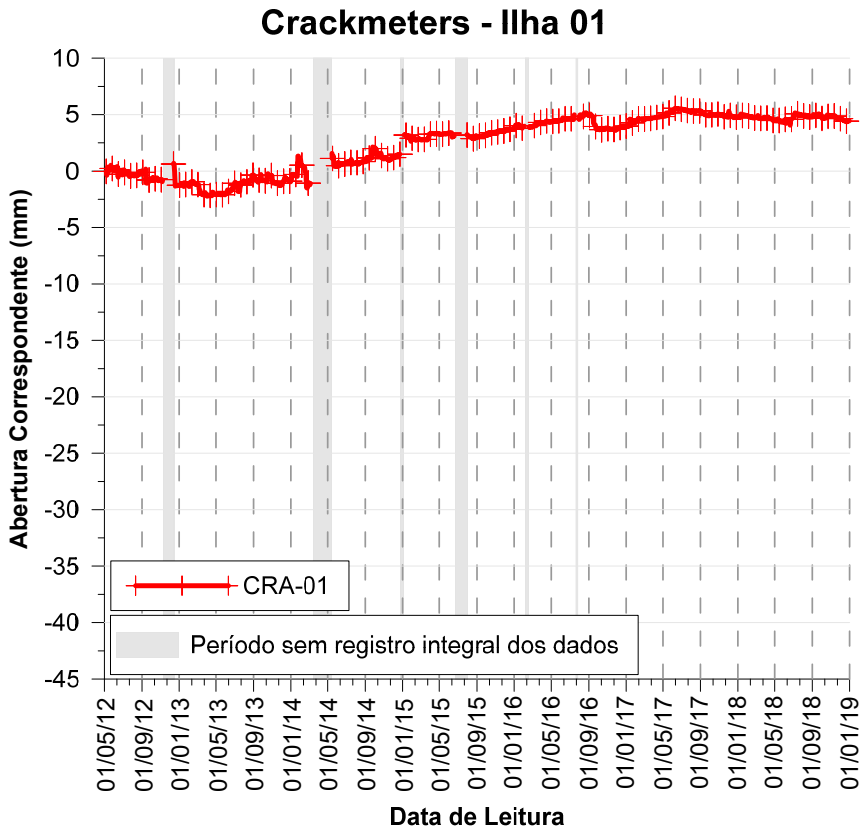

INCL-02 EIXO A
Deslocamento horizontal (mm)
-10 -9 -8 -7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Profundidade (m)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018

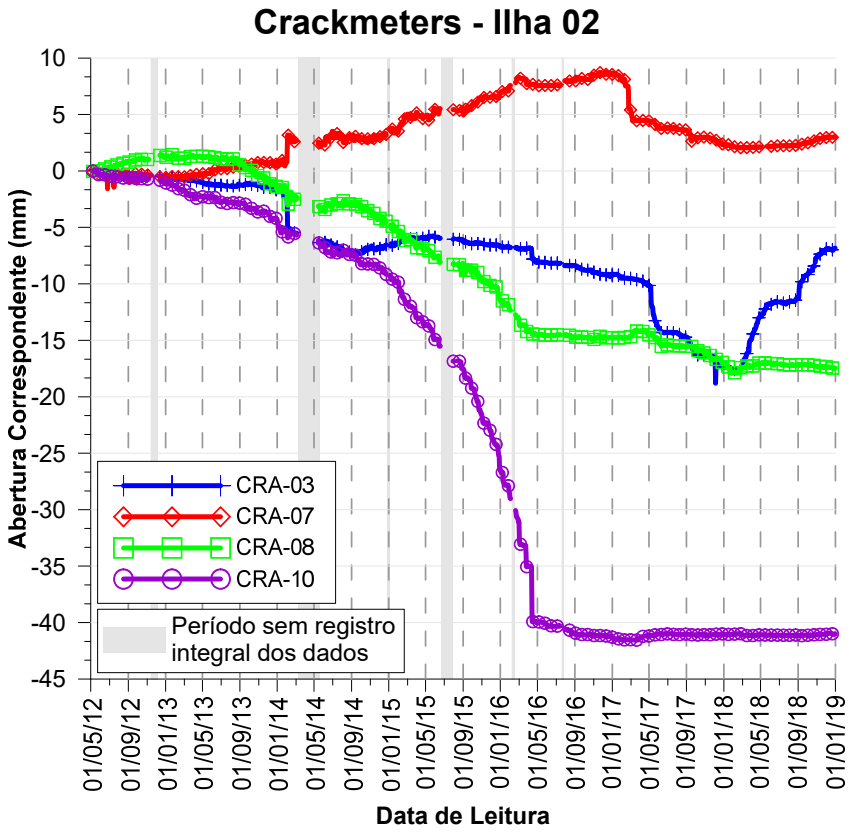

INCL-02 EIXO B
Deslocamento horizontal (mm)
-10 -9 -8 -7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Profundidade (m)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018

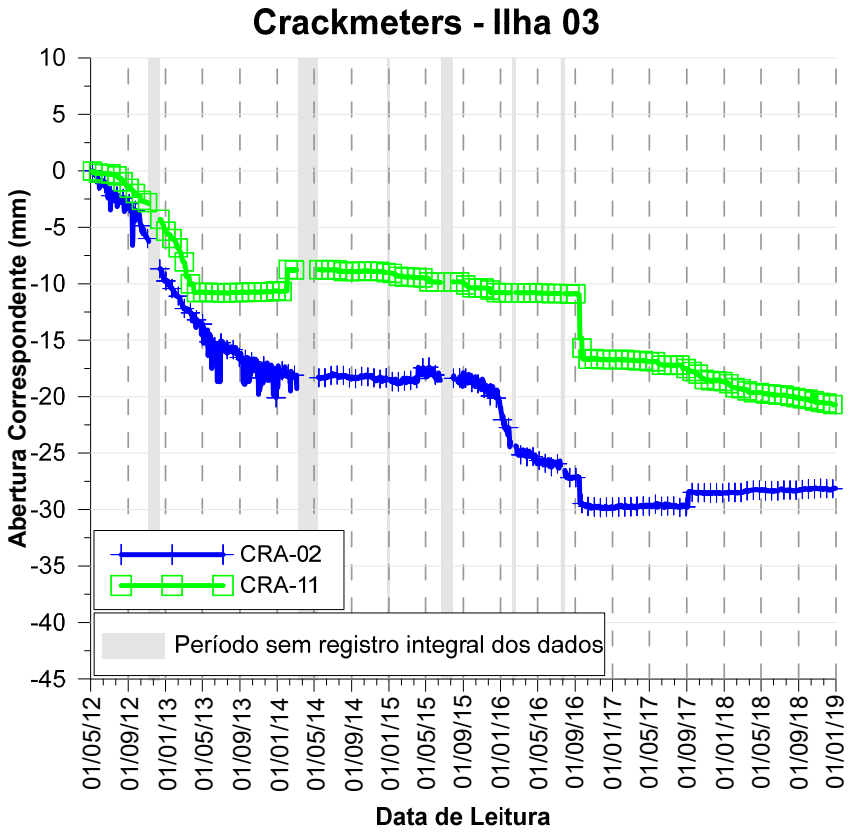
APÊNDICE 9 – Série histórica dos dados de células de carga instaladas no Morro do Boi

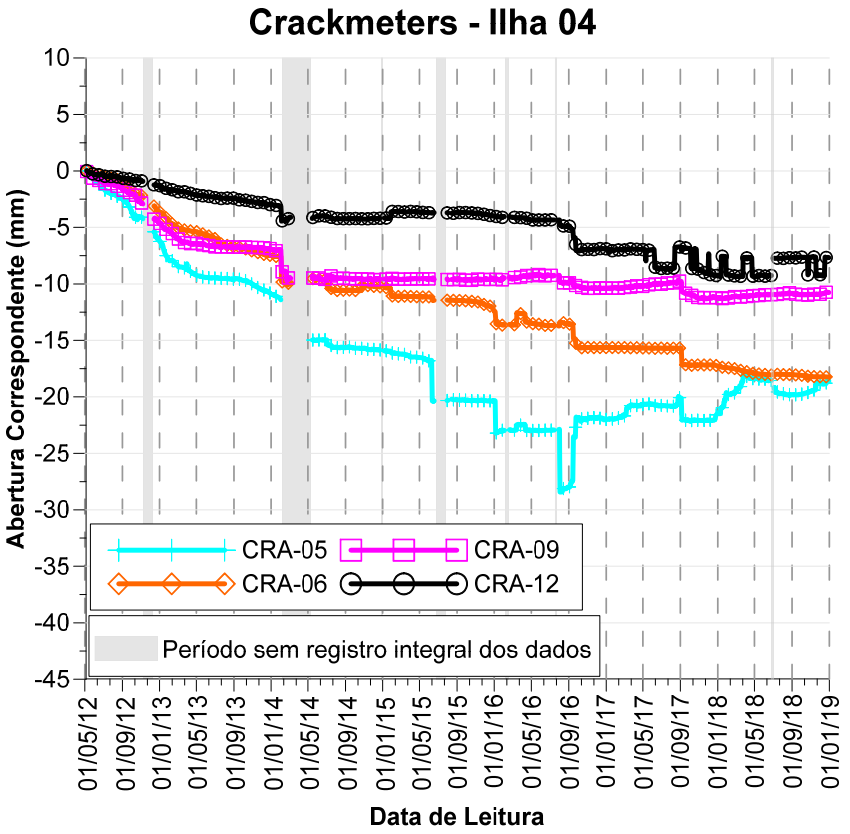


APÊNDICE 10 – Série histórica dos dados de *crackmeters* instalados no Morro do Boi

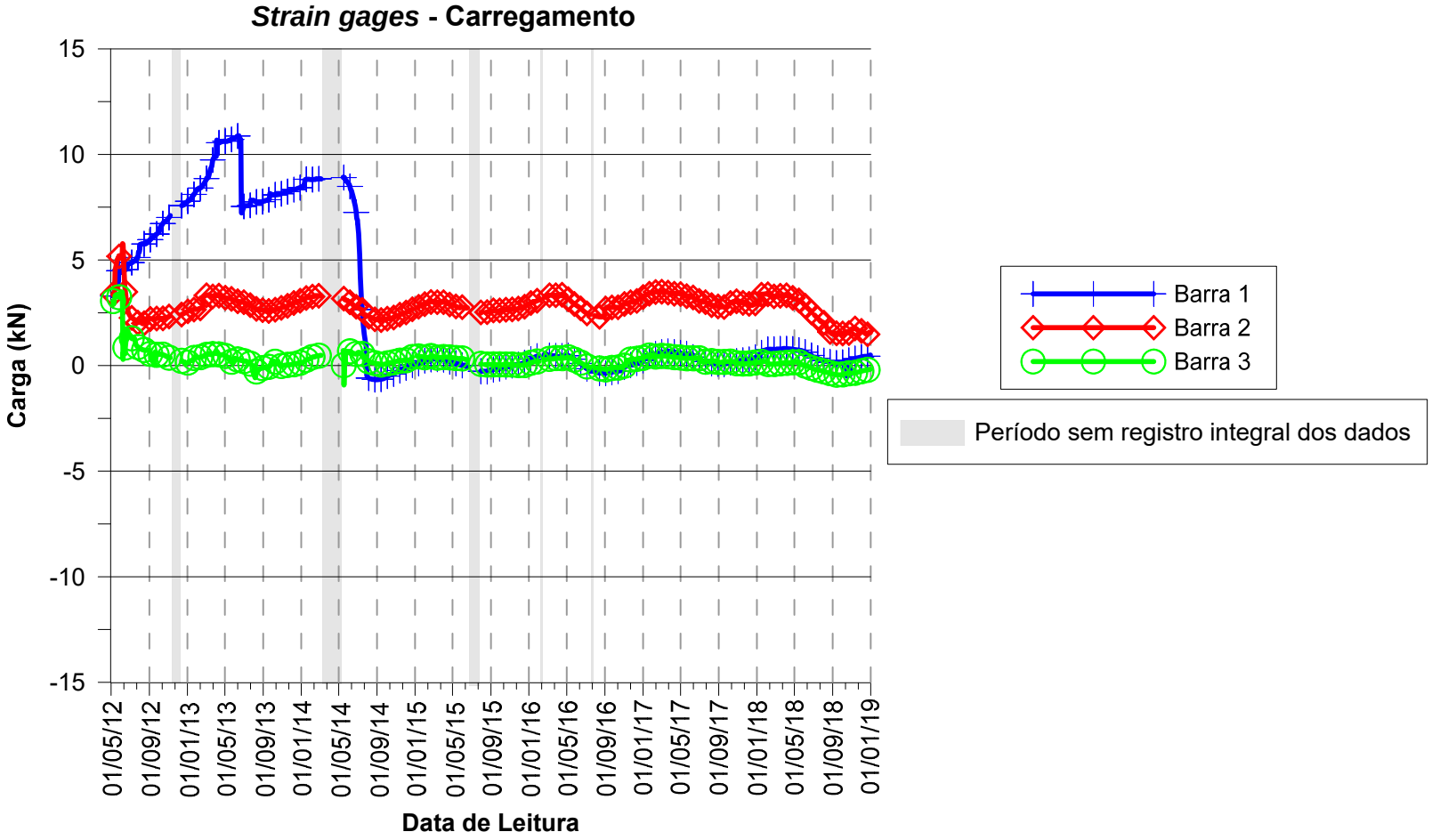





Crackmeters - Ilha 03
Abertura Correspondente (mm)
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
-40
-45
01/05/12
01/09/12
01/01/13
01/05/13
01/09/13
01/01/14
01/05/14
01/09/14
01/01/15
01/05/15
01/09/15
01/01/16
01/05/16
01/09/16
01/01/17
01/05/17
01/09/17
01/01/18
01/05/18
01/09/18
01/01/19
Data de Leitura
CRA-02
CRA-11
Período sem registro integral dos dados

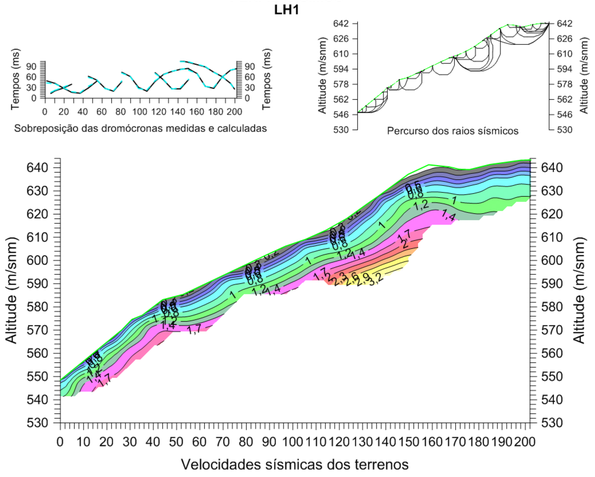

Crackmeters - Ilha 04
Abertura Correspondente (mm)
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
-40
-45
01/05/12
01/09/12
01/01/13
01/05/13
01/09/13
01/01/14
01/05/14
01/09/14
01/01/15
01/05/15
01/09/15
01/01/16
01/05/16
01/09/16
01/01/17
01/05/17
01/09/17
01/01/18
01/05/18
01/09/18
01/01/19
Data de Leitura
CRA-05
CRA-09
CRA-06
CRA-12
Período sem registro integral dos dados

APÊNDICE 11 – Série histórica dos dados de *strain gages* instalados no Morro do Boi

