



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

WILSON RAMOS ARAGÃO JÚNIOR

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TALUDES DE ATERRO ESTABILIZADOS
COM ESTRUTURA DE CONTENÇÃO EM VIGAS ATIRANTADAS E DRENAGEM
SUB-HORIZONTAL PROFUNDA – PERNAMBUCO, BRASIL**

Recife

2022

WILSON RAMOS ARAGÃO JÚNIOR

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TALUDES DE ATERRO ESTABILIZADOS
COM ESTRUTURA DE CONTENÇÃO EM VIGAS ATIRANTADAS E DRENAGEM
SUB-HORIZONTAL PROFUNDA – PERNAMBUCO, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecária Rosineide Mesquita G. Luz, CRB-4 / 1361

A659a Aragão Júnior, Wilson Ramos.
Análise do comportamento de taludes de aterro estabilizados com estrutura de contenção em vigas atirantadas e drenagem sub-horizontal profunda - Pernambuco, Brasil /Wilson Ramos Aragão Júnior - 2022.
240 folhas.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Aterro. 3. Estabilização. 4. Instrumentação.
5. Monitoramento. I. Coutinho, Roberto Quental (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-65

WILSON RAMOS ARAGÃO JÚNIOR

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TALUDES DE ATERRO ESTABILIZADOS
COM ESTRUTURA DE CONTENÇÃO EM VIGAS ATIRANTADAS E DRENAGEM
SUB-HORIZONTAL PROFUNDA – PERNAMBUCO, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 21/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Mauricio Ehrlich, (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Ricardo Nascimento Flores Severo, (Examinador Externo)
Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Dedico esse trabalho a Deus, minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pelo seu infinito amor e por cada bênção concedida.

Aos meus pais, Angélica e Wilson, aos meus irmãos, Andressa, Wanderson e João Paulo, ao meu sobrinho Lucas e a toda minha família pelos incentivos, pelo carinho, pelo amor e pela compreensão nas ausências.

Ao Professor Dr. Roberto Quental Coutinho pela orientação e pelo apoio, que foram essenciais para o sucesso deste trabalho. Obrigado pela oportunidade de participar da equipe multidisciplinar do GEGEP.

Aos professores Mauricio Ehrlich e Ricardo Nascimento Flores Severo, pelas sugestões e aceitação em participar da banca examinadora.

Aos amigos do GEGEP – Hanna Falcão, Júlia Pontes, Jailson Alves, Marcella Fernandes, Carlos Assis, Ana Cláudia Calado, Cidney Vieira, Carlla de Andrade, Danisete Souza Neto, Rosane Delfino, Felipe Tenório, Bruno Passos, Bruno Moraes, Ana Karine Dantas, Hugo Henrique, Pedro Gomes, Iran Lima, Karollyne Xavier, Prof. Robson Lima – pelo convívio, pelos momentos de descontração e aprendizado ao longo desses últimos anos.

Aos amigos que a pós-graduação e a mudança para Recife me oportunizaram – Flávio Guedes, Laryssa Teti, Ivan Santos Júnior, Rebecca Agra, Italcy Oliveira Júnior, Alice Albuquerque, Camila Tavares, Mikhael Ferreira – por tornarem essa caminhada mais leve.

A todos que integram o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFPE, em especial aos professores da área de Geotecnia pelos ensinamentos e à secretaria – Claudiana Pereira, Andrea Negromonte e Cleide Marques – pela atenção e suporte.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela bolsa de mestrado.

Às Empresas Rincen BTP Brasil, DO VAL Engenharia Consultiva e LPC Latina, por disponibilizarem os relatórios, os quais puderam ser analisados, interpretados e debatidos nesta dissertação.

E a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O presente estudo analisou estudar o comportamento de uma obra de estabilização de talude de aterro com estrutura de contenção em vigas atirantadas e drenagem sub-horizontal profunda. Os taludes foram construídos com solos sedimentares da Formação Barreiras com altura máxima de 27,50 m e inclinação de 1V:1,5H, localizado na Região Metropolitana do Recife. As propriedades geotécnicas dos materiais do aterro foram determinadas a partir de uma ampla investigação de campo e laboratório. A análise de estabilidade do aterro com os parâmetros obtidos da campanha experimental apresentou Fator de Segurança próximo a 1. Em paralelo, a instrumentação dos aterros, por meio de inclinômetros, apontou para uma movimentação constante ao longo do tempo. Assim, constatou-se a necessidade de estabilização estrutural dos aterros. A solução adotada foi através de estrutura de contenção em vigas atirantadas e drenos sub-horizontal profundos. A quantidade de linhas de tirantes por talude variou entre duas e quatro, tendo espaçamento horizontal de 2,40 m entre tirantes e executados com inclinação de 45º a face do talude. A carga do tirante foi transmitida ao maciço através de vigas de concreto armado (1,70 x 0,40 x 14,40 m). A drenagem sub-horizontal profunda (DHP) foi excetuada em duas linhas com espaçamento horizontal de 4,80 m e inclinação de 5º ou 3º. No total foram executados 451 tirantes. Destaca-se que durante a obra foram realizadas modificações no projeto, sendo retiradas algumas linhas de tirantes e executando uma solução em estaca prancha no trecho de um dos aterros. O programa de monitoramento implantado no decorrer da execução da obra contou com instrumentos para acompanhamento dos deslocamentos verticais em superfície (27 marcos superficiais), deslocamentos horizontais em profundidade (15 inclinômetros), nível d'água do maciço (6 medidores de nível d'água), poropressão no ponto instalado (5 piezômetros) e carga nos tirantes (7 células de carga). De maneira geral, verificou-se que, após a implantação da estrutura de contenção, houve uma tendência à estabilização do movimento, notada pela redução da velocidade dos deslocamentos.

Palavras-chave: aterro; estabilização; instrumentação; monitoramento.