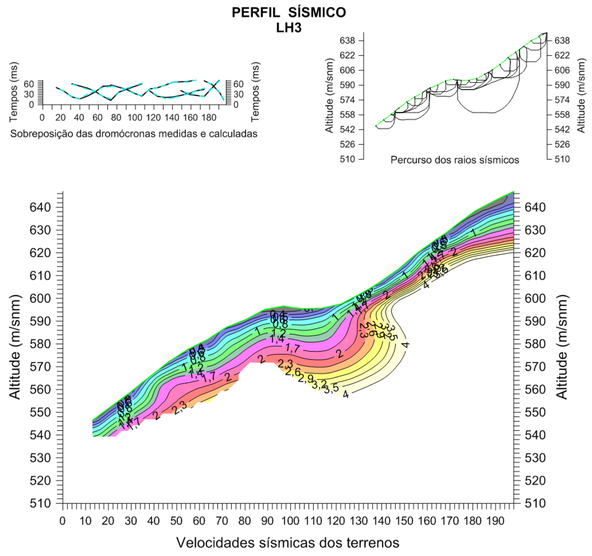


APÊNDICE 12 – Perfil sísmico

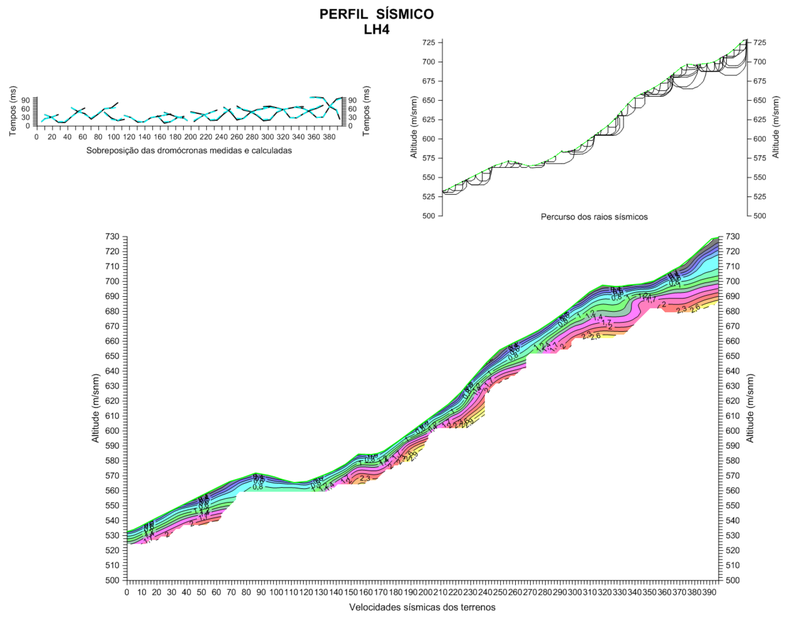
PERFIL SÍSMICO LH1



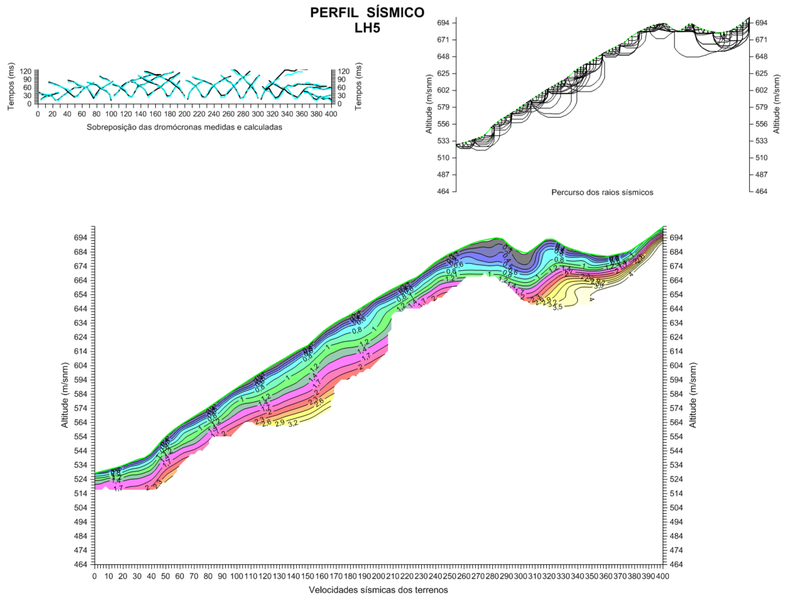
PERFIL SÍSMICO LH3



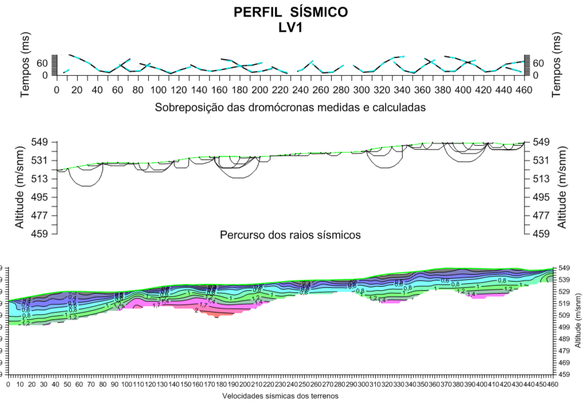
PERFIL SÍSMICO LH4



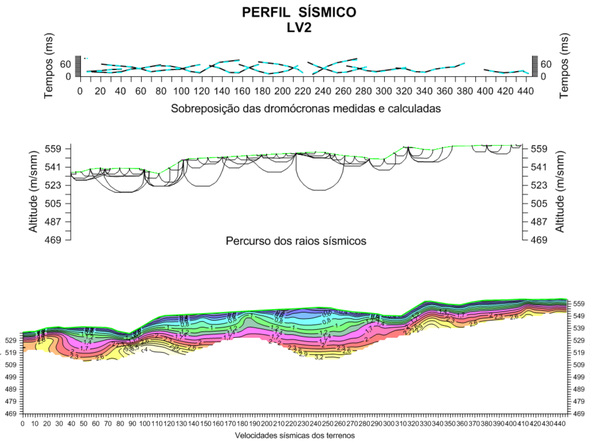
PERFIL SÍSMICO LH5



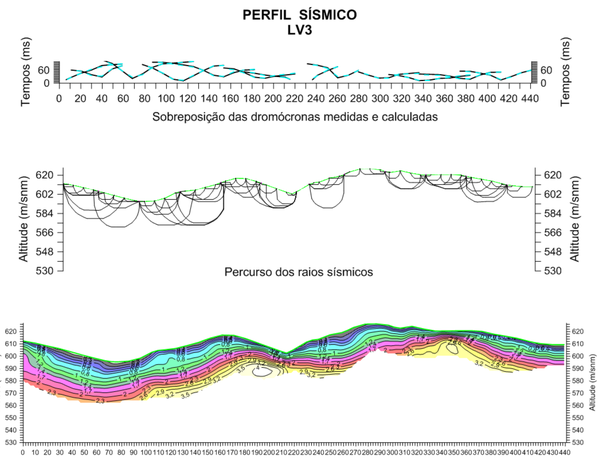
PERFIL SÍSMICO LV1

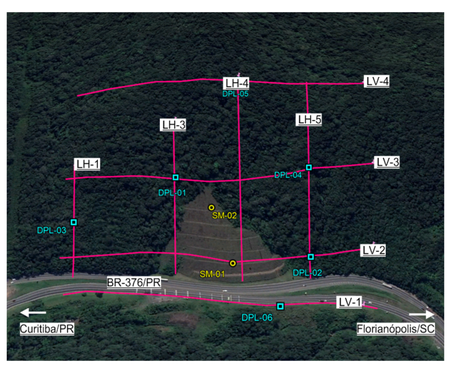


PERFIL SÍSMICO LV2



PERFIL SÍSMICO LV3





LEGENDA

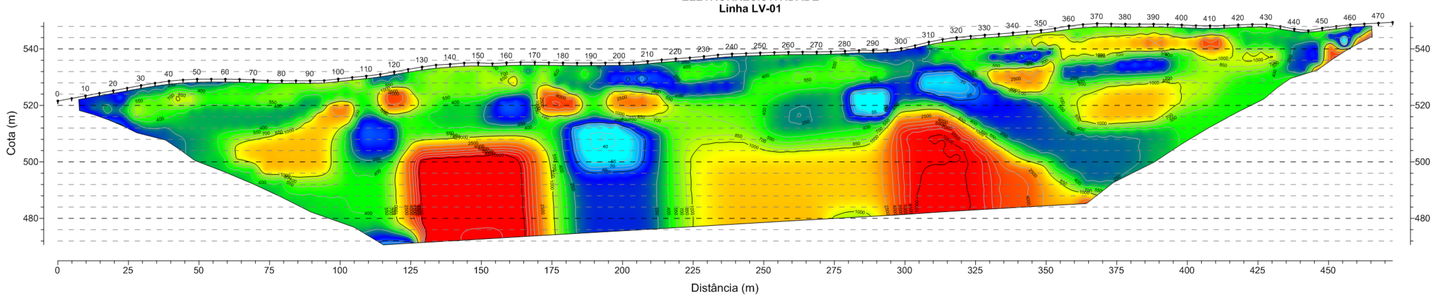
Dromócrona medida

Dromócrona calculada

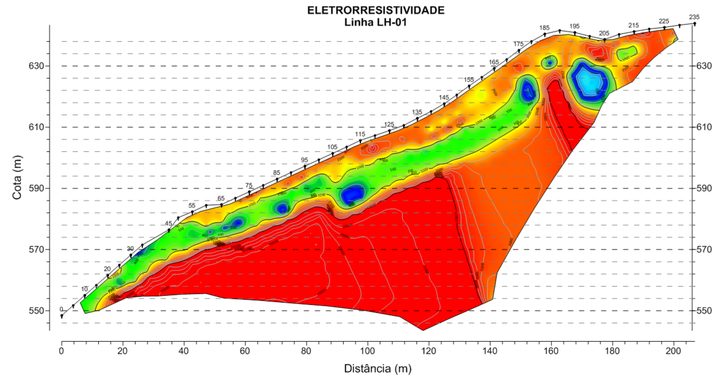
Equipamento: ABM - BR24
Geofones: Mark Products 8 Hz
Energização: Marreta + explosivo
Elaboração: GRM + inversão tomográfica 2D

APÊNDICE 13 – Eletrorresistividade

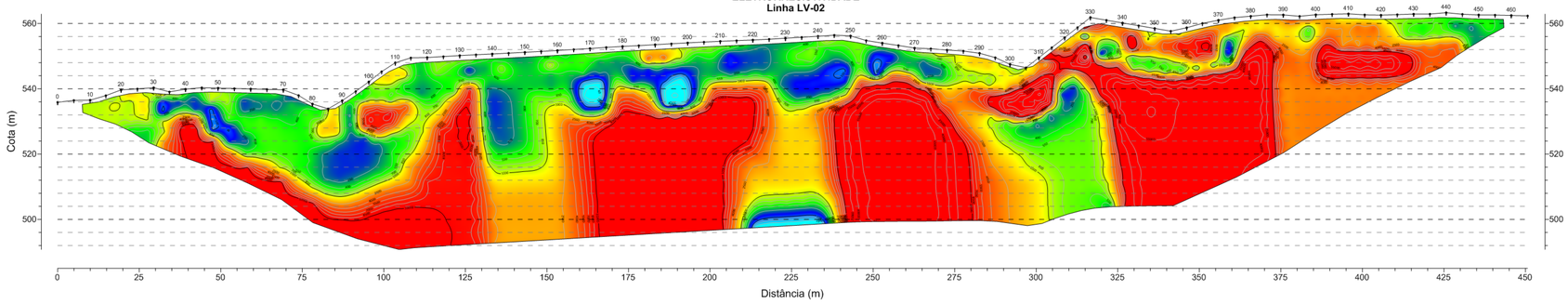
ELETRORRESISTIVIDADE
Linha LV-01



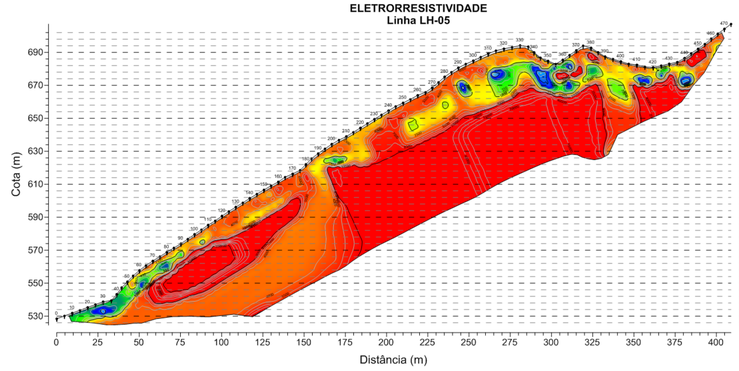
ELETRORRESISTIVIDADE
Linha LH-01



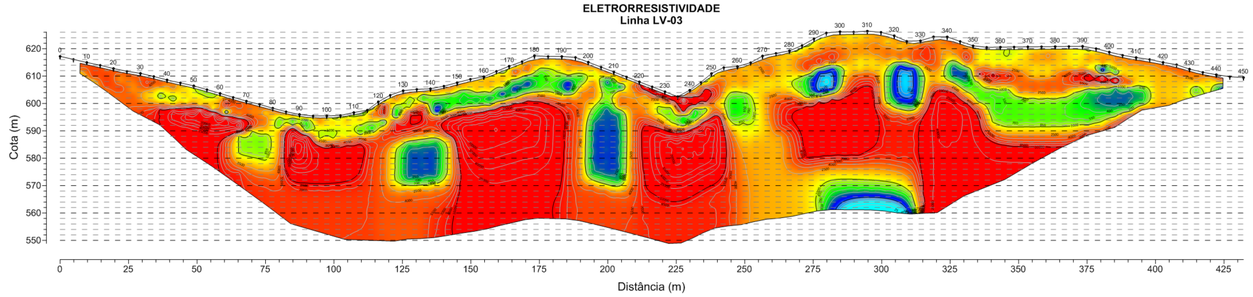
ELETRORRESISTIVIDADE
Linha LV-02



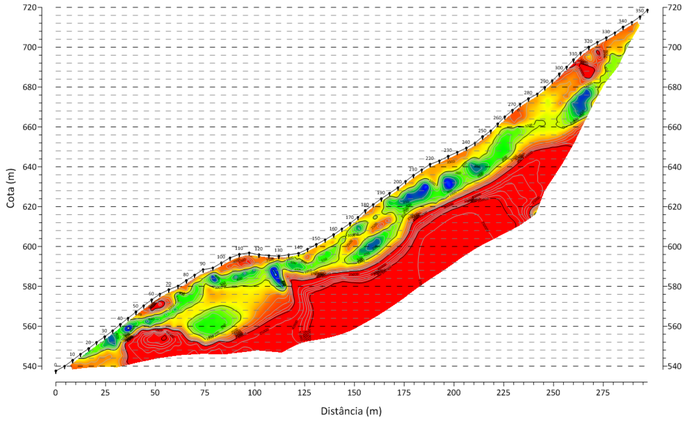
ELETRORRESISTIVIDADE
Linha LH-05



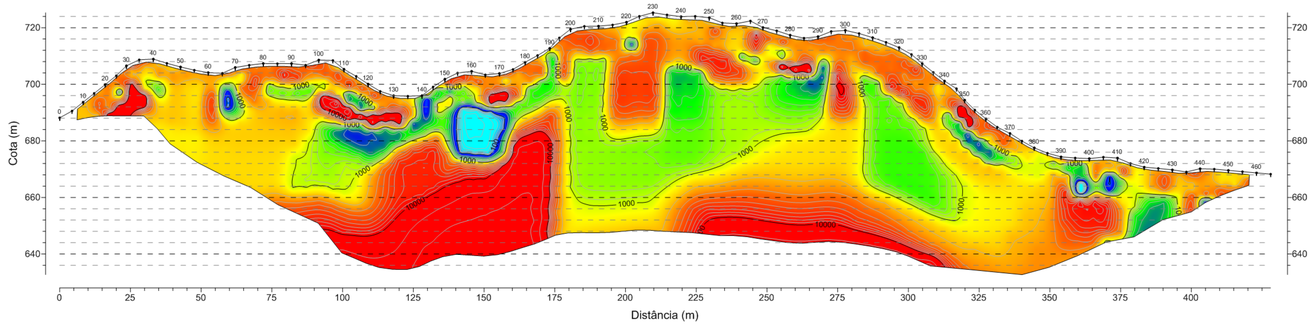
ELETRORRESISTIVIDADE
Linha LV-03



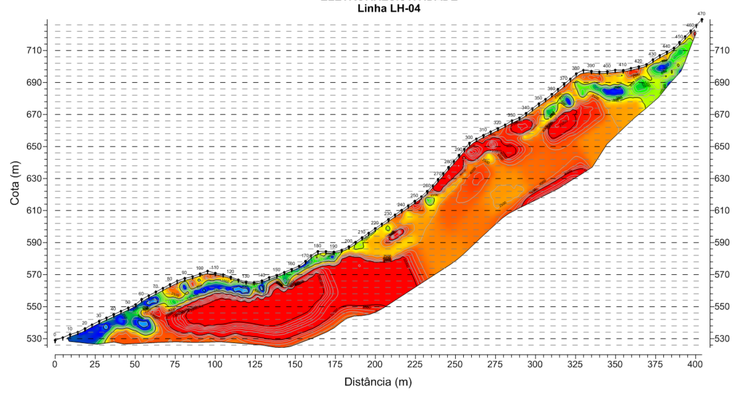
ELETRORRESISITIVIDADE
Linha LH-03

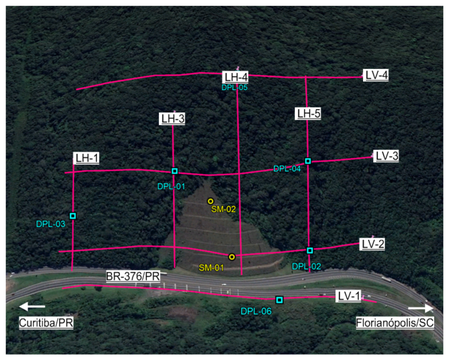


ELETRORRESISTIVIDADE
Linha LV-04



ELETRORRESISTIVIDADE
Linha LH-04



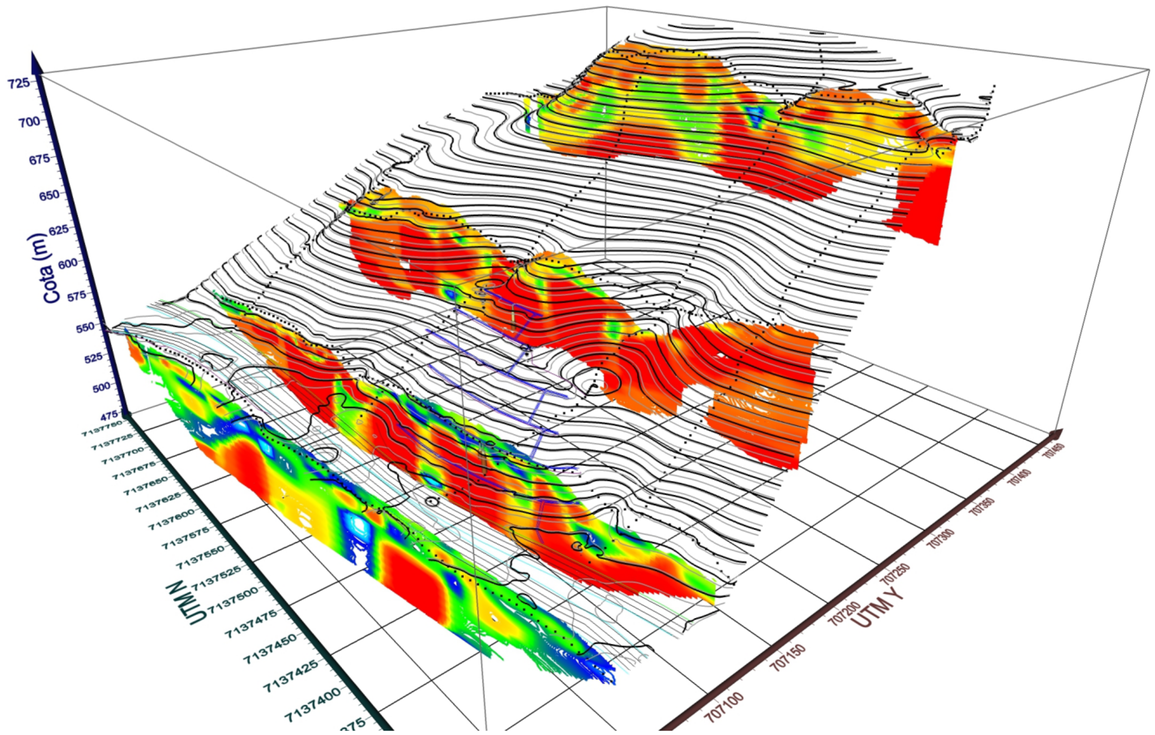


Resistividade (Ohm.m)

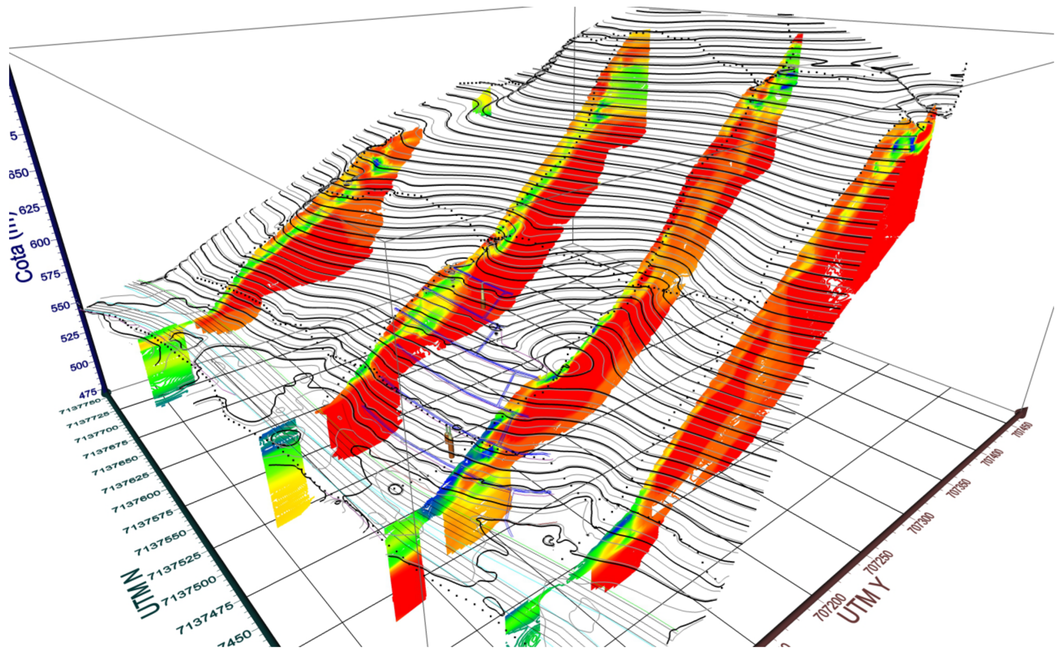
50 100 200 300 500 1000 2000 3000 5000 10000

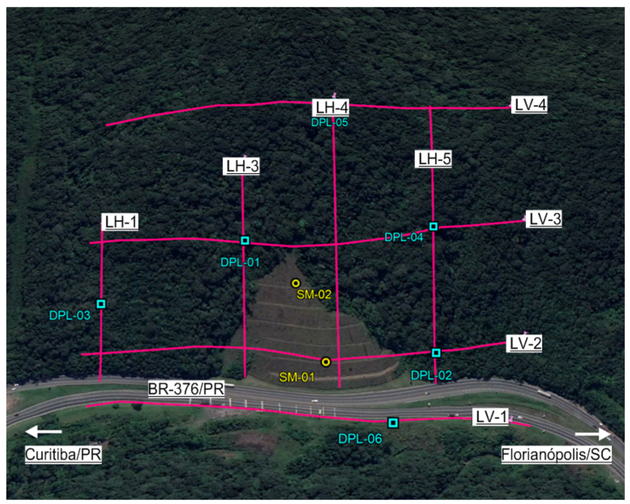
APÊNDICE 14 – Projeções tridimensionais eletrorresistividade

PROJECÕES TRIDIMENSIONAIS - LINHAS LV

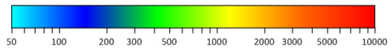


PROJEÇÕES TRIDIMENSIONAIS - LINHAS LH

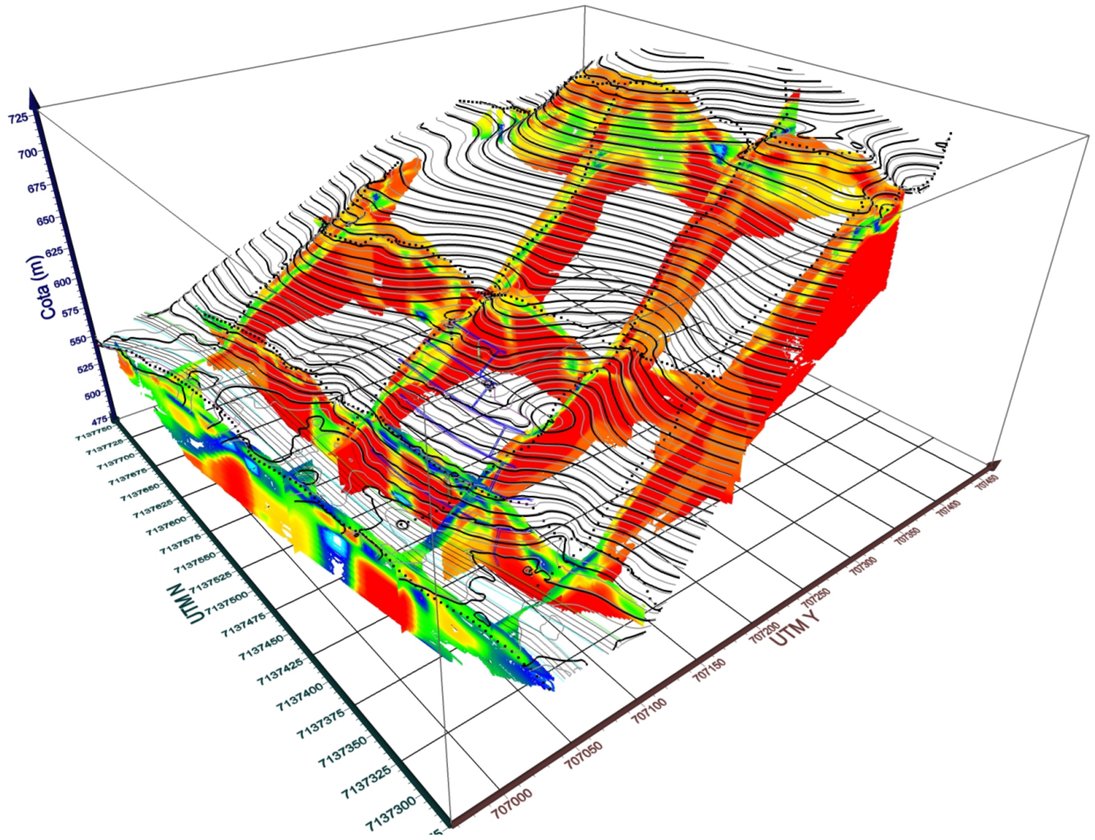




Resistividade (Ohm.m)

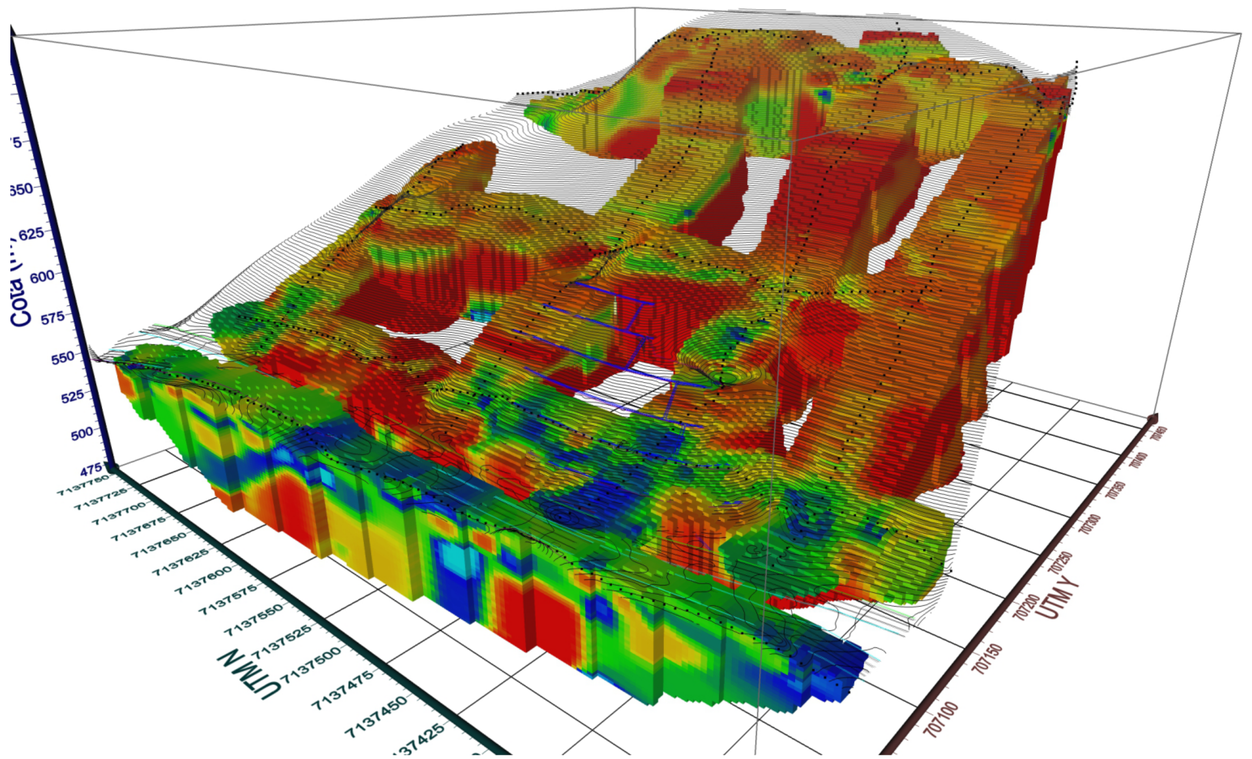


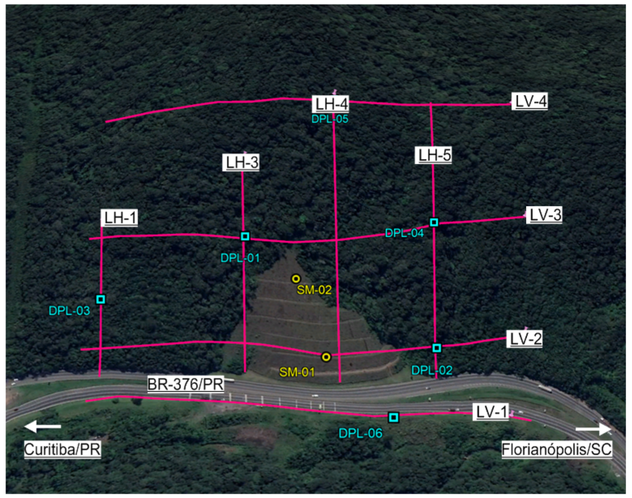
PROJEÇÕES TRIDIMENSIONAIS - MODELO GERAL



APÊNDICE 15 – Modelo tridimensional eletrorresistividade

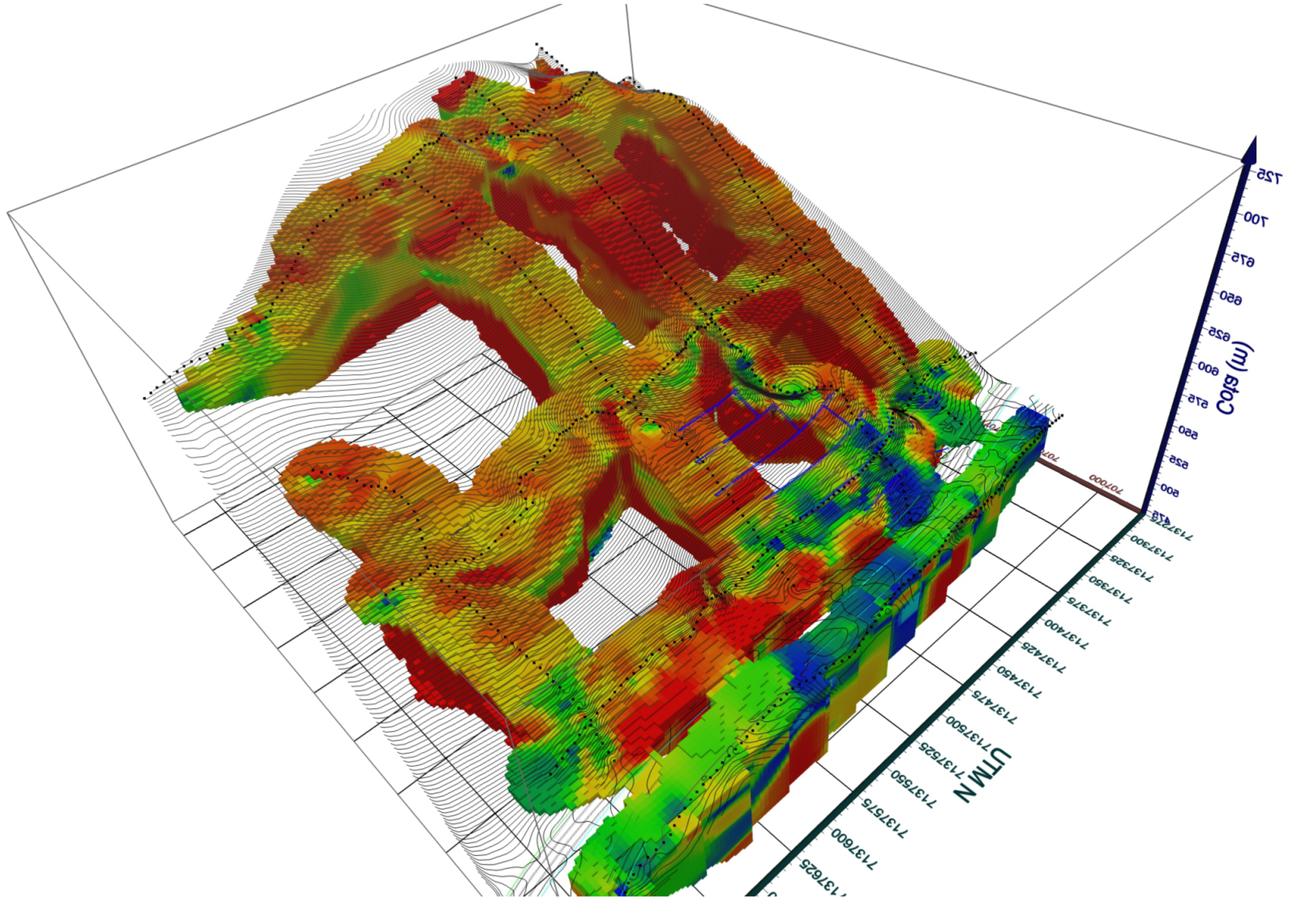
MODELOS TRIDIMENSIONAIS





Resistividade (Ohm.m)

50 100 200 300 500 1000 2000 3000 5000 10000



APÊNDICE 16 – Boletins de sondagem DPL e Mista

BOLETIM DE SONDAGEM PENETROMÉTRICO COM DPL

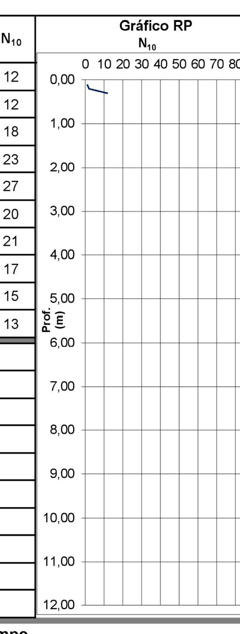
Cliente: FUGRO
Obra: Análise de Estabilidade de Talude
Local: BR-376 - Km 667+900 - Pista Norte - Guaratuba -PR
Ensaio: DPL-01 | Coordenadas: | Cota:
Data de Início: 27/01/2019 | Data de Término: 27/01/2019

CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

Peso do Martelo (kg): 10 | Altura de Queda (cm): 50 | ϕ da Ponteira (cm): 2,07 - Ângulo 60^0 | N.A.: NFE

EXECUÇÃO DO ENSAIO

Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}
0,10	1	1,10		2,10		3,10		4,10		5,10	12
0,20	2	1,20		2,20		3,20		4,20		5,20	12
0,30	12	1,30		2,30		3,30		4,30		5,30	18
0,40		1,40		2,40		3,40		4,40		5,40	23
0,50		1,50		2,50		3,50		4,50		5,50	27
0,60		1,60		2,60		3,60		4,60		5,60	20
0,70		1,70		2,70		3,70		4,70		5,70	21
0,80		1,80		2,80		3,80		4,80		5,80	17
0,90		1,90		2,90		3,90		4,90		5,90	15
1,00		2,00		3,00		4,00		5,00		6,00	13
6,10		7,10		8,10		9,10		10,10		11,10	
6,20		7,20		8,20		9,20		10,20		11,20	
6,30		7,30		8,30		9,30		10,30		11,30	
6,40		7,40		8,40		9,40		10,40		11,40	
6,50		7,50		8,50		9,50		10,50		11,50	
6,60		7,60		8,60		9,60		10,60		11,60	
6,70		7,70		8,70		9,70		10,70		11,70	
6,80		7,80		8,80		9,80		10,80		11,80	
6,90		7,90		8,90		9,90		10,90		11,90	
7,00		8,00		9,00		10,00		11,00		12,00	



Prof. (m)	Descrição Tátil-Visual de Campo

Obs.: Sondagem paralisada com 0,30m de profundidade. Atingiu rocha.