ABSTRACT

The general objective of this paper was to study the behavior of an embankment slope stabilization with a retaining structure in cable-stayed beams and deep sub-horizontal drainage. The slopes were built with sedimentary soils from the Barreiras formation with a maximum height of 27.50 m and an inclination of 1V:1.5H, located in the Metropolitan Region of Recife, Pernambuco-Brazil. The geotechnical properties of the embankment materials were determined from extensive field and laboratory investigations. The stability analysis of the embankment with the parameters obtained from the experimental campaign showed a Safety Factor close to 1. Besides, the instrumentation of the Embankments, using inclinometers, pointed to a constant movement over time. Therefore, the need for structural stabilization of the Embankments was verified. The solution adopted was through a retaining structure in cable-stayed beams and deep sub-horizontal drains. The number of rows of tie rods per slope varied between two and four, with a horizontal spacing of 2.40 m between tie rods and executed with an inclination of 45° to the face of the slope. The load of the tie was transmitted to the massif through reinforced concrete beams (1.70 x 0.40 x 14.40 m). The sub-horizontal drainage (DHP) was executed in two lines with a horizontal spacing of 4.80 meters and an inclination of 5° or 3°. In total, 451 tie rods were executed. It is noteworthy that during the building, modifications were made to the project, with some lines of tie rods being removed and a sheet pile solution being carried out in the stretch of one of the embankments. The monitoring program implemented during the execution of the building had instruments for monitoring the vertical displacements on the surface (27 superficial landmarks), horizontal displacements in depth (15 inclinometers), water level of the massif (6 water level meters), pore pressure at the installed point (5 piezometers) and load on the tie rods (7 load cells). In general, it was found that, after the implementation of the containment structure, there was a tendency to stabilize the movement, noted by the reduction in the speed of displacements.

Keywords: embankment; stabilization; instrumentation; monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais itens que compõem um talude.	25
Figura 2 – Pluviômetro Ville de Paris.	35
Figura 3 – Seção esquemática de um piezômetro do tipo Casagrande.....	36
Figura 4 – Sequência de instalação de um piezômetro Casagrande.....	37
Figura 5 – Medidor de nível d’água.	38
Figura 6 – Diferença de leituras entre PZ e MNA instalados em um solo submetido a um fluxo em regime permanente.	39
Figura 7 – Tipos de células de tensão total: (a) diafragma; (b) hidráulica.	40
Figura 8 – Desenho esquemático do funcionamento do inclinômetro.....	43
Figura 9 – Mapa de Localização da área de Estudo.....	44
Figura 10 – Modelo Digital do Terreno – topografia do terreno natural.....	45
Figura 11 – Modelo Digital do Terreno – topografia após conclusão dos aterros.	46
Figura 12 – Trincas em alvenarias.	47
Figura 13 – Trincas de cisalhamento no pavimento de concreto.	47
Figura 14 – Rachadura no solo.	47
Figura 15 – Localizações dos aterros.....	48
Figura 16 – Linha do tempo do caso estudado.....	49
Figura 17 – Programa de investigação para caracterização geotécnica da área de estudo.	53
Figura 18 – Posição Inicial do Inclinômetro no tubo, sendo a roda alta no sentido do talude (A0 - Positivo).	64
Figura 19 – Orientação do torpedo no tubo guia.	64
Figura 20 – Definição do nível de referência para as leituras.	65
Figura 21 – Comparação hipotética entre a 1° Leitura e Leitura de Referência.....	66
Figura 22 – Posição de instalação dos inclinômetros antes da execução da obra. ..	67
Figura 23 – Resultados do inclinômetro I-1.....	70
Figura 24 – Resultados do inclinômetro I-2.....	71
Figura 25 – Resultados do inclinômetro I-3.....	73
Figura 26 – Resultados do inclinômetro I-4.....	74
Figura 27 – Deslocamento horizontal máximo e velocidade para o I-1.....	77
Figura 28 – Ângulo de inclinação em relação a vertical para o inclinômetro I-1.	77
Figura 29 – Deslocamento horizontal máximo e velocidade para o I-2.....	78

Figura 30 – Ângulo de inclinação em relação a vertical para o inclinômetro I-2.	78
Figura 31 – Deslocamento horizontal máximo e velocidade para o I-3.....	80
Figura 32 – Ângulo de inclinação em relação a vertical para o inclinômetro I-3.	80
Figura 33 – Deslocamento horizontal máximo e velocidade para o I-4.....	81
Figura 34 – Ângulo de inclinação em relação a vertical para o inclinômetro I-4.	81
Figura 35 – Evolução temporal e espacial dos vetores resultados em diferentes profundidades para o Aterro 1.....	84
Figura 36 – Evolução temporal e espacial dos vetores resultados em diferentes profundidades para o Aterro 2.....	86
Figura 37 – Precipitação diária no pluviômetro instalado no local da obra.	87
Figura 38 – Geometria adotada no método de Culmann.....	88
Figura 39 – Linhas de tirantes previstas no Projeto de Estabilização.....	90
Figura 40 – Vista frontal da solução adotada.	90
Figura 41 – Ilustração de uma seção tipo – tirantes.....	91
Figura 42 – Ilustração de uma seção tipo – DHP.....	91
Figura 43 – Detalhe do dreno sub-horizontal profundo.....	92
Figura 44 – Detalhe da execução das vigas e tirantes.....	93
Figura 45 – Vista da ancoragem.....	93
Figura 46 – Vista da Estabilização executada na Região do Aterro 1 (Área B, C e C').	94
Figura 47 – Linhas de tirantes executadas (As Built).....	95
Figura 48 – Esquema de realização do ensaio PIT.....	97
Figura 49 – Curva V/F em função da frequência.....	98
Figura 50 – Curva V/F em função da frequência.....	98
Figura 51 – Curva V/F em função da frequência.....	99
Figura 52 – Localização dos ensaios de impedância mecânica.....	100
Figura 53 – Aplicação do golpe.....	100
Figura 54 – Rigidez dinâmica tirantes da VIGA 1B-V.....	102
Figura 55 – Rigidez dinâmica tirantes da VIGA 1C-III.....	103
Figura 56 – Rigidez dinâmica tirantes da VIGA 2C-IV.....	103
Figura 57 – Rigidez dinâmica todos os tirantes.....	103
Figura 58 – Raiz quadrada da Rigidez dinâmica vs tensão no tirante.....	104
Figura 59 – Localização das áreas e seções instrumentadas durante e após a obra de estabilização.....	108

Figura 60 – Instrumentos utilizados durante e após a obra de estabilização.	110
Figura 61 – Localização dos pluviômetros.	115
Figura 62 – Precipitação acumulada anual em mm.	116
Figura 63 – Dados de precipitação mensal de 2015 a 2021 e respectiva média mensal representativas dos anos analisados.	117
Figura 64 – Precipitação diária e acumulada (mm) vs tempo.	117
Figura 65 – Comparativo entre as leituras do do pluviômetro Alto do Céu e o instalado na obra pelo GEGEP.	118
Figura 66 – Localização dos medidores de nível d'água.	119
Figura 67 – Indicação das leituras realizadas nos medidores de nível d'água.	120
Figura 68 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção A1.	123
Figura 69 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção B1.	124
Figura 70 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção C1.	125
Figura 71 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção C2.	126
Figura 72 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção C3.	127
Figura 73 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção D2.	128
Figura 74 – Localização dos piezômetros de Casagrande.	129
Figura 75 – Indicação das leituras realizadas nos piezômetros.	130
Figura 76 – Resultado do piezômetro da Seção B1.	133
Figura 77 – Resultado do piezômetro da Seção C1.	134
Figura 78 – Resultado do piezômetro da Seção C2.	135
Figura 79 – Resultado do piezômetro da Seção C3.	136
Figura 80 – Resultado do piezômetro da Seção D2.	137
Figura 81 – Localização dos Marcos Superficiais e posição das seções de estudo.	138
Figura 82 – Indicação das leituras realizadas nos marcos superficiais.	139
Figura 83 – Resultados dos deslocamentos verticais e da velocidade para seção A1.	141
Figura 84 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção A1.	143
Figura 85 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção A1.	144
Figura 86 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção B1.	146

Figura 87 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção B1.	148
Figura 88 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção B1.	149
Figura 89 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C1.	151
Figura 90 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção C1.	153
Figura 91 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção C1.	154
Figura 92 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C2.	156
Figura 93 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção C2.	158
Figura 94 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção C2.	159
Figura 95 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C3.	161
Figura 96 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção C3.	163
Figura 97 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção C3.	164
Figura 98 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C'1.	166
Figura 99 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção C'1.	168
Figura 100 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção C'1.	169
Figura 101 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção D1.	172
Figura 102 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção D1.	173
Figura 103 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção D1.	174
Figura 104 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção D2.	177
Figura 105 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção D2.	178
Figura 106 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção D2.	179

Figura 107 – Evolução temporal e espacial do deslocamento vertical do Aterro 1 (Parte 1).	183
Figura 108 – Evolução temporal e espacial do deslocamento vertical do Aterro 1 (Parte 2).	184
Figura 109 – Evolução temporal e espacial do deslocamento vertical do Aterro 2.	187
Figura 110 – Localização dos inclinômetros.....	188
Figura 111 – Indicação das leituras realizadas nos inclinômetros.	189
Figura 112 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro A1.1.	191
Figura 113 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro B1.1.	192
Figura 114 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro B1.2.	193
Figura 115 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C1.1.	195
Figura 116 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C1.2.	196
Figura 117 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C1.3.	197
Figura 118 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C2.1.	201
Figura 119 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C2.2.	202
Figura 120 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C3.1.	203
Figura 121 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C3.2.	204
Figura 122 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro D1.1.	208
Figura 123 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro D1.2.	209
Figura 124 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro D2.1.	210
Figura 125 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro D2.2.	211
Figura 126 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro D2.3.	212
Figura 127 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção A1.	214
Figura 128 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção B1.	216
Figura 129 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C1.	218
Figura 130 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C2.	220
Figura 131 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C3.	222
Figura 132 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção D1.	224
Figura 133 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção D2.	226
Figura 134 – Localização dos tirantes instrumentados com células de carga.	227
Figura 135 – Resultado das células de carga nos tirantes da Área B.....	228
Figura 136 – Resultado das células de carga nos tirantes da Área C.	229
Figura 137 – Resultado das células de carga nos tirantes da Área D.	229

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos movimentos de encosta mais comuns.	27
Quadro 2 – Tipos de obras de estabilização de encostas.	29
Quadro 3 – Principais métodos de monitoramento superficial.....	41
Quadro 4 – Etapas do caso estudado.	48
Quadro 5 – Datas de leituras dos instrumentos.....	67
Quadro 6 – Registro da ocorrência nos Inclinômetros durante a última tentativa de leitura.	68
Quadro 7 – Cota e profundidade de deslocamento máximo analisada.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo da distribuição dos blocos na área de estudo.....	52
Tabela 2 – Valores da permeabilidade (K_{fs}), potencial mátrico de fluxo do solo (φ_m), umidade inicial e final para região do Aterro.....	54
Tabela 3 – Valores da permeabilidade (K_{fs}), potencial mátrico de fluxo do solo (φ_m), umidade inicial e final para região do Terreno Natural.....	55
Tabela 4 – Composição granulométrica do solo – Blocos.....	55
Tabela 5 – Densidade real dos grãos, limites de consistências e classificação SUCS – Blocos.....	56
Tabela 6 – Composição granulométrica do solo – Janelas.....	56
Tabela 7 – Composição granulométrica do solo, limites de consistências e classificação SUCS – Janelas.....	56
Tabela 8 – Resumo dos resultados de compactação.....	57
Tabela 9 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Bloco 1, 2 e 3.	58
Tabela 10 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Bloco 4, 5 e 6.	58
Tabela 11 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Bloco 7, 8 e 9.	59
Tabela 12 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Bloco 10 e 11.	59
Tabela 13 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Janela 1 ECAS 139 e Janela 2 ECAS 142.....	60
Tabela 14 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Janela 2 ECAS 145 e Janela 3 ECAS 165.....	60
Tabela 15 – Classificação de colapsibilidade do solo segundo Reginato e Ferrero (1973).....	61
Tabela 16 – Resumo dos ângulos de atritos e coesão.....	62
Tabela 17 – Comprimentos calculados a partir do ensaio.....	101
Tabela 18 – Rigidez dinâmica medida.....	102
Tabela 19 – Tensão calculada de cada tirante.....	105
Tabela 20 – Resultados da instrumentação das células de carga.....	105

Tabela 21 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção A1.	142
Tabela 22 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção B1.	147
Tabela 23 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C1.	152
Tabela 24 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C2.	157
Tabela 25 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C3.	162
Tabela 26 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C'1.	167
Tabela 27 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção D1.	171
Tabela 28 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção D2.	176
Tabela 29 – Análise estatística das interpolações dos deslocamentos verticais do Aterro 1, por meio do ME, RMS e r.	181
Tabela 30 – Análise estatística das interpolações dos deslocamentos verticais do Aterro 2, por meio do ME, RMS e r.	185
Tabela 31 – Resumo dos resultados de deslocamento horizontal resultante para profundidade mais superficial (1m) dos inclinômetros do Aterro 1.	199
Tabela 32 – Resumo dos resultados de deslocamento horizontal resultante para profundidade com maior intensidade dos inclinômetros do Aterro 1.	200
Tabela 33 – Resumo dos resultados de deslocamento horizontal resultante para profundidade mais superficial (1m) dos inclinômetros do Aterro 2.	206
Tabela 34 – Resumo dos resultados de deslocamento horizontal resultante para profundidade com maior intensidade dos inclinômetros do Aterro 2.	207
Tabela 35 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção A1.	213
Tabela 36 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção B1.	215
Tabela 37 - Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C1.	217