Sondador: Leonardo da Silva Marques

Responsável Técnico: Geólogo de Engenharia Darci Luis Bertin - CREA 89.280

BOLETIM DE SONDAGEM PENETROMÉTRICO COM DPL

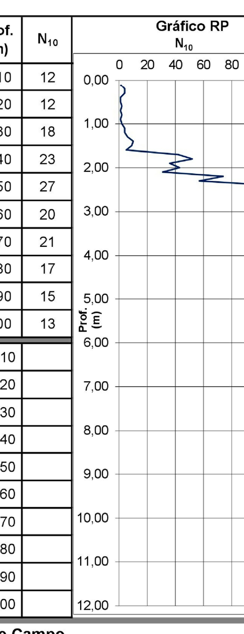
Cliente: FUGRO
Obra: Análise de Estabilidade de Talude
Local: BR-376 - Km 667+900 - Pista Norte - Guaratuba -PR
Ensaio: DPL-01A | Coordenadas: | Cota:
Data de Início: 27/01/2019 | Data de Término: 27/01/2019

CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

Peso do Martelo (kg): 10 | Altura de Queda (cm): 50 | ϕ da Ponteira (cm): 2,07 - Ângulo 60^0 | N.A.: NFE

EXECUÇÃO DO ENSAIO

Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}
0,10	1	1,10	4	2,10	31	3,10		4,10		5,10	12
0,20	4	1,20	4	2,20	74	3,20		4,20		5,20	12
0,30	4	1,30	6	2,30	57	3,30		4,30		5,30	18
0,40	1	1,40	10	2,40	108	3,40		4,40		5,40	23
0,50	1	1,50	9	2,50		3,50		4,50		5,50	27
0,60	2	1,60	5	2,60		3,60		4,60		5,60	20
0,70	1	1,70	42	2,70		3,70		4,70		5,70	21
0,80	2	1,80	52	2,80		3,80		4,80		5,80	17
0,90	1	1,90	36	2,90		3,90		4,90		5,90	15
1,00	2	2,00	43	3,00		4,00		5,00		6,00	13
6,10		7,10		8,10		9,10		10,10		11,10	
6,20		7,20		8,20		9,20		10,20		11,20	
6,30		7,30		8,30		9,30		10,30		11,30	
6,40		7,40		8,40		9,40		10,40		11,40	
6,50		7,50		8,50		9,50		10,50		11,50	
6,60		7,60		8,60		9,60		10,60		11,60	
6,70		7,70		8,70		9,70		10,70		11,70	
6,80		7,80		8,80		9,80		10,80		11,80	
6,90		7,90		8,90		9,90		10,90		11,90	
7,00		8,00		9,00		10,00		11,00		12,00	



Prof. (m)	Descrição Tátil-Visual de Campo

Obs.: Final da sondagem com 2,40m de profundidade. N10>100 golpes em 1 segmento (10cm). Norma DIN 4094:1990.

Sondador: Leonardo da Silva Marques

Responsável Técnico: Geólogo de Engenharia Darci Luis Bertin - CREA 89.280

BOLETIM DE SONDAGEM PENETROMÉTRICO COM DPL

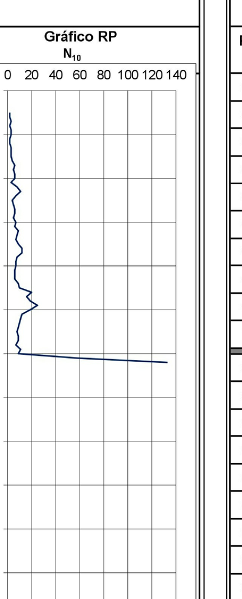
Cliente: FUGRO
Obra: Análise de Estabilidade de Talude
Local: BR-376 - Km 667+900 - Pista Norte - Guaratuba -PR
Ensaio: DPL-01B | Coordenadas: | Cota:
Data de Início: 27/01/2019 | Data de Término: 27/01/2019

CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

Peso do Martelo (kg): 10 | Altura de Queda (cm): 50 | ϕ da Ponteira (cm): 2,07 - Ângulo 60^0 | N.A.: NFE

EXECUÇÃO DO ENSAIO

Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}
0,10	1	1,10	2	2,10	3	3,10	6	4,10	6	5,10	12
0,20		1,20	2	2,20	8	3,20	9	4,20	6	5,20	11
0,30		1,30	3	2,30	11	3,30	8	4,30	6	5,30	10
0,40		1,40	3	2,40	7	3,40	7	4,40	9	5,40	9
0,50	2	1,50	3	2,50	4	3,50	9	4,50	10	5,50	8
0,60	2	1,60	4	2,60	5	3,60	12	4,60	20	5,60	9
0,70	3	1,70	6	2,70	6	3,70	12	4,70	16	5,70	9
0,80	2	1,80	5	2,80	6	3,80	8	4,80	19	5,80	7
0,90	3	1,90	6	2,90	5	3,90	7	4,90	25	5,90	11
1,00	3	2,00	6	3,00	7	4,00	7	5,00	19	6,00	9
6,10	58	7,10		8,10		9,10		10,10		11,10	
6,20	133	7,20		8,20		9,20		10,20		11,20	
6,30		7,30		8,30		9,30		10,30		11,30	
6,40		7,40		8,40		9,40		10,40		11,40	
6,50		7,50		8,50		9,50		10,50		11,50	
6,60		7,60		8,60		9,60		10,60		11,60	
6,70		7,70		8,70		9,70		10,70		11,70	
6,80		7,80		8,80		9,80		10,80		11,80	
6,90		7,90		8,90		9,90		10,90		11,90	
7,00		8,00		9,00		10,00		11,00		12,00	



Prof. (m)	Descrição Tátil-Visual de Campo

Obs.: Final da sondagem com 6,20m de profundidade. N10>100 golpes em 1 segmento (10cm). Norma DIN 4094:1990.

Sondador: Leonardo da Silva Marques

Responsável Técnico: Geólogo de Engenharia Darci Luis Bertin - CREA 89.280

BOLETIM DE SONDAGEM PENETROMÉTRICO COM DPL

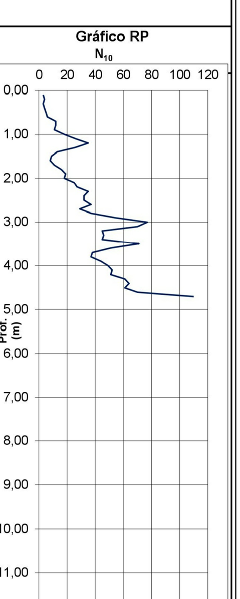
Cliente: FUGRO
Obra: Análise de Estabilidade de Talude
Local: BR-376 - Km 667+900 - Pista Norte - Guaratuba -PR
Ensaio: DPL-02 | Coordenadas: | Cota:
Data de Início: 25/01/2019 | Data de Término: 25/01/2019

CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

Peso do Martelo (kg): 10 | Altura de Queda (cm): 50 | ϕ da Ponteira (cm): 2,07 - Ângulo 60^0 | N.A.: NFE

EXECUÇÃO DO ENSAIO

Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}
0,10	3	1,10	26	2,10	25	3,10	70	4,10	52	5,10	
0,20	4	1,20	35	2,20	27	3,20	45	4,20	51	5,20	
0,30	3	1,30	26	2,30	35	3,30	46	4,30	61	5,30	
0,40	4	1,40	13	2,40	32	3,40	45	4,40	64	5,40	
0,50	5	1,50	9	2,50	32	3,50	71	4,50	61	5,50	
0,60	6	1,60	8	2,60	37	3,60	51	4,60	70	5,60	
0,70	12	1,70	11	2,70	29	3,70	38	4,70	110	5,70	
0,80	12	1,80	16	2,80	37	3,80	37	4,80		5,80	
0,90	11	1,90	19	2,90	54	3,90	44	4,90		5,90	
1,00	18	2,00	18	3,00	77	4,00	49	5,00		6,00	
6,10		7,10		8,10		9,10		10,10		11,10	
6,20		7,20		8,20		9,20		10,20		11,20	
6,30		7,30		8,30		9,30		10,30		11,30	
6,40		7,40		8,40		9,40		10,40		11,40	
6,50		7,50		8,50		9,50		10,50		11,50	
6,60		7,60		8,60		9,60		10,60		11,60	
6,70		7,70		8,70		9,70		10,70		11,70	
6,80		7,80		8,80		9,80		10,80		11,80	
6,90		7,90		8,90		9,90		10,90		11,90	
7,00		8,00		9,00		10,00		11,00		12,00	



Prof. (m)	Descrição Tátil-Visual de Campo

Obs.: Final da sondagem com 4,70m de profundidade. N10>100 golpes em 1 segmento (10cm). Norma DIN 4094:1990.

Sondador: Leonardo da Silva Marques

Responsável Técnico: Geólogo de Engenharia Darci Luis Bertin - CREA 89.280

BOLETIM DE SONDAGEM PENETROMÉTRICO COM DPL

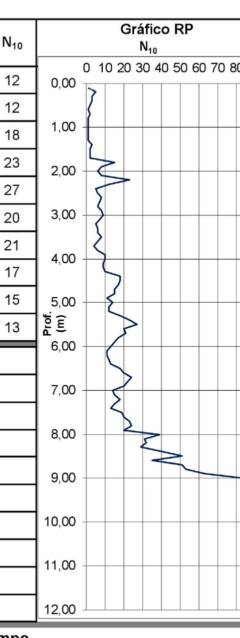
Cliente: FUGRO
Obra: Análise de Estabilidade de Talude
Local: BR-376 - Km 667+900 - Pista Norte - Guaratuba -PR
Ensaio: DPL-03 | Coordenadas: | Cota:
Data de Início: 27/01/2019 | Data de Término: 28/01/2019

CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

Peso do Martelo (kg): 10 | Altura de Queda (cm): 50 | ϕ da Ponteira (cm): 2,07 - Ângulo 60^0 | N.A.: NFE

EXECUÇÃO DO ENSAIO

Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}
0,10	1	1,10	1	2,10	8	3,10	7	4,10	9	5,10	12
0,20	5	1,20	1	2,20	23	3,20	5	4,20	9	5,20	12
0,30	3	1,30	1	2,30	12	3,30	6	4,30	10	5,30	18
0,40	3	1,40	3	2,40	5	3,40	6	4,40	18	5,40	23
0,50	2	1,50	2	2,50	6	3,50	8	4,50	18	5,50	27
0,60	1	1,60	2	2,60	8	3,60	6	4,60	17	5,60	20
0,70	2	1,70	2	2,70	7	3,70	4	4,70	15	5,70	21
0,80	1	1,80	15	2,80	6	3,80	6	4,80	15	5,80	17
0,90	1	1,90	8	2,90	8	3,90	10	4,90	11	5,90	15
1,00	1	2,00	6	3,00	9	4,00	10	5,00	14	6,00	13
6,10	11	7,10	15	8,10	31	9,10	88	10,10		11,10	
6,20	11	7,20	18	8,20	32	9,20	83	10,20		11,20	
6,30	12	7,30	15	8,30	29	9,30	83	10,30		11,30	
6,40	13	7,40	13	8,40	40	9,40	86	10,40		11,40	
6,50	18	7,50	19	8,50	51	9,50		10,50		11,50	
6,60	20	7,60	20	8,60	35	9,60		10,60		11,60	
6,70	24	7,70	23	8,70	51	9,70		10,70		11,70	
6,80	22	7,80	24	8,80	53	9,80		10,80		11,80	
6,90	20	7,90	20	8,90	63	9,90		10,90		11,90	
7,00	14	8,00	39	9,00	83	10,00		11,00		12,00	



Prof. (m)	Descrição Tátil-Visual de Campo

Obs.: Final da sondagem com 9,40m de profundidade. N_{10}>60 golpes em 5 segmentos consecutivos (50 cm). Norma DIN 4094:1990.

Sondador: Leonardo da Silva Marques

Responsável Técnico: Geólogo de Engenharia Darci Luis Bertin - CREA 89.280

BOLETIM DE SONDAGEM PENETROMÉTRICO COM DPL

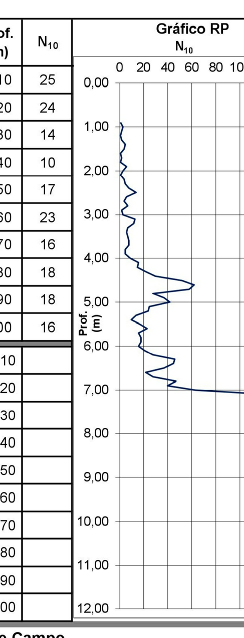
Cliente: FUGRO
Obra: Análise de Estabilidade de Talude
Local: BR-376 - Km 667+900 - Pista Norte - Guaratuba -PR
Ensaio: DPL-04 | Coordenadas: | Cota:
Data de Início: 26/01/2019 | Data de Término: 26/01/2019

CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

Peso do Martelo (kg): 10 | Altura de Queda (cm): 50 | ϕ da Ponteira (cm): 2,07 - Ângulo 60^0 | N.A.: NFE

EXECUÇÃO DO ENSAIO

Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}
0,10	1	1,10	2	2,10	1	3,10	13	4,10	16	5,10	25
0,20		1,20	1	2,20	4	3,20	12	4,20	15	5,20	24
0,30		1,30	2	2,30	5	3,30	7	4,30	22	5,30	14
0,40		1,40	5	2,40	8	3,40	6	4,40	30	5,40	10
0,50		1,50	4	2,50	14	3,50	7	4,50	52	5,50	17
0,60		1,60	1	2,60	6	3,60	8	4,60	62	5,60	23
0,70	1	1,70	2	2,70	4	3,70	8	4,70	58	5,70	16
0,80		1,80	1	2,80	7	3,80	5	4,80	28	5,80	18
0,90	1	1,90	6	2,90	2	3,90	5	4,90	37	5,90	18
1,00	3	2,00	3	3,00	3	4,00	9	5,00	42	6,00	16
6,10	21	7,10	125	8,10		9,10		10,10		11,10	
6,20	28	7,20		8,20		9,20		10,20		11,20	
6,30	46	7,30		8,30		9,30		10,30		11,30	
6,40	45	7,40		8,40		9,40		10,40		11,40	
6,50	37	7,50		8,50		9,50		10,50		11,50	
6,60	22	7,60		8,60		9,60		10,60		11,60	
6,70	28	7,70		8,70		9,70		10,70		11,70	
6,80	47	7,80		8,80		9,80		10,80		11,80	
6,90	40	7,90		8,90		9,90		10,90		11,90	
7,00	63	8,00		9,00		10,00		11,00		12,00	



Prof. (m)	Descrição Tátil-Visual de Campo

Obs.: Final da sondagem com 7,10m de profundidade. N10>100 golpes em 1 segmento (10cm). Norma DIN 4094:1990.

Sondador: Leonardo da Silva Marques

Responsável Técnico: Geólogo de Engenharia Darci Luis Bertin - CREA 89.280

BOLETIM DE SONDAGEM PENETROMÉTRICO COM DPL

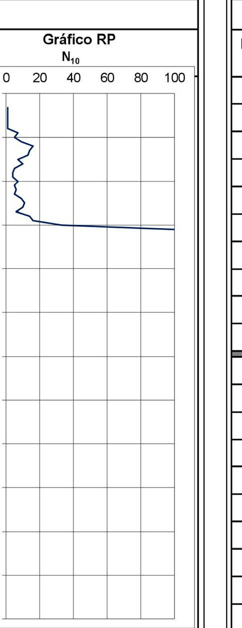
Cliente: FUGRO
Obra: Análise de Estabilidade de Talude
Local: BR-376 - Km 667+900 - Pista Norte - Guaratuba -PR
Ensaio: DPL-05 | Coordenadas: | Cota:
Data de Início: 26/01/2019 | Data de Término: 26/01/2019

CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

Peso do Martelo (kg): 10 | Altura de Queda (cm): 50 | ϕ da Ponteira (cm): 2,07 - Ângulo 60^0 | N.A.: NFE

EXECUÇÃO DO ENSAIO

Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}
0,10	1	1,10	9	2,10	5	3,10	100	4,10		5,10	
0,20		1,20	16	2,20	6	3,20		4,20		5,20	
0,30	1	1,30	14	2,30	5	3,30		4,30		5,30	
0,40	1	1,40	13	2,40	9	3,40		4,40		5,40	
0,50	1	1,50	7	2,50	11	3,50		4,50		5,50	
0,60	1	1,60	10	2,60	10	3,60		4,60		5,60	
0,70	1	1,70	5	2,70	6	3,70		4,70		5,70	
0,80	1	1,80	4	2,80	14	3,80		4,80		5,80	
0,90	7	1,90	4	2,90	16	3,90		4,90		5,90	
1,00	5	2,00	7	3,00	33	4,00		5,00		6,00	
6,10		7,10		8,10		9,10		10,10		11,10	
6,20		7,20		8,20		9,20		10,20		11,20	
6,30		7,30		8,30		9,30		10,30		11,30	
6,40		7,40		8,40		9,40		10,40		11,40	
6,50		7,50		8,50		9,50		10,50		11,50	
6,60		7,60		8,60		9,60		10,60		11,60	
6,70		7,70		8,70		9,70		10,70		11,70	
6,80		7,80		8,80		9,80		10,80		11,80	
6,90		7,90		8,90		9,90		10,90		11,90	
7,00		8,00		9,00		10,00		11,00		12,00	



Prof. (m)	Descrição Tátil-Visual de Campo

Obs.: Final da sondagem com 3,10m de profundidade. N10 = 100 golpes com avanço de 4cm.