Tabela 38 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C2.....	219
Tabela 39 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C3.....	221
Tabela 40 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção D1.....	223
Tabela 41 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção D2.....	225
Tabela 42 – Informações das células de cargas.	227

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	22
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	22
2	MOVIMENTOS DE MASSA: OBRAS DE ESTABILIZAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA.....	24
2.1	ENCOSTA E TALUDE	24
2.2	MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA.....	26
2.3	SOLUÇÃO DE ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES.....	28
2.4	ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO COM ANCORAGENS	30
2.5	ELEMENTOS DRENANTES.....	32
2.6	INSTRUMENTAÇÃO DE OBRAS GEOTÉCNICAS	33
2.6.1	Precipitação	34
2.6.2	Poropressão	35
2.6.3	Nível d'água	37
2.6.4	Tensão.....	39
2.6.5	Deslocamentos.....	40
2.6.5.1	Deslocamento superficial	41
2.6.5.2	Deslocamento em profundidade.....	42
2.6.5.3	Rotação.....	43
3	ÁREA DE ESTUDO	44
3.1	ASPECTOS GERAIS.....	44
3.2	LINHA DO TEMPO DO CASO ESTUDADO	46
4	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA	50
4.1	GEOLOGIA LOCAL.....	50
4.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	51
5	PROGRAMA DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO ANTES DA SOLUÇÃO DE ESTABILIZAÇÃO.....	63
5.1	METODOLOGIA.....	63
5.1.1	Deslocamentos horizontais.....	63
5.1.1.1	Leitura de referência.....	63
5.1.1.2	Leituras de monitoramento.....	64
5.2	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	66

5.2.1	Dados dos inclinômetros.....	66
5.2.1.1	Análise dos deslocamentos horizontais em profundidade	68
5.2.1.1.1	<i>Região Aterro 1</i>	<i>68</i>
5.2.1.1.2	<i>Região Aterro 2</i>	<i>72</i>
5.2.1.2	Análise pontual do deslocamento horizontal resultante máximo ($Y_{m\acute{a}x}$) e ângulo de inclinação com a vertical (θ).....	75
5.2.1.2.1	<i>Região Aterro 1</i>	<i>75</i>
5.2.1.2.2	<i>Região Aterro 2</i>	<i>79</i>
5.2.1.3	Análise da evolução temporal e espacial dos vetores resultantes dos deslocamentos horizontais em diferentes profundidades	82
5.2.1.3.1	<i>Região Aterro 1</i>	<i>82</i>
5.2.1.3.2	<i>Região Aterro 2</i>	<i>85</i>
5.3	DADOS DO PLUVIÔMETRO.....	87
5.4	COMENTÁRIOS FINAIS	87
6	PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO.....	88
6.1	ANÁLISE DA ESTABILIDADE	88
6.2	ESTABILIZAÇÃO DOS TALUDES DE ATERRO.....	89
6.3	AS BUILT	94
7	CONTROLE DE EXECUÇÃO E COMPORTAMENTO.....	96
7.1	METODOLOGIA.....	99
7.2	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	101
7.2.1	Comprimento.....	101
7.2.2	Rigidez dinâmica e tensão.....	101
7.2.2.1	Rigidez dinâmica medida	101
7.2.2.2	Determinação das tensões nos tirantes.....	103
8	PROGRAMA DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DURANTE E APÓS A SOLUÇÃO DE ESTABILIZAÇÃO	106
8.1	METODOLOGIA.....	106
8.1.1	Instrumentação.....	106
8.1.2	Monitoramento	111
8.1.2.1	Mapa da interpolação dos dados dos marcos superficiais	112
8.1.2.1.1	<i>Avaliação da acurácia das interpolações.....</i>	<i>113</i>
8.2	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	115
8.2.1	Dados dos pluviômetros.....	115

8.2.2	Dados dos medidores de nível d'água.....	119
8.2.3	Dados dos piezômetros	129
8.2.4	Dados dos marcos superficiais.....	138
8.2.4.1	Análise dos deslocamentos verticais	140
8.2.4.1.1	<i>Região Aterro 1</i>	140
8.2.4.1.2	<i>Região Aterro 2</i>	170
8.2.4.2	Análise do mapa da evolução temporal e espacial dos deslocamentos verticais	180
8.2.4.2.1	<i>Região Aterro 1</i>	180
8.2.4.2.2	<i>Região Aterro 2</i>	185
8.2.5	Dados dos inclinômetros.....	188
8.2.5.1	Análise dos deslocamentos horizontais em profundidade	190
8.2.5.1.1	<i>Região Aterro 1</i>	190
8.2.5.1.2	<i>Região Aterro 2</i>	205
8.2.5.2	Análise pontual do deslocamento horizontal resultante máximo ($Y_{máx}$)	213
8.2.5.2.1	<i>Região Aterro 1</i>	213
8.2.5.2.2	<i>Região Aterro 2</i>	223
8.2.6	Dados células de carga.....	227
9	CONCLUSÕES.....	230
	REFERÊNCIAS.....	233

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa geológica e geotécnica de uma região é fundamental para o estabelecimento de estudos diversos sobre encostas e taludes. O projeto de engenharia geotécnica leva em consideração informações referentes às forças resistentes e atuantes, condições locais climáticas, hidrológicas, hidrogeológicas, geoestruturais, tectônicas e obras civis. Essas técnicas possuem objetivos específicos, a fim de alcançar a estabilidade de encostas e taludes com eficiência.

O processo de contenção consiste em estabilizar taludes e eliminar a possibilidade de deslizamentos. Assim, a contenção de encostas e taludes se faz necessária, principalmente em locais onde há o risco iminente da ocorrência de desmoronamento, o que pode acarretar em situações de risco.

Os movimentos de terra são processos que atuam na modelagem do relevo terrestre, no qual os escorregamentos translacionais são os de maior frequência dentre as tipologias de movimentos de massa, sendo as superfícies de ruptura tipicamente planares e acompanham descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas dos solos (FERNANDES; AMARAL, 2011; EFFGEN et al., 2020).

Obras de estabilizações de taludes tem como objetivo evitar desastres, principalmente quando localizados onde há circulação de pessoas ou ambientes construídos. As obras de estabilidade de encosta são condicionadas em três fatores principais: por características geométricas, por características geológicas e pelo ambiente fisiográfico, no qual se insere o clima, cobertura vegetal, drenagens naturais, entre outros (OLIVEIRA; BONETTI, 2021).

Movimentos de massa após a realização de obras que envolvam cortes em encostas ou taludes naturais devem ser acompanhados através de investigações geotécnicas. Devido às formas variadas dos taludes, face plana ou curvilínea, podem gerar fluxos preferenciais de água superficial. Dessa forma, é comum perceber encostas que permaneciam estáveis por longos anos sofrerem processos de movimentação, devido fatores que alteraram o estado de tensões da massa, provocando tensões cisalhantes que se igualam à resistência ao cisalhamento do solo (GERSCOVICH, 2016).

Os deslocamentos de solo são corrigidos ou mitigados muitas vezes através de estruturas de contenção, que é garantida através de tirantes ancorados no terreno.

Essas estruturas de contenções ancoradas são mais eficazes e de ganho econômico, quando se trata da segurança do sistema, capazes de suportar elevadas forças horizontais do solo.

O monitoramento ou instrumentação geotécnica pode ser compreendido como o oferecimento de aquisições de dados para obter critérios importantes como: deslocamentos, poropressão, permeabilidade do solo, profundidade do lençol freático, entre tanto outros. De um modo geral, se trata de uma técnica aplicada para mensurar as variedades de tensões e deformações provocadas pela execução de uma obra (GARROUX; LEÃO; BRANDT, 2016). O somatório das tecnologias de informação de terreno de alta precisão, das características físicas e hidrodinâmicas do solo tornam-se importantes ferramentas na previsão de deslizamentos de terra (MELO, 2021).

A RMR possui áreas disponíveis ao desenvolvimento industrial, porém, em algumas áreas, a topografia natural é formada por morros, necessitando grande movimento de massa para viabilizar a obra. Dessa forma, tem-se o município de Itapissuma, localizado na parte norte de Pernambuco, no qual os solos na área de implantação industrial, pertencem a duas unidades geológicas, a Gramame, nas regiões mais baixas e Formação Barreiras nas encostas.

Durante a implantação de aterros com altura elevada podem ocorrer deformações aceitáveis que estejam previstas. Para isso, as técnicas de compactação em campo precisam atingir critérios determinados a partir de ensaios de laboratório e dimensionamentos do projeto. Quando esses parâmetros são negligenciados durante a execução do aterro, impactam em movimentações verticais e horizontais que provocam o surgimento de manifestações patológicas, estando sujeito a evoluir para um deslizamento.

Nesse contexto, a pesquisa apresenta o comportamento de uma obra de estabilização de talude de aterros com estrutura de contenção em vigas ancoradas e drenagem sub-horizontal profunda. O monitoramento deste comportamento foi realizado por meio da instrumentação e monitoramento geotécnico de deslocamentos verticais e horizontais, coluna de água, nível d'água, precipitação e carga nos tirantes.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa foi estudar o comportamento de uma obra de estabilização de talude de aterros com estrutura de contenção em vigas ancoradas e drenagem sub-horizontal profunda, compreendendo as diferentes etapas.

Quanto aos objetivos específicos, têm-se:

- Compreender a movimentação do talude de aterro antes, durante e após a finalização da solução de estabilização, com base nos dados da instrumentação empregada para o monitoramento;
- Analisar conjuntamente os dados de deslocamentos e velocidades; buscando entender a intensidade e mecanismo de movimento de massa;
- Analisar integralmente os dados da instrumentação empregada para o monitoramento durante e após a finalização da solução de estabilização.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para efeito de apresentação, esta dissertação está dividida em 9 capítulos, tendo início por este capítulo introdutório, que situa o leitor na temática e apresenta os objetivos da dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre movimentos de massa, obras de estabilização, instrumentação e monitoramento geotécnico. Esses assuntos são considerados de fundamental importância para o entendimento do tema da dissertação, com objetivo de criar condições necessárias para um melhor aproveitamento do conteúdo exposto neste trabalho.

O capítulo 3 é composto por uma breve caracterização da área de estudo, abordando aspectos gerais e trazendo uma linha do tempo do caso estudado.

No capítulo 4 tem uma breve apresentação da caracterização geológica-geotécnica realizada anteriormente por outros estudos.

O capítulo 5 contempla o programa de monitoramento geotécnico antes da solução de estabilização, apresentando a metodologia, os resultados e discussões obtidos nessa etapa do estudo de caso.

O capítulo 6 apresenta o Projeto de Estabilização realizado pelo Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas Planícies e Desastres (GEGEP), sob a coordenação do Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho, que contemplo a análise da

estabilidade e dimensionamentos da solução de estabilização. Além disso, nesse capítulo tem-se uma breve descrição do as built da obra.

O capítulo 7 é composto pela descrição controle de execução e comportamento da obra de contenção, sendo apresentado a metodologia, os resultados e discussões obtidos nessa etapa do estudo de caso.

No capítulo 8 tem-se o programa de monitoramento geotécnico durante e após a solução de estabilização, sendo apresentado a metodologia, os resultados e discussões obtidos por meio dos pluviômetros, medidores de nível d'água, piezômetros, marcos superficiais, inclinômetros e células de carga

No capítulo 9 é exposto um resumo das principais considerações finais da dissertação.

2 MOVIMENTOS DE MASSA: OBRAS DE ESTABILIZAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

Este capítulo consiste em realizar uma revisão dos trabalhos já existentes sobre o tema. O referencial teórico permite verificar o estado do problema a ser pesquisado, sob o aspecto teórico e de outros estudos e pesquisas já realizados (LAKATOS; MARCONI, 2003).