Sondador: Leonardo da Silva Marques

Responsável Técnico: Geólogo de Engenharia Darci Luis Bertin - CREA 89.280

BOLETIM DE SONDAGEM PENETROMÉTRICO COM DPL

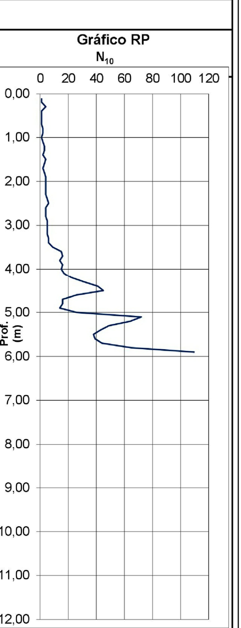
Cliente: FUGRO
Obra: Análise de Estabilidade de Talude
Local: BR-376 - Km 667+900 - Pista Norte - Guaratuba -PR
Ensaio: DPL-05A | Coordenadas: | Cota:
Data de Início: 26/01/2019 | Data de Término: 26/01/2019

CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

Peso do Martelo (kg): 10 | Altura de Queda (cm): 50 | ϕ da Ponteira (cm): 2,07 - Ângulo 60^0 | N.A.: NFE

EXECUÇÃO DO ENSAIO

Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}
0,10	1	1,10	2	2,10	4	3,10	5	4,10	17	5,10	72
0,20	1	1,20	3	2,20	4	3,20	5	4,20	22	5,20	64
0,30	4	1,30	3	2,30	4	3,30	6	4,30	31	5,30	49
0,40	1	1,40	2	2,40	5	3,40	6	4,40	41	5,40	43
0,50	1	1,50	4	2,50	6	3,50	9	4,50	45	5,50	38
0,60	1	1,60	3	2,60	4	3,60	15	4,60	26	5,60	39
0,70	1	1,70	2	2,70	4	3,70	16	4,70	16	5,70	44
0,80	2	1,80	3	2,80	4	3,80	14	4,80	16	5,80	65
0,90	2	1,90	4	2,90	5	3,90	16	4,90	14	5,90	110
1,00	1	2,00	4	3,00	5	4,00	15	5,00	26	6,00	
6,10		7,10		8,10		9,10		10,10		11,10	
6,20		7,20		8,20		9,20		10,20		11,20	
6,30		7,30		8,30		9,30		10,30		11,30	
6,40		7,40		8,40		9,40		10,40		11,40	
6,50		7,50		8,50		9,50		10,50		11,50	
6,60		7,60		8,60		9,60		10,60		11,60	
6,70		7,70		8,70		9,70		10,70		11,70	
6,80		7,80		8,80		9,80		10,80		11,80	
6,90		7,90		8,90		9,90		10,90		11,90	
7,00		8,00		9,00		10,00		11,00		12,00	



Prof. (m)	Descrição Tátil-Visual de Campo

Obs.: Final da sondagem com 5,90m de profundidade. N10>100 golpes em 1 segmento (10cm). Norma DIN 4094:1990.

Sondador: Leonardo da Silva Marques

Responsável Técnico: Geólogo de Engenharia Darci Luis Bertin - CREA 89.280

BOLETIM DE SONDAGEM PENETROMÉTRICO COM DPL

Cliente: FUGRO
Obra: Análise de Estabilidade de Talude
Local: BR-376 - Km 667+900 - Pista Norte - Guaratuba -PR
Ensaio: DPL-06 | Coordenadas: | Cota:
Data de Início: 25/01/2019 | Data de Término: 26/01/2019

CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

Peso do Martelo (kg): 10 | Altura de Queda (cm): 50 | ϕ da Ponteira (cm): 2,07 - Ângulo 60^0 | N.A.: NFE

EXECUÇÃO DO ENSAIO

Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}	Prof. (m)	N_{10}
0,10	1	1,10	9	2,10	4	3,10	4	4,10	7	5,10	5
0,20	2	1,20	8	2,20	5	3,20	5	4,20	6	5,20	6
0,30	4	1,30	8	2,30	4	3,30	4	4,30	5	5,30	6
0,40	5	1,40	5	2,40	5	3,40	4	4,40	6	5,40	6
0,50	8	1,50	8	2,50	4	3,50	4	4,50	4	5,50	6
0,60	13	1,60	5	2,60	4	3,60	5	4,60	6	5,60	6
0,70	12	1,70	7	2,70	3	3,70	5	4,70	5	5,70	6
0,80	8	1,80	6	2,80	6	3,80	5	4,80	7	5,80	7
0,90	7	1,90	5	2,90	5	3,90	5	4,90	7	5,90	6
1,00	7	2,00	4	3,00	4	4,00	9	5,00	6	6,00	7
6,10	7	7,10	9	8,10	11	9,10	14	10,10	20	11,10	27
6,20	9	7,20	10	8,20	12	9,20	15	10,20	19	11,20	45
6,30	8	7,30	10	8,30	11	9,30	15	10,30	23	11,30	26
6,40	10	7,40	10	8,40	12	9,40	18	10,40	20	11,40	24
6,50	8	7,50	8	8,50	12	9,50	16	10,50	14	11,50	24
6,60	9	7,60	9	8,60	14	9,60	20	10,60	20	11,60	30
6,70	12	7,70	10	8,70	13	9,70	21	10,70	21	11,70	30
6,80	12	7,80	12	8,80	13	9,80	19	10,80	28	11,80	33
6,90	9	7,90	12	8,90	14	9,90	31	10,90	25	11,90	40
7,00	8	8,00	10	9,00	13	10,00	18	11,00	26	12,00	42



Prof. (m)	Descrição Tátil-Visual de Campo

Obs.: Final da sondagem. De acordo com a bibliografia especializada recomenda-se a execução do ensaio até 12,00 metros de profundidade, quando o impenetrável não atender a Norma DIN 4094:1990.

Sondador: Leonardo da Silva Marques

Responsável Técnico: Geólogo de Engenharia Darci Luis Bertin - CREA 89.280

SONDAGEM MISTA SM-01

Diâmetro da Sondagem: NW

Cota (m)	Golpes / 30 cm Inicial	Final	Tipo de Amostragem
552	3	4	SPT
551	9	12	SPT
550	9	15	SPT
549	9	8/34	SPT
548	8	14	SPT
547	17	19	SPT
546	30	38	SPT
545	60/19	20/04	SPT
544	60/26	42/11	SPT
543–533			RC

Descrição do Material

0,00 m a 1,45 m - Argila siltosa, marrom avermelhada. mole à média.

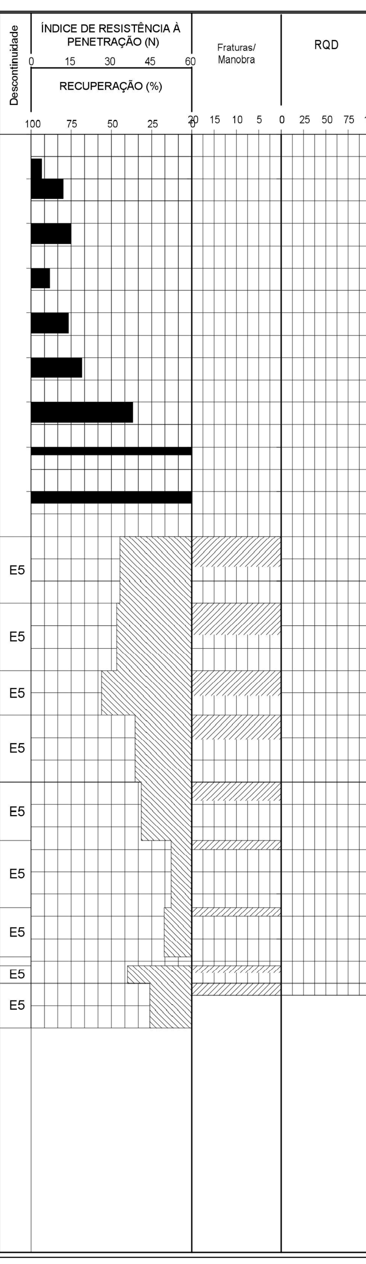
1,45 m a 5,00 m - Areia muito fina argilosa, marrom escura esbranquiçada com porções alaranjadas, pouco compacta a compacta, com pedregulhos milimétricos a centimétricos interpretados como oriundos da rocha local. (SOLO SAPROLÍTICO)

5,00 m a 8,26 m - Areia fina argilosa, marrom escura esbranquiçada, dura, com pedregulhos milimétricos a centimétricos que evidenciam estrutura reliquiar foliada incipiente. (SAPROLITO)

8,26 m a 20,00 m - Protomilonito cinza claro a rosado (12,50-14,50 metros), com porções escuras mais alteradas, composto por feldspato, caulim, quartzo e minerais micáceos, com textura granoblástica e estrutura foliada. Observa-se ribbons de quartzo. Infere-se um protólito granítico.
* De 12,50 m a 14,50 m percebe-se um menor grau de alteração, podendo a rocha ser classificada como medianamente alterada.
* Há porções em que a rocha evidencia composição leucocrática. (PROTOMILONITO)

Coerência	Grau de Alteração	Preenchimento	Rugosidade	Descontinuidade
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAD	D3	IV	E5
C3	RAD	D3	IV	E5
C3	RAD	D3	IV	E5
C3	RAD	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5

Profundidade de sondagem limitada pelo cliente.



DIÂMETRO DA SONDAGEM: NQ - 3" / HQ - 3,8" / HW - 4"

COERÊNCIA	GRAU DE ALTERAÇÃO
C1 - Rocha coerente	RS (W1/A1) - Rocha sã ou praticamente sã
C2 - Rocha medianamente coerente	RAD (W2/A2) - Rocha medianamente alterada
C3 - Rocha pouco coerente	RAM (W3/RAM) - rocha muito alterada
C4 - Rocha incoerente	REA (W4/A4) - rocha extremamente alterada

PREENCHIMENTO	RUGOSIDADE		DESCONTINUIDADE (ESPAÇAMENTO - cm)
D1 - Contato litológico	Recortada	I - Rugosa II - Lisa III - Polida	E1 - Muito afastados (>200)
D2 - Venulações e veios (calcita/sílica)			E2 - Afastados (60 a 200)
D3 - Paredes com alteração incipiente	Ondulada	IV - Rugosa V - Lisa VI - Polida	E3 - Medianamente afastados (20 a 60)
D4 - Paredes alteradas	Plana	VII - Rugosa VIII - Lisa IX - Polida	E4 - Próximos (6 a 20)
D5 - Paredes alt. c/ preenchimento			E5 - Muito próximos (<6)

TIPO DE AMOSTRAGEM
1) DM: Amostrador de 3"
2) DP: Direct Push (diâmetro 2")
3) LPT: Large Penetration Testing (diâmetro 2,5")
4) SPT: Standard Penetration Testing (diâmetro 2")
5) SHB: Shelby (diâmetro 3")
6) RC: Sondagem Rotativa
7) GB: Geobor S
8) DN: Denison

MEDIDAS DE NÍVEL D'ÁGUA

Data	Prof. do furo (m)	N.A (m)	Prof. revest. (m)
14/12/2018	20,00	10,55	17,30

Observações: Profundidade da sondagem limitada pelo cliente. Dados topográficos não fornecidos pelo cliente.

Cliente: AUTOPISTA LITORAL SUL S.A
Obra/Local: APL-20 GUARATUBA-PR
SONDAGEM MISTA SM-01
Coord. loc. da sondagem: E - 707079,84 m; N - 7137433,74 m | Cota - 552,42 m
Coordenador/ Respons. Técnico: JEFERSON GUIMARÃES | Crea: PR-52237/D
LÍVIA 1:100 | Nº Fugro: APL-20-GRE-01 | Data de execução: INÍCIO: 10/12/2018 TÉRMINO: 13/12/2018

SONDAGEM MISTA SM-01A

Diâmetro da Sondagem: HW

Cota (m)	Golpes / 30 cm Inicial	Final	Tipo de Amostragem
551	11	14	SPT
550	5	7	SPT
549	6	8	SPT
548	5	6	SPT
547	4	11	SPT
546	63		SPT
545–541			RC

Descrição do Material

0,00 m a 5,00 m - Areia muito fina argilosa, marrom avermelhada, pouco compacta a medianamente compacta, com pedregulhos milimétricos a centimétricos interpretados como oriundos da rocha local. (SOLO SAPROLÍTICO)

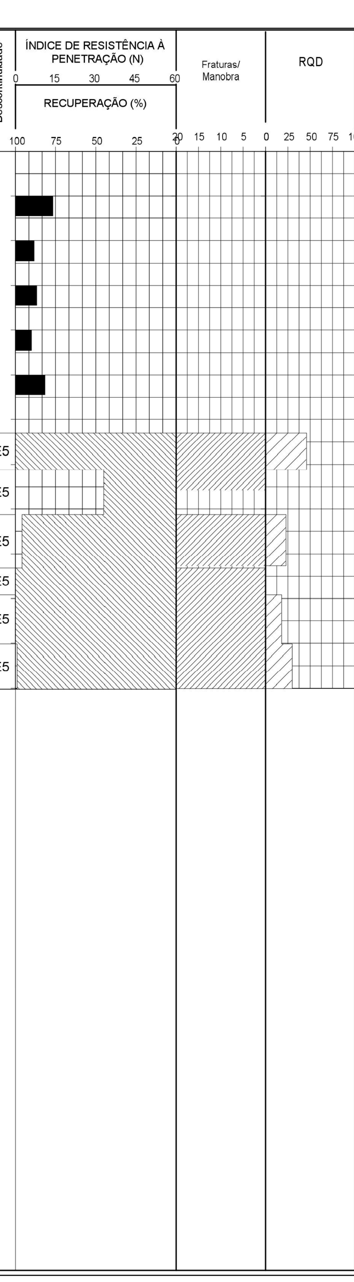
5,00 m a 5,45 m - Areia fina argilosa, marrom avermelhada, rija, com pedregulhos milimétricos a centimétricos interpretados como oriundos da rocha local.
5,45 m a 6,30 m - Areia fina argilosa, marrom escura, com porções alaranjadas, dura, com pedregulhos milimétricos a centimétricos que evidenciam estrutura reliquiar foliada incipiente. (SAPROLITO)

6,30 m a 11,50 m - Protomilonito rosa esbranquiçado, com porções mais alteradas amarelas/alaranjadas, composto por feldspato alcalino, quartzo e minerais micáceos. Apresenta textura granoblástica e estrutura foliada. Observa-se feldspatos com hábito sigmoidal, ribbons de quartzo e pares S/C. Infere-se um protólito granítico.

11,50 m a 12,02 m - Protomilonito rosa esbranquiçado, composto por quartzo, feldspato alcalino e minerais micáceos, textura granoblástica e estrutura foliada. Observa-se feldspatos com hábito sigmoidal, ribbons de quartzo e pares S/C. Infere-se um protólito granítico. (PROTOMILONITO)

Coerência	Grau de Alteração	Preenchimento	Rugosidade	Descontinuidade
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAD	D3	IV	E5

Profundidade de sondagem limitada pelo cliente.



MEDIDAS DE NÍVEL D'ÁGUA

Data	Prof. do furo (m)	N.A (m)	Prof. revest. (m)
17/01/2019	12,02	SECO	6,30

Observações: Profundidade da sondagem limitada pelo cliente. Dados topográficos não fornecidos pelo cliente.