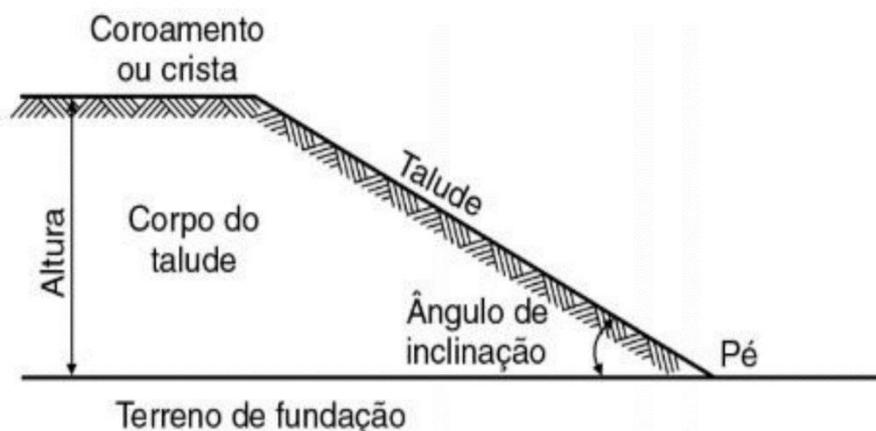
2.1 ENCOSTA E TALUDE

A existência do talude e seus processos de transformação acontecem de forma contínua e ao longo de muito tempo, tais variações, são resultados de interações com o sistema complexo que é o planeta Terra, influenciado pelas ações antrópicas, morfológicas, geomorfológicas e meios de erosão e transporte de partículas. O crescimento acelerado e desordenado da população mundial juntamente com os avanços tecnológicos, fazem aumentar a necessidade de o homem expandir sua área de ocupação e atuação, o que ocasiona uma desordem do espaço físico, isso se não for realizado um estudo geológico coerente e preciso e o que pode consequentemente causar a instabilidade dessas áreas, gerando muitas vezes danos materiais para a vida humana e do meio ambiente (FERNANDES, 2014).

Os taludes são constituídos por diferentes elementos, os quais são descritos a seguir e apresentados na Figura 1 (BASSANELI et al. 2015):

- Crista (ou topo): parte mais alta do talude;
- Pé: parte mais baixa;
- Altura do talude: diferença de cota entre o pé e a crista;
- Ângulo de inclinação: ângulo formado entre a horizontal e a reta; média entre o pé e a crista;
- Maciço ou corpo: parte interna do talude, cuja constituição é estudada por engenheiros e geólogos no que diz respeito ao tipo de material (rocha, argila, areia, silte etc.) e às suas propriedades (limite de plasticidade, coesão etc.)

Figura 1 – Principais itens que compõem um talude.



Fonte: Caputo et al. (2015).

Talude é a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, podendo ser natural, também denominado encosta, ou construído pelo homem, como, por exemplo, os aterros e cortes. Os taludes são formações bastantes comuns em toda a crosta terrestre, conseqüentemente possuem uma diversidade bastante acentuada o que ocasiona uma classificação a partir de alguns critérios, tais como origem e inclinação (geometria) (FONSECA, 2014).

Quanto à sua origem, os taludes podem ser classificados em taludes naturais e artificiais. Os naturais são constituídos por solo residual ou coluvionar e tem sua origem a partir de fenômenos naturais, como por exemplo a ação das placas tectônicas e/ou processos erosivos. Já os taludes artificiais (construídos) são resultados de cortes em encostas, de escavação ou lançamento de aterros, podem estar situados em minas a céu aberto, laterais de ruas e estradas, barragem de reservatório de água, escavações de valas para assentamento de tubulações e, ainda, loteamentos em terrenos em aclave ou declive (MELLO, 2018).

De acordo com a inclinação (geometria), os taludes podem apresentar diferentes formatos, sendo divididos basicamente em dois tipos de face (TORRES, BARROS e CHISSOLUCOMBE, 2018). A face plana são também denominados taludes lineares, sendo muito utilizados à beira de estradas ou em barragens de água/rejeito. A face curvilínea pode tanto ser côncava como convexa. O formato deve ser escolhido para favorecer o fluxo superficial da água.

2.2 MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA

Para Cruden (2003), o termo “movimento de massa” foi registrado pela primeira vez em 1838 pelo Sharpe em seu livro “Landslides and related phenomena: A study of mass movements of soil and rocks”. Todo deslocamento de solo que ocorre em um talude ou encosta é considerado um movimento de massa e geralmente está associado a problemas de instabilidade dessas estruturas.

Os movimentos de massa são caracterizados pela dinâmica de variados tipos de materiais (solos, rochas e detritos) ao longo das encostas e são decorrentes da influência de variáveis fatores, dentre eles destacam-se declividade, cobertura vegetal, índice pluviométrico, padrão de escoamento de águas pluviais e ocupação irregular de encostas.

Em virtude da complexidade dos processos envolvidos e da multiplicidade de ambientes de ocorrência, assim como dos diferentes enfoques dados, existem várias classificações de movimentos de massa gravitacionais. Algumas são baseadas na cinemática do movimento, como considerações sobre a massa em movimento e o terreno estável, velocidade, direção e sequência dos deslocamentos; outras no tipo do material envolvido, levando em conta sua estruturação, textura e conteúdo de água; também pela geometria, definida pela forma e tamanho das massas mobilizadas (PINTO, PASSOS e CENAPARO, 2006).

Existem várias classificações internacionais para movimentos de massa, sendo que a primeira tentativa de classificação desses movimentos deve-se a Dana (1864), posteriormente seguiram-se outras como as de Sharpe (1938), Varnes (1978) e Hutchinson (1988). Dentre os diversos sistemas de classificação, destaca-se a de Varnes (1978) que é classificação oficial da Associação Internacional de Geologia de Engenharia e Ambiental (IAEG), esta classifica os movimentos tanto em rochas quanto em solos, definindo por: queda, tombamento, escorregamento, expansão lateral, escoamento e complexo.

Em âmbito nacional, é possível destacar entre as principais classificações as de Freire (1965), Guidicini e Nieble (1984) e Augusto Filho (1992). Por serem classificações simples e de fácil compreensão, apresenta-se, neste trabalho, a proposta por Augusto Filho (1992) que leva em consideração, principalmente, a composição do material e a velocidade de deslocamento, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos movimentos de encosta mais comuns.

Tipo de Movimento	Características do movimento, material e geometria
Quedas (falls)	<ul style="list-style-type: none"> • Sem planos de deslocamento • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso • Pequenos a médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc • Rolamento de matacão • Tombamento
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento (externos) • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) • Pequenos a grandes volumes de material • Geometria e materiais variáveis • Planares – solos pouco espessos, solo e rochas com um plano de fraqueza • Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas • Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso • Desenvolvimento ao longo das drenagens • Velocidades médias a altas • Mobilização de solo, rocha, detritos e água • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas
Rastejos ou fluência (creep)	<ul style="list-style-type: none"> • Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada • Geometria indefinida

Fonte: Augusto Filho (1992).

2.3 SOLUÇÃO DE ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

Observa-se diversas e grandiosas catástrofes ocorridas no Brasil, nos últimos anos, decorrentes das fortes enchentes, que causam desmoronamentos de encostas e a interdição de rodovias devido à queda de barreiras, não permitindo, portanto, o acesso as regiões onde houve as ocorrências. Estes acidentes obrigam os profissionais da área estudarem técnicas eficazes de contenção de massa a fim de garantir a estabilidade de encostas, como também evitar danos socioeconômicos e ambientais.

Deslizamentos de terra ocorrem de formas variadas e em diferentes estágios de desenvolvimento, além de envolver uma gama de processos e fatores de perturbação, o que traz infinitas possibilidades de classificação. Guidicini e Nieble (1984), elucida a complexidade da análise de estabilidade de um talude e a escolha do método de estabilização, pontuando que o método deve ser escolhido de acordo com, não somente esses agentes e causas, mas também de acordo com as condições de prazos, custos, materiais constituintes, até mesmo impacto ambiental.

A análise de estabilidade de taludes consiste na comparação, ao longo de superfícies potenciais de deslizamento, dos esforços resistentes com os esforços cisalhantes, A avaliação da estabilidade de taludes possibilita a otimização de lavras em áreas de mineração, a segurança de cortes de estradas, túneis e encostas naturais e artificiais, entre outros benefícios (NAGALI, 2010).

Segundo Coutinho (2008), as obras de estabilização fazem parte das ações estruturais para prevenção de acidentes e redução de risco, e são compostas da seguinte abordagem:

- Elaboração de planos de intervenções estruturais integradas considerando os aspectos técnicos, econômicos e socioculturais;
- Inclusão de obras de contenção em programas de reurbanização ou consolidação geotécnica;
- Avaliação de reuso da área de risco para fins habitacionais voltados à população de baixa renda, utilizando técnicas construtivas adequadas às condições geotécnicas das encostas.

O Quadro 2 ilustra os tipos de obras de estabilização segundo Alheiros et al. (2003), que podem ser empregadas a uma encosta.

Quadro 2 – Tipos de obras de estabilização de encostas.

Grupos	Subgrupos	Tipos de Obras		
Obras sem estrutura de contenção	Retaludamento	Cortes	Talude Contínuo e escalonado	
		Aterro Compactado	Carga de fase de talude (muro de terra)	
	Proteção Superficial	Materiais naturais	Gramíneas	
			Gramma armada com geossintético	
			Vegetação Arbórea (mata)	
			Selagem de Fendas com solo argiloso	
		Cimentado		
		Geomantas e gramíneas		
		Geocélula e solo compactado		
		Tela argamassada		
		Pano de pedra ou lajota		
		Alvenaria armada		
	Asfalto ou polietileno			
	Lonas sintéticas			
	Drenagem	Interna	Drenos sub-horizontais, trincheiras, etc	
Externa		Canais, canaleta de borda, pé e descida		
Estabilização de Blocos	Retenção	Tela metálica e tirante		
	Remoção	Desmonte		
Obras com estrutura de contenção	Muro de arrimo	Solo-Cimento	Solo-cimento ensacado	
		Pedra-Rachão	Pedra seca	
			Alvenaria de pedra	
		Concreto	Concreto armado	
			Concreto ciclópico	
		Gabião	Gabião-caixa	
	Bloco de concreto articulado	Bloco de concreto articulado (pré-fabricado, encaixado sem rejunte)		
	Solo-Pneu	Solo-pneu		
	Outras soluções de contenção	Terra armada	Placa pré-fabricada de concreto, ancoragem metálica ou geossintéticos	
		Micro-ancoragem	Placa e montante de concreto, ancoragem metálica ou geossintéticos	
		Solo Compactado e reforçado	Geossintético	
			Paramento com pré-fabricados	
Cortina Atirantada				
Solo Grampeado				
Obras de proteção para massas movimentadas	Materiais naturais	Barreira Vegetal		
	Materiais artificiais	Muro de espera		

Fonte: Adaptado de ALHEIROS et al. (2003).

2.4 ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO COM ANCORAGENS

A execução obras com estrutura de contenções é um serviço bastante comum em obras civis, principalmente quando estas se localizam em áreas limitadas, como nas obras urbanas de um modo geral. De acordo com Wolle (1980), as obras de contenção são estruturas que, uma vez implantadas em uma encosta ou talude, oferecem resistência à movimentação ou à sua ruptura, ou ainda reforçando parte do maciço e geralmente essas obras possuem alto custo.

As contenções são estruturas projetadas para resistir a empuxos de terra e/ou água, cargas estruturais e quaisquer outros esforços induzidos por estruturas vizinhas ou equipamentos adjacentes. A estrutura de contenção deve proporcionar a integridade dos vizinhos durante a escavação. A necessidade de executarmos as contenções, ou ao menos de limitarmos a escavação por taludes, é a segurança (JOOPERT., 2007).

De acordo com a NBR 11682 (ABNT, 2009) estruturas ancoradas são aquelas cuja estabilidade é garantida através de tirantes ancorados no terreno. A estrutura pode ser contínua, em grelha, em placas ou em contrafortes.

Sob um ponto de vista geotécnico, estruturas de contenções ancoradas no maciço terroso e rochoso parecem ser umas das técnicas mais eficazes e de ganho econômico, quando se trata da segurança do sistema, capazes de suportar elevadas forças horizontais do solo, também conhecidas de empuxos de terra, como também amenizar os impactos ambientais devido a sua implantação.

Tirante é uma peça composta por um ou mais elementos resistentes à tração, montada segundo especificações do projeto. Estes elementos são introduzidos no terreno em perfuração previamente executada. Contenções com uso de tirantes são utilizadas em obras onde as escavações são cada vez mais profundas em função do aumento do número de subsolos executados, seja nos edifícios comerciais, nos residenciais, assim como obras rodoviárias e em obras ferroviárias na contenção de taludes e encostas (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Os tirantes podem ser classificados em: tirante provisório, que tem prazo previsto de utilização inferior a dois anos, a partir de sua instalação; tirante permanente, com prazo previsto de utilização superior a dois anos; tirante reinjetável, que permite injeções adicionais após a sua instalação; tirante não reinjetável, que não permite

injeções adicionais após a sua instalação; tirante autoperfurante, não reinjetável, constituído de elemento monobarra vazado, cuja perfuração é realizada com sua própria barra e acessórios, ficando todos incorporados na perfuração, e injetado simultaneamente com calda de cimento ou outro fluido aglutinante (SILVA, 2017).

Segundo NBR 5629 (ABNT, 2018), os seguintes dados devem estar disponíveis para a elaboração do projeto de tirantes: relatório de investigação geológico-geotécnica; levantamento planialtimétrico cadastral; informações relativas aos elementos interferentes; interações entre as construções próximas; e condições na época do projeto em relação à legislação vigente relativa à implantação e execução devem ser fornecidas previamente ao projetista.