Cliente: AUTOPISTA LITORAL SUL S.A
Obra/Local: APL-20 GUARATUBA-PR
SONDAGEM MISTA SM-01A
Coord. loc. da sondagem: E - 707079,84 m; N - 7137436,75 m | Cota - 552,42 m
Coordenador/ Respons. Técnico: JEFERSON GUIMARÃES | Crea: PR-52237/D
LÍVIA 1:100 | Nº Fugro | Data de execução: INÍCIO: 14/01/2019 TÉRMINO: 16/01/2019

SONDAGEM MISTA SM-02

Diâmetro da Sondagem: HW

Cota (m)	Golpes / 30 cm Inicial	Final	Tipo de Amostragem
596	6	8	SPT
595	11	16	SPT
594	12	17	SPT
593	15	21	SPT
592	13	16	SPT
591	10	13	SPT
590	9	12	SPT
589	26	38	SPT
588	30	45	SPT
587	37	53	SPT
586	50/10		SPT / RC
585	50/14		SPT
584–582			RC
581	50/10		RC / SPT
580			RC

Descrição do Material

0,00 m a 3,00 m - Silte argiloso, marrom avermelhado com porções esbranquiçadas, médio a rijo, com pedregulhos centimétricos interpretados como oriundos da rocha local. (SOLO COLUVIONAR)

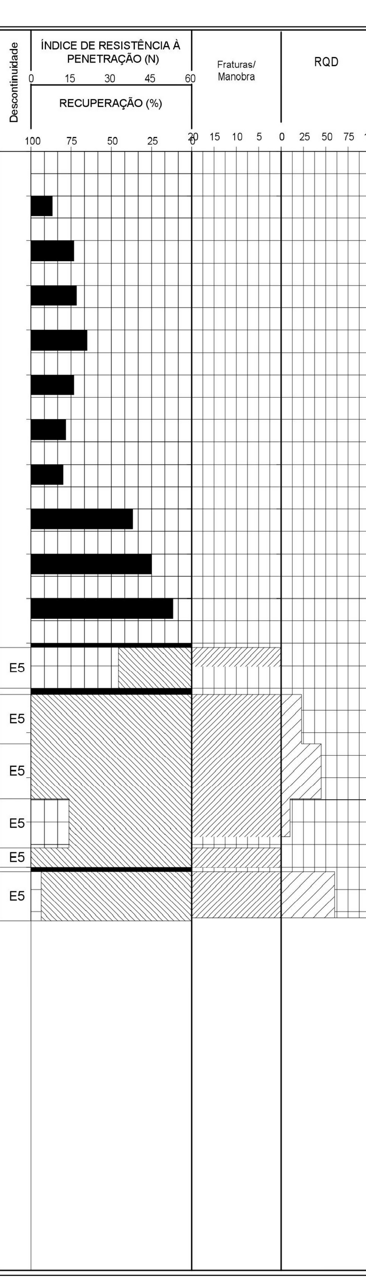
3,00 m a 4,00 m - Areia muito fina argilosa, marrom clara com porções esbranquiçadas, rija e com pedregulhos milimétricos interpretados como oriundos da rocha local. (SOLO SAPROLÍTICO)

4,00 m a 11,10 m - Areia fina argilosa, marrom clara com porções esbranquiçadas, rija a dura, com pedregulhos centimétricos da rocha local, os quais apresentam estrutura reliquiar foliada, com grãos de quartzo, feldspato e mica muito alterados. (SAPROLITO)

11,10 m a 17,20 m - Protomilonito cinza esbranquiçado e rosado, com porções escuras mais alteradas, composto por feldspato, caulim, quartzo e minerais micáceos, com textura granoblástica e estrutura foliada. Observa-se ribbons de quartzo, foliação subvertical e feldspato com hábito sigmoidal. (PROTOMILONITO)

Coerência	Grau de Alteração	Preenchimento	Rugosidade	Descontinuidade
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAM	D3	IV	E5
C3	RAD	D3	IV	E5

Profundidade de sondagem limitada pelo cliente.



MEDIDAS DE NÍVEL D'ÁGUA

Data	Prof. do furo (m)	N.A (m)	Prof. revest. (m)
10/01/2019	17,20	12,58	11,20

Observações: Profundidade da sondagem limitada pelo cliente. Dados topográficos não fornecidos pelo cliente.

Cliente: AUTOPISTA LITORAL SUL S.A
Obra/Local: APL-20 GUARATUBA-PR
SONDAGEM MISTA SM-02
Coord. loc. da sondagem: E - 707150,01 m; N - 7137495,18 m | Cota - 597,01 m
Coordenador/ Respons. Técnico: JEFERSON GUIMARÃES | Crea: PR-52237/D
LÍVIA 1:100 | Nº Fugro: APL-20-GRE-01 | Data de execução: INÍCIO: 28/12/2018 TÉRMINO: 09/01/2019

APÊNDICE 17 – Relatório fotográfico das sondagens rotativas

FUGRO	RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DE SONDAGEM ROTATIVA
CLIENTE: AUTOPISTA LITORAL SUL	**SONDAGEM SM-01**
OBJETO: Relatório fotográfico dos testemunhos amostrados a partir de sondagem rotativa realizada na área da Curva da Santa, BR-376 km 699+900, Guaratuba - PR.	
Obra: APL-20	
Relatório Fotográfico	



Figura 01 - Foto das amostras da sondagem SM-01 - Caixa 01.

FUGRO	RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DE SONDAGEM ROTATIVA
CLIENTE: AUTOPISTA LITORAL SUL	**SONDAGEM SM-01A**
OBJETO: Relatório fotográfico dos testemunhos amostrados a partir de sondagem rotativa realizada na área da Curva da Santa, BR-376 km 699+900, Guaratuba - PR.	
Obra: APL-20	
Relatório Fotográfico	



Figura 01 - Foto das amostras da sondagem SM-01A - Caixa 01.

FUGRO	RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DE SONDAGEM ROTATIVA
CLIENTE: AUTOPISTA LITORAL SUL	**SONDAGEM SM-01A**
OBJETO: Relatório fotográfico dos testemunhos amostrados a partir de sondagem rotativa realizada na área da Curva da Santa, BR-376 km 699+900, Guaratuba - PR.	
Obra: APL-20	
Relatório Fotográfico	



Figura 02 - Foto das amostras da sondagem SM-01A - Caixa 02.

FUGRO	RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DE SONDAGEM ROTATIVA
CLIENTE: AUTOPISTA LITORAL SUL	**SONDAGEM SM-02**
OBJETO: Relatório fotográfico dos testemunhos amostrados a partir de sondagem rotativa realizada na área da Curva da Santa, BR-376 km 699+900, Guaratuba - PR.	
Obra: APL-20	
Relatório Fotográfico	



Figura 01 - Foto das amostras da sondagem SM-02 - Caixa 01.

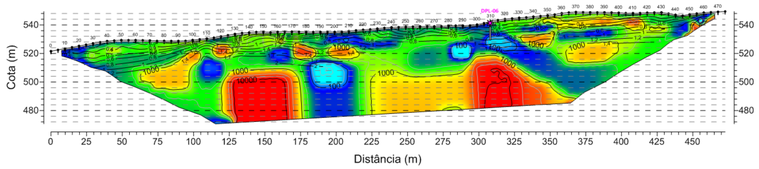
FUGRO	RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DE SONDAGEM ROTATIVA
CLIENTE: AUTOPISTA LITORAL SUL	**SONDAGEM SM-02**
OBJETO: Relatório fotográfico dos testemunhos amostrados a partir de sondagem rotativa realizada na área da Curva da Santa, BR-376 km 699+900, Guaratuba - PR.	
Obra: APL-20	
Relatório Fotográfico	



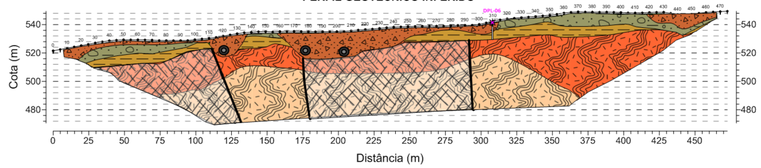
Figura 02 - Foto das amostras da sondagem SM-02 - Caixa 02.

APÊNDICE 18 – Modelos geotécnicos

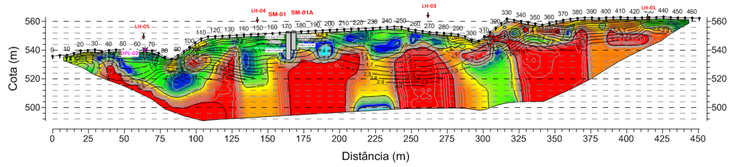
MODELO GEOTÉCNICO LINHA LV-01
ELETORRESISTIVIDADE E SÍSMICA DE REFRAÇÃO



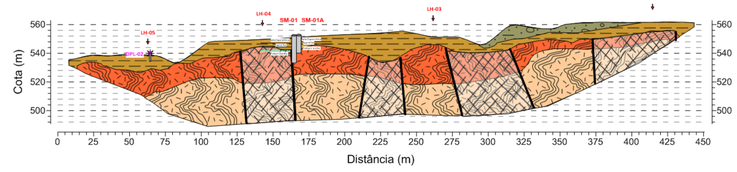
PERFIL GEOTÉCNICO INFERIDO



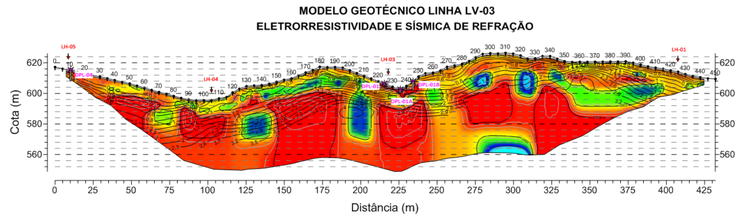
MODELO GEOTÉCNICO LINHA LV-02
ELETORRESISTIVIDADE E SÍSMICA DE REFRAÇÃO



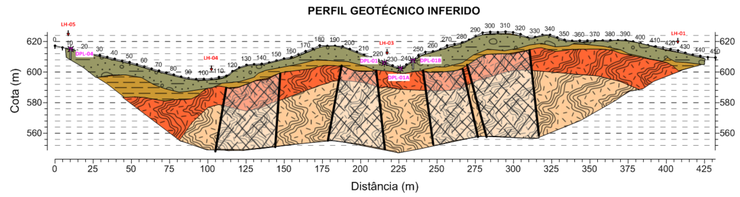
PERFIL GEOTÉCNICO INFERIDO



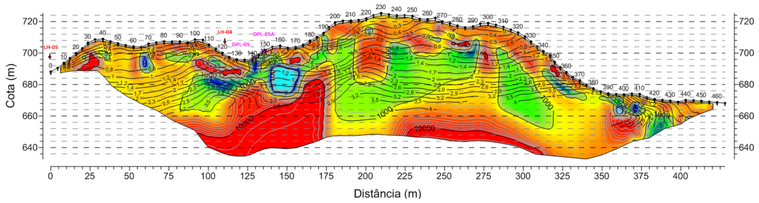
MODELO GEOTÉCNICO LINHA LV-03
ELETORRESISTIVIDADE E SÍSMICA DE REFRAÇÃO



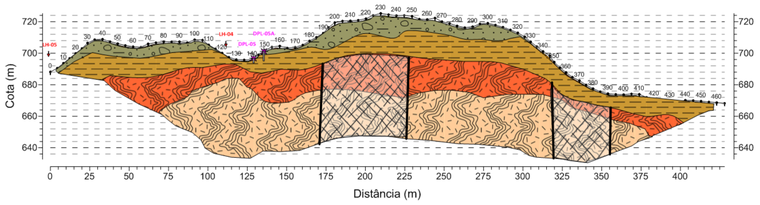
PERFIL GEOTÉCNICO INFERIDO



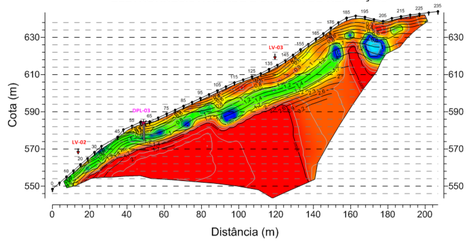
MODELO GEOTÉCNICO LINHA LV-04
ELETORRESISTIVIDADE E SÍSMICA DE REFRAÇÃO



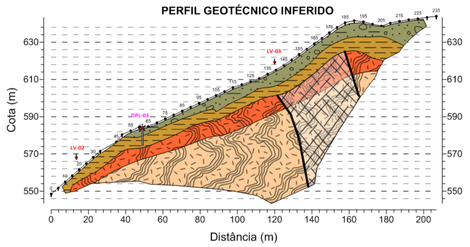
PERFIL GEOTÉCNICO INFERIDO



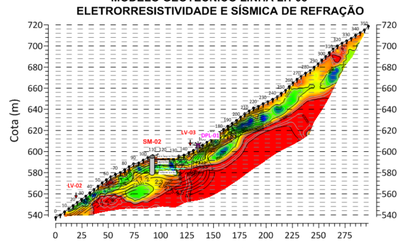
MODELO GEOTÉCNICO LINHA LH-01
ELETORRESISTIVIDADE E SÍSMICA DE REFRAÇÃO



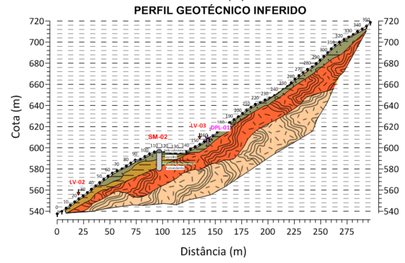
PERFIL GEOTÉCNICO INFERIDO

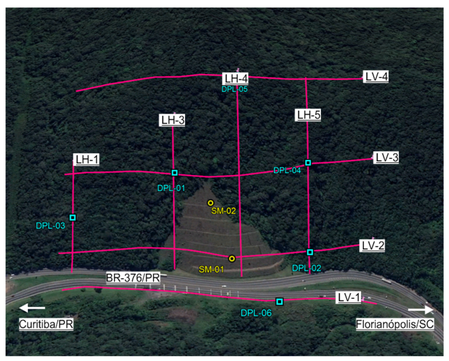


MODELO GEOTÉCNICO LINHA LH-03
ELETORRESISTIVIDADE E SÍSMICA DE REFRAÇÃO

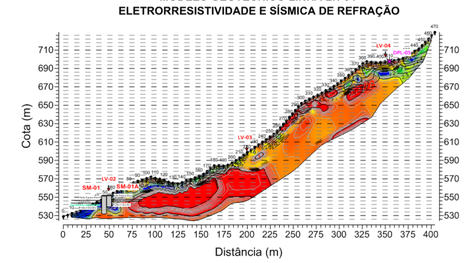


PERFIL GEOTÉCNICO INFERIDO

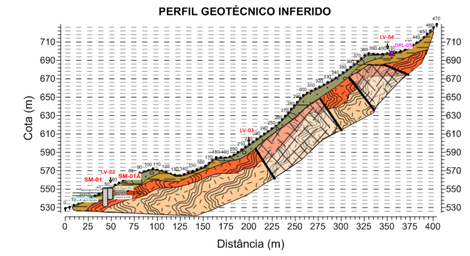




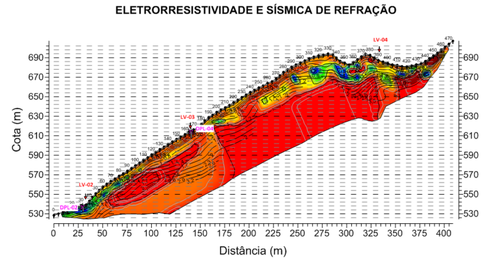
MODELO GEOTÉCNICO LINHA LH-04
ELETORRESISTIVIDADE E SÍSMICA DE REFRAÇÃO



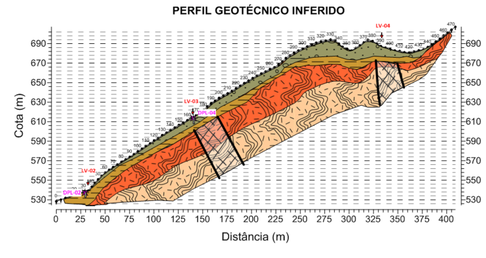
PERFIL GEOTÉCNICO INFERIDO



MODELO GEOTÉCNICO LINHA LH-05
ELETORRESISTIVIDADE E SÍSMICA DE REFRAÇÃO



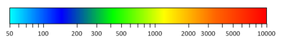
PERFIL GEOTÉCNICO INFERIDO



Legenda

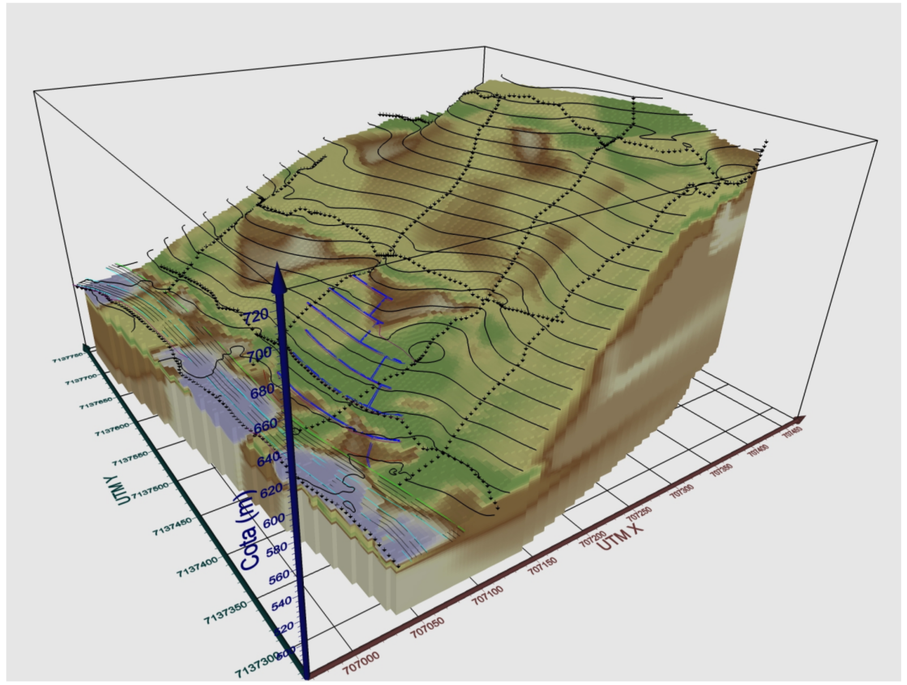
- SM-XX - Sondagem existente
- DPL-XX - Sondagem DPL existente
- NA inferido
- Cota topográfica na data da aquisição
- Posição dos pontos de leitura
- Anomalia de baixa resistividade
- Anomalia de alta resistividade
- Descontinuidade inferida
- Bueiro de Greide
- Solo residual
- Saprolito
- Protomilonito muito alterado
- Protomilonito pouco alterado
- Depósito de colúvio/tálus inferida
- Provável maciço com alto grau de fraturamento/intrusão subvertical
- Aterro inferido

Resistividade (Ohm.m)

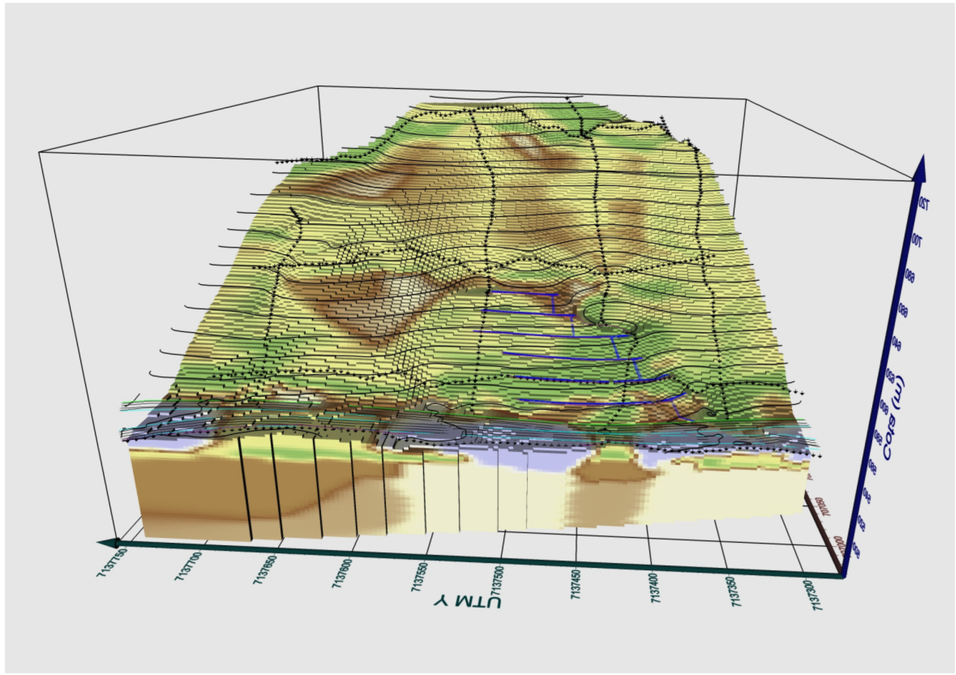


APÊNDICE 19 – Modelo geotécnico tridimensional

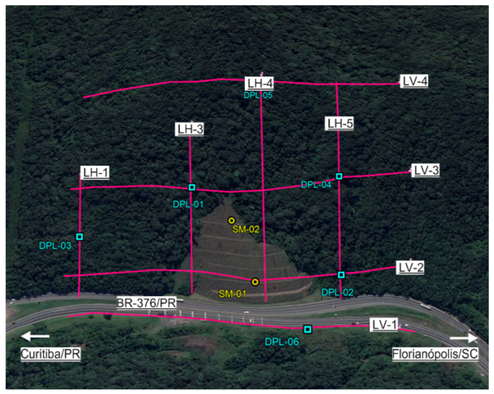
MODELO GEOTÉCNICO TRIDIMENSIONAL
Vista Geral



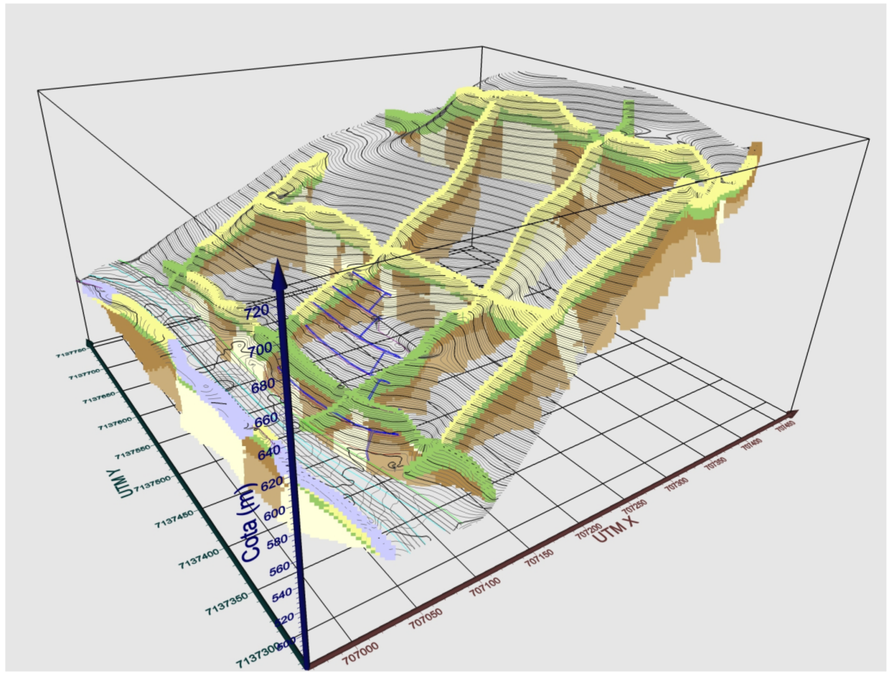
MODELO GEOTÉCNICO TRIDIMENSIONAL
Vista Frontal da Face do Talude com Zona de Talus



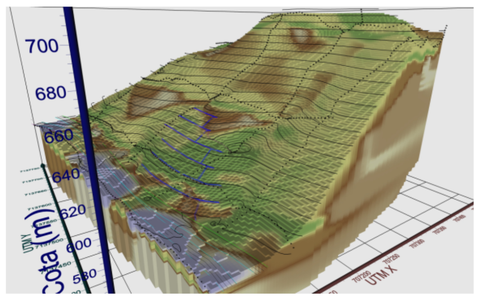
- Aterro
- Zona de fraturamento/intrusão
- Rocha pouco alterada a rocha sã
- Rocha extremamente alterada
- Tálus
- Solo

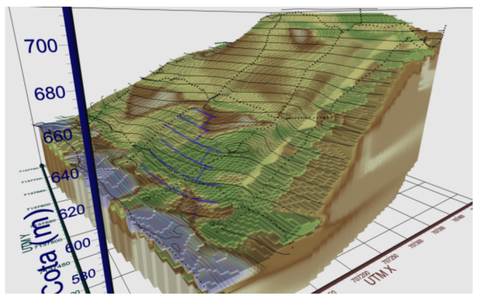


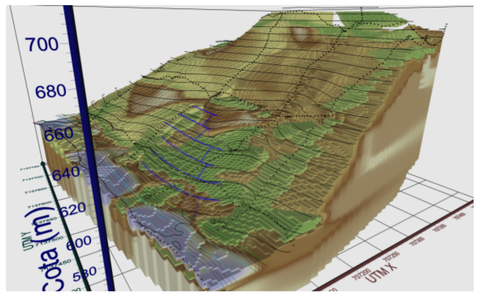
PROJEÇÕES TRIDIMENSIONAIS - MODELO GERAL

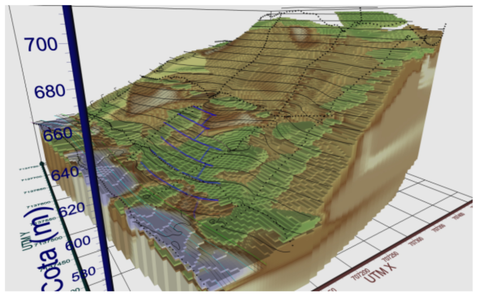


MODELO GEOTÉCNICO TRIDIMENSIONAL
Vista Geral - Remoção da Zona de Talus

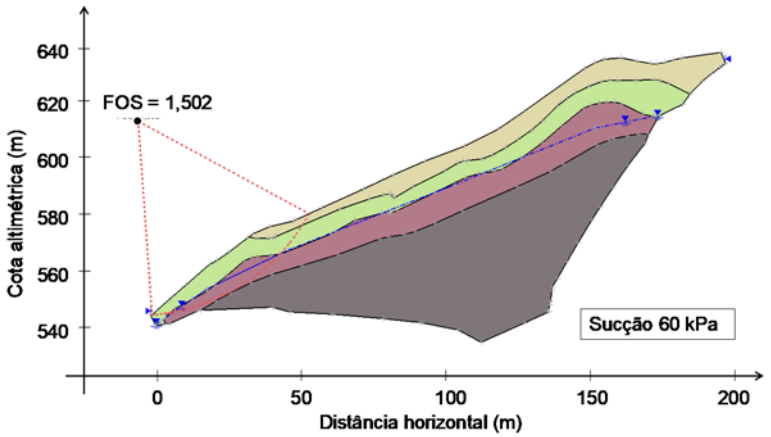


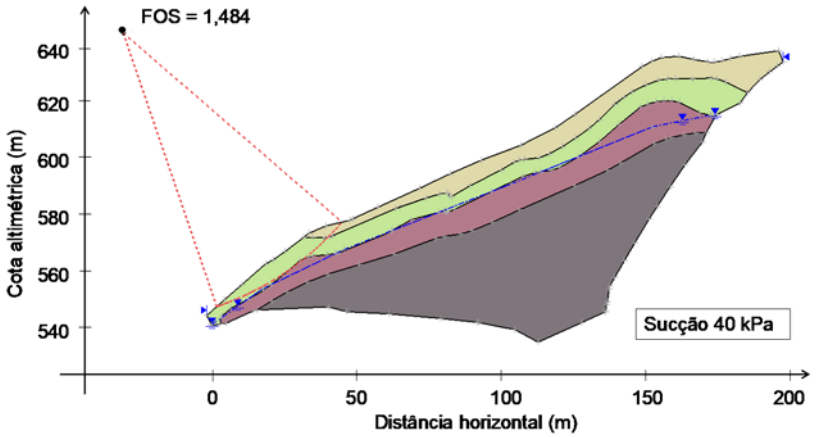


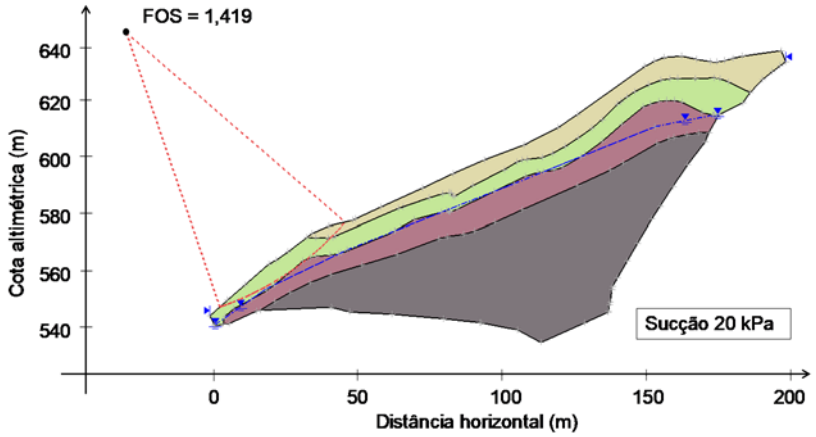




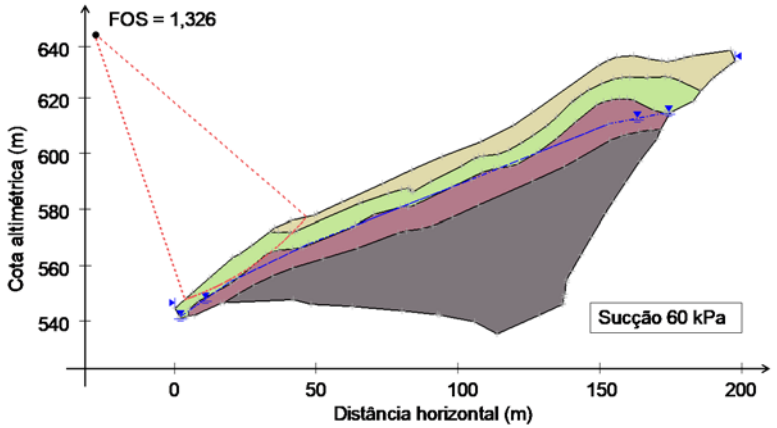
APÊNDICE 20 – Análises de estabilidade

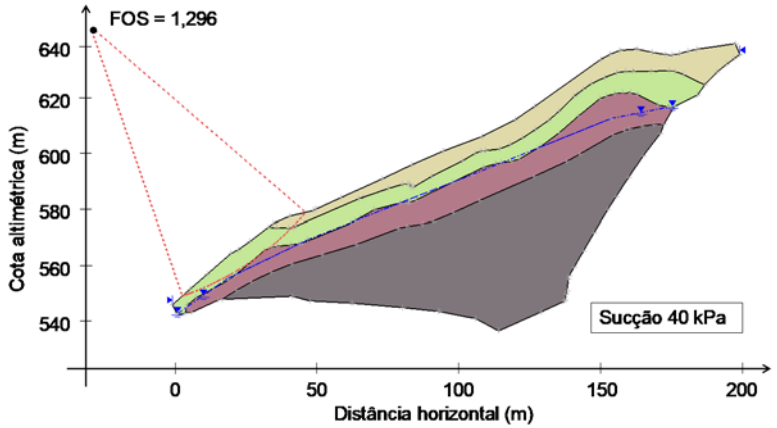


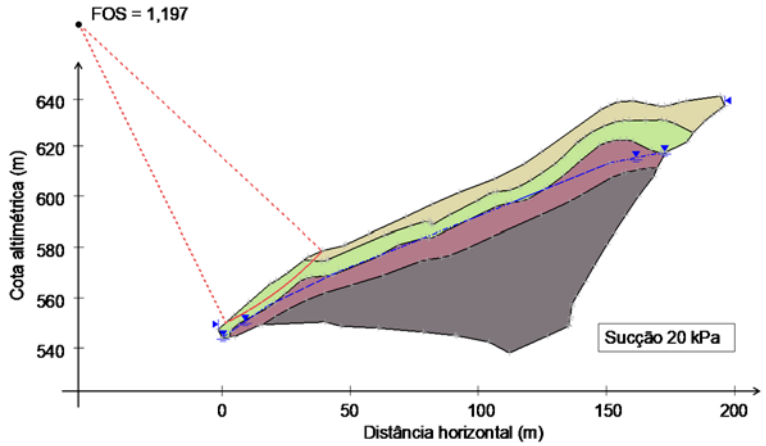




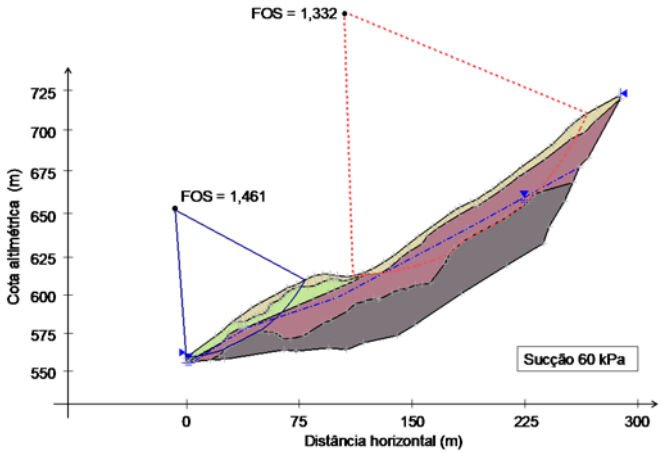
Análises de estabilidade linha LH-01 limite superior

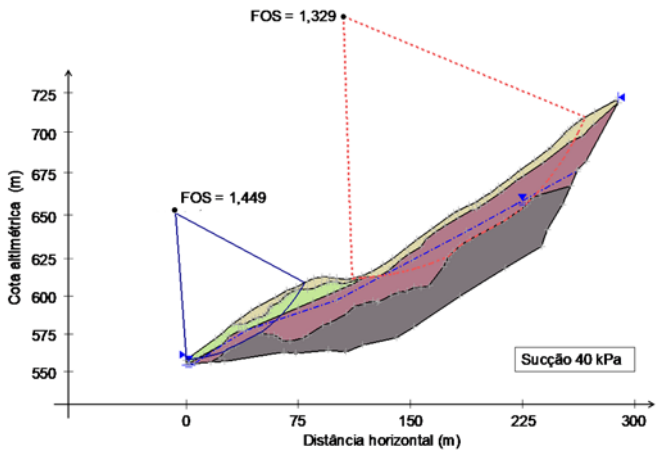


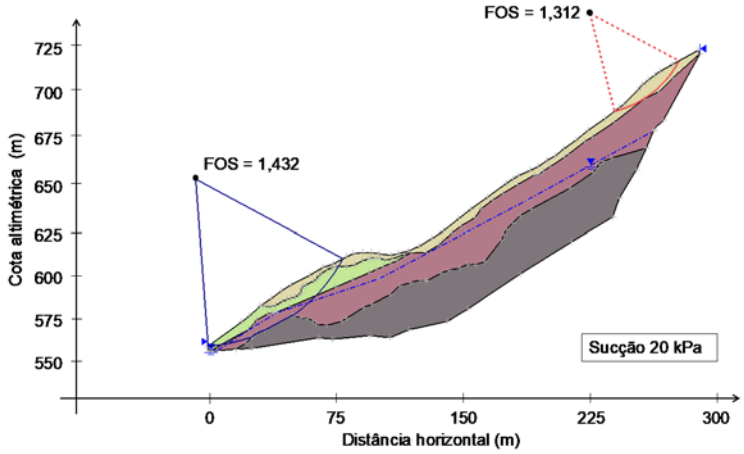




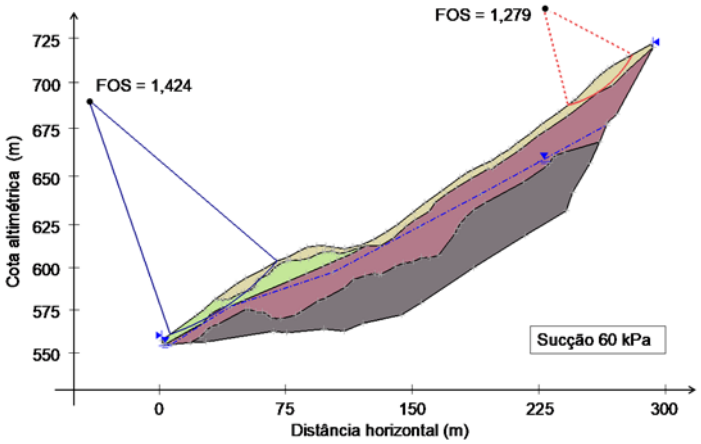
Análise de estabilidade linha LH-01 limite inferior

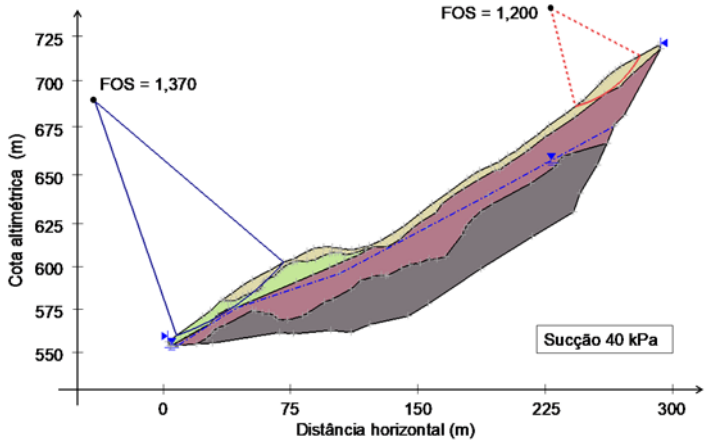


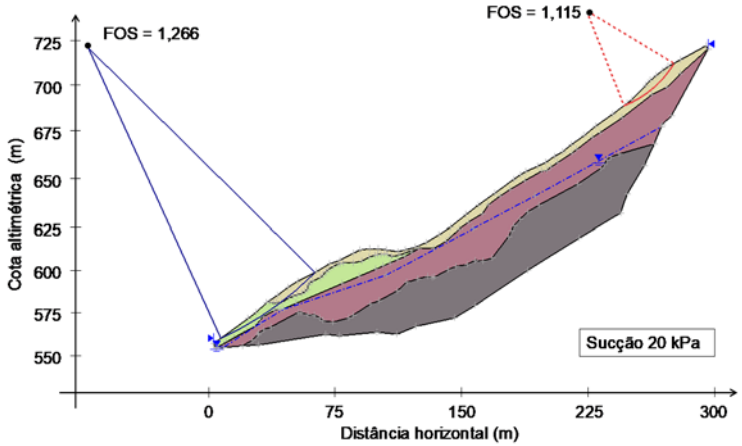




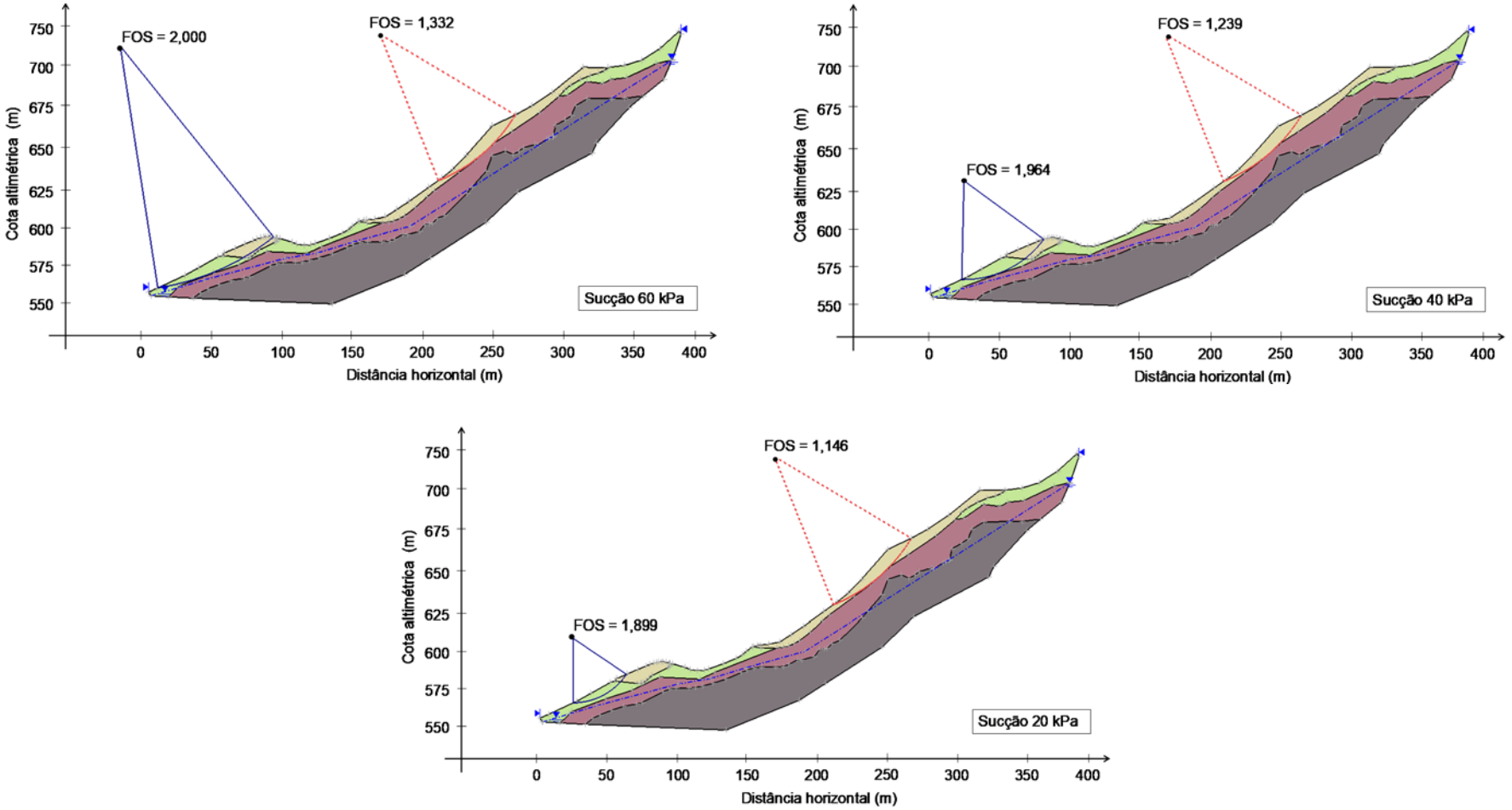
Análise de estabilidade linha LH-03 limite superior



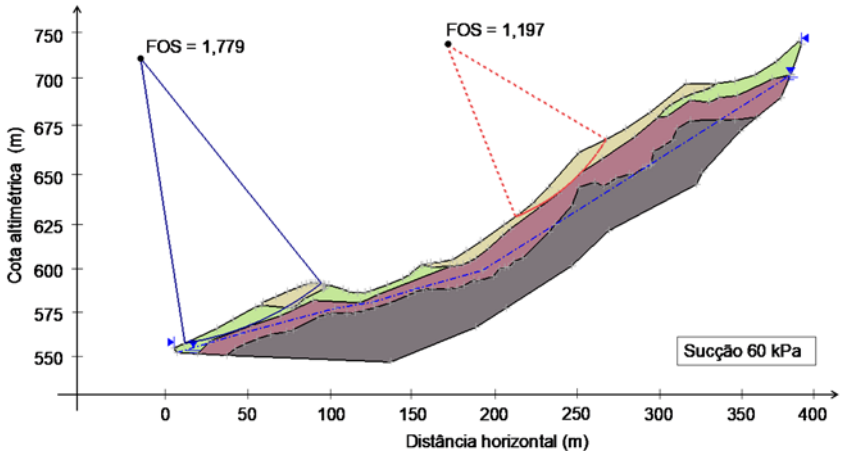


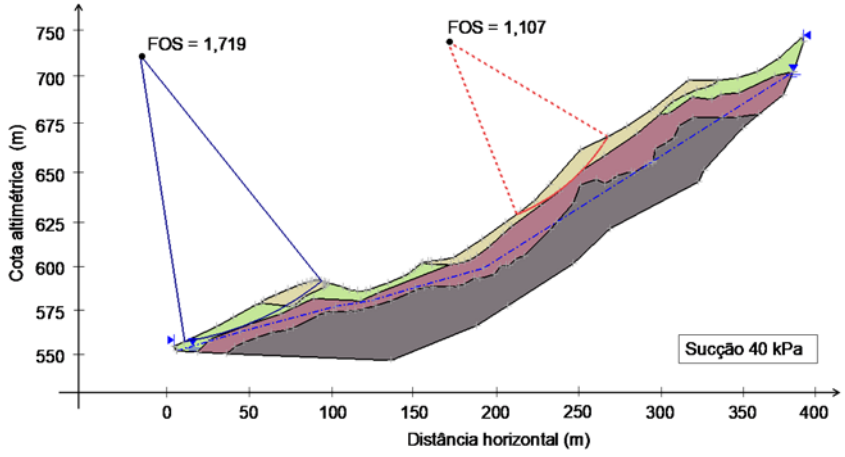


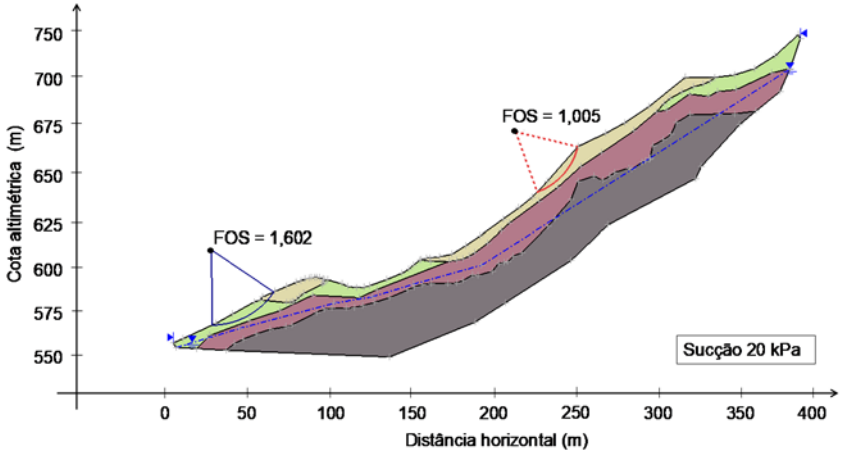
Análise de estabilidade linha LH-03 limite inferior



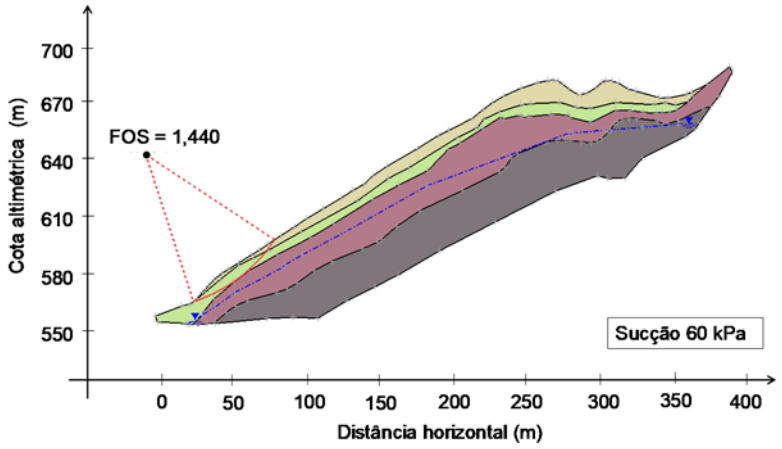
Análise de estabilidade linha LH-04 limite superior

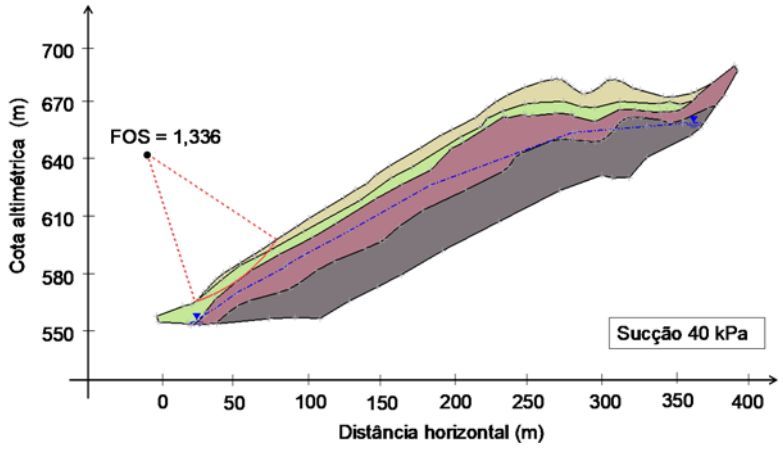


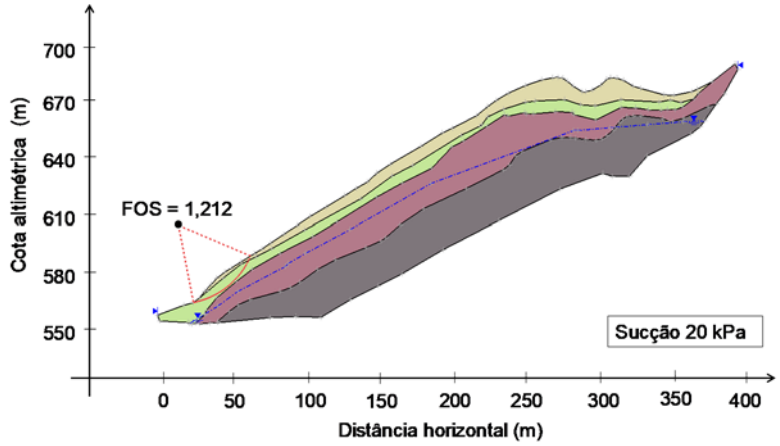




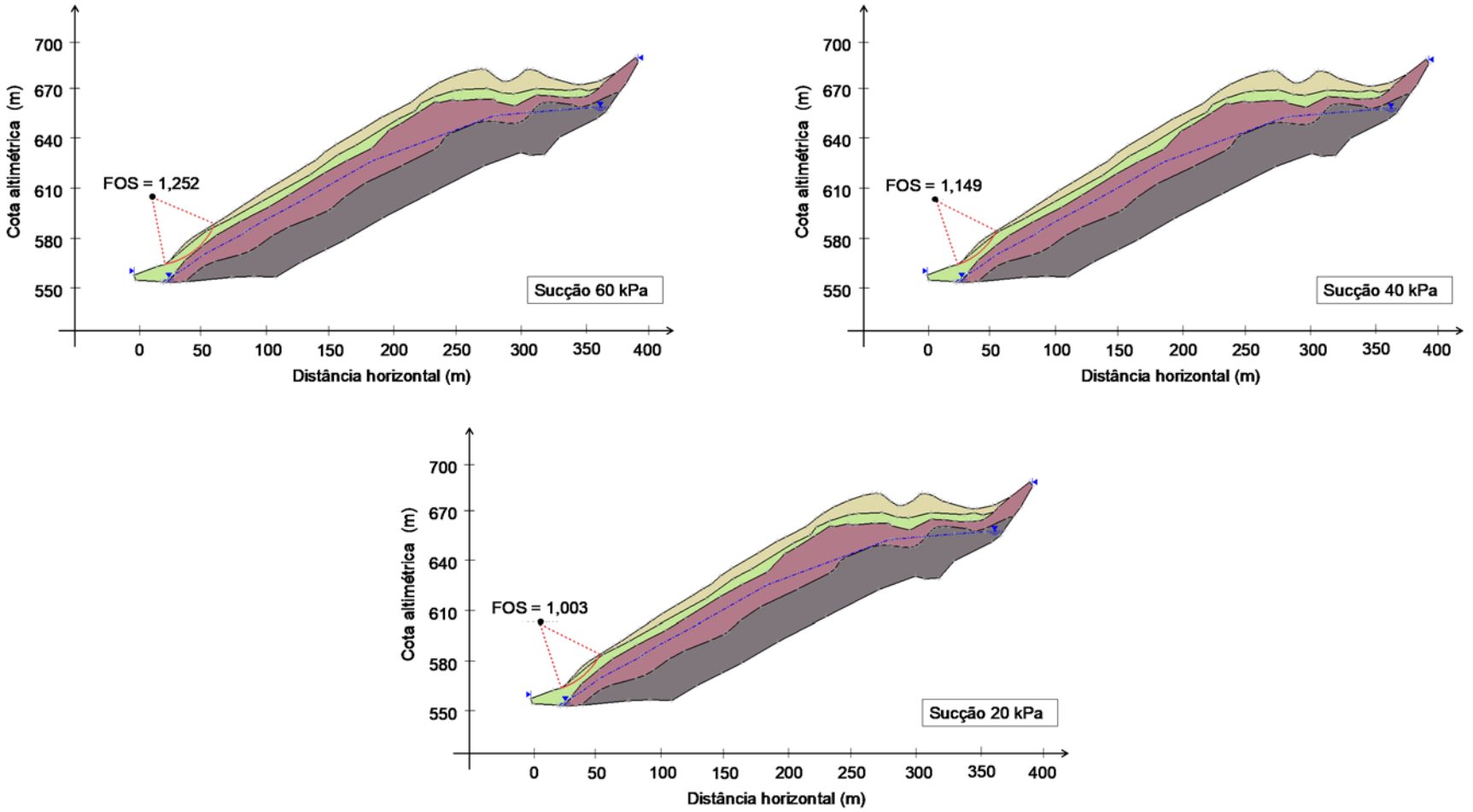
Análise de estabilidade linha LH-04 limite inferior







Análise de estabilidade linha LH-05 limite superior



Análise de estabilidade linha LH-05 limite inferior