As etapas para realização da contenção por tirante iniciam com a perfuração, onde é preciso verificar a composição do maciço para determinar se o mesmo irá suportar a realização do processo, de modo geral é recomendado que pelo menos 5 m sobre o trecho de ancoragem. É possível usar qualquer sistema de perfuração, desde que seja retilíneo, com diâmetro, inclinação e comprimento previstos conferindo alinhamento e estabilidade na perfuração (SANTOS, 2017).

A instalação dos tirantes, o furo deve ser preenchido com calda de cimento ou aglutinante do fundo para a boca. O revestimento de proteção do furo só deve ser retirado após o preenchimento do furo com calda que compõe o bulbo de ancoragem e introdução do tirante. O tirante pode ser instalado antes ou depois do furo ser preenchido para formar o bulbo. Caso o preenchimento seja realizado antes, a instalação do tirante deve ser feita imediatamente após a injeção do aglutinante (ABNT, 2018).

A injeção é a operação realizada para fixar a armação de tração (tirante). Essa é feita através da inserção sob pressão de um aglutinante que, geralmente, é uma calda de cimento. A injeção pode ser feita de uma única fase ou em fases múltiplas, desde de que o furo seja aberto no solo seja totalmente preenchido e a capacidade de carga do tirante seja mantida. A injeção pode uma calda de cimento, mais usual, ou outro tipo de aglutinante (ABNT, 2018).

Durante a proteção o elemento resistente a tração é tensionado, quando esse elemento é solto, ele tenta retornar ao seu comprimento original e exerce forças que ajudam a segurar a parede de contenção. As forças exercidas durante a realização

da protensão devem coincidir com a direção do eixo do tirante e ser aplicadas utilizando manômetro, macaco e bomba hidráulica (ABNT, 2018).

Após instalado e analisado o tirante deve receber uma injeção especial em seu trecho livre e na região cabeça, de modo que os espaços vazios sejam totalmente preenchidos e não haja a possibilidade de qualquer infiltração atingir o elemento resistente a tração. Essa injeção pode ser calda de cimento ou qualquer outro material, desde que não agressivo ao elemento resistente a tração. Também deve ser realizado um revestimento por concreto ou argamassa com espessura mínima de 2,0 cm (SANTOS, 2017).

2.5 ELEMENTOS DRENANTES

A execução de obras de drenagem corresponde a captação e direcionamento das águas do escoamento superficial, através da retirada d'água e alívio de poropressões do fluxo intersticial (WOLLE, 1980). O sistema de drenagem utilizado em talude pode ser dividido em drenagem superficial, drenagem subsuperficial ou profunda e drenagem de estruturas de contenção.

De acordo com Costa (2017), dada à importância do fluxo de água subterrânea na estabilidade de encostas e taludes, diversos casos de obra encontrados na literatura recorreram à drenagem subterrânea como solução para estabilização. Para Bastos (2006), a estabilização de encostas através da utilização de drenagem subterrânea é verificada vários casos de obra, sendo observado em todos os casos, a eficiência da drenagem subterrânea na estabilização dos movimentos de massa.

Um sistema de drenagem sub-horizontal profunda (DHP) são perfurados com inclinação entre 3° a 10° com a horizontal, de modo que o escoamento gravitacional seja satisfatório. As perfurações dos drenos são geralmente, revestidas. A remoção do revestimento de perfuração ocorre quando se atinge a profundidade desejada. Em seguida insere-se um tubo perfurado de PVC ou de aço galvanizado ranhurados ou com orifícios, sendo executados por perfurações direto na face do talude. Em seguida o revestimento é extraído pela sonda ou perfuratriz que a implantou.

O sistema consiste no rebaixamento do lençol freático abaixo da base de solo a ser estabilizada. A água que infiltra pelos drenos é conduzida para fora do talude por gravidade e em seguida serão despejas em sarjetas que irão conduzir as mesmas para uma caixa de paisagem que irá conduzir as águas para o sistema público.

2.6 INSTRUMENTAÇÃO DE OBRAS GEOTÉCNICAS

A instrumentação geotécnica ou monitoramento geotécnico, pode ser compreendido como o oferecimento de aquisições de dados para ajudar os profissionais da área (engenheiros e projetistas), em todas as etapas de um projeto. Em suma, a começar pela identificação das condições do local em questão, que uma obra pode ser realizada ou não, ter maior complexidade ou não, além de deliberar quais procedimentos são mais adequados para o terreno. É através das instrumentações geotécnicas que se pode obter critérios importantes como: poropressão, permeabilidade do solo, estabilidade de talude, profundidade do lençol freático, entre outros.

Segundo Garroux, Leão e Brandt (2016), a instrumentação geotécnica, de um modo geral, acaba sendo uma técnica aplicada para mensurar as variedades de tensões e deformações provocadas pela execução de uma obra. Existem variados objetivos para se acontecer uma instrumentação e um dos essenciais, é permitir uma comparação entre hipóteses de deformações e tensões feitas na etapa de projeto, tendo como eixo os elementos geotécnicos adquiridos nas campanhas de investigações, e o confronto com a realidade da obra, durante e após a execução. Essas comparações se refletem na segurança da obra, pois se o monitoramento indicar que as medições estão em consonância com as previsões, pode-se esperar que a obra transcorra com segurança (GARROUX; LEÃO; BRANDT, 2016).

É nas instrumentações geotécnicas que se verifica se as hipóteses planejadas irão apresentar o comportamento esperado. Sendo assim, uma boa instrumentação geotécnica é essencial, tanto nas etapas iniciais quanto nas seguintes de uma obra, inclusive, após a conclusão da própria obra, visto que o ato de verificar permite rever a necessidade de modificá-lo nas demais fases, de forma a monitorar os efeitos da construção, bem como os riscos e rupturas evitáveis, já que é possível detectar, com precisão, problemas estruturais – o que permite tomar medidas em tempo hábil, que redução de gastos e desperdício de recursos.

2.6.1 Precipitação

Conforme Guimarães et al. (2008), no Brasil, devido às condições predominantes de climas tropicais com chuvas de verão intensas, e geomorfológicas, com grandes maciços montanhosos, é muito suscetível aos movimentos de massa, é esperado um grande número de escorregamentos na estação chuvosa, especialmente em episódios de chuvas intensas. Juntamente com a elevada frequência desses movimentos de massa, decorrente das condições naturais, um considerável número de acidentes relacionados à atuação antrópica nas imediações das encostas também é observado (COSTA, 2017).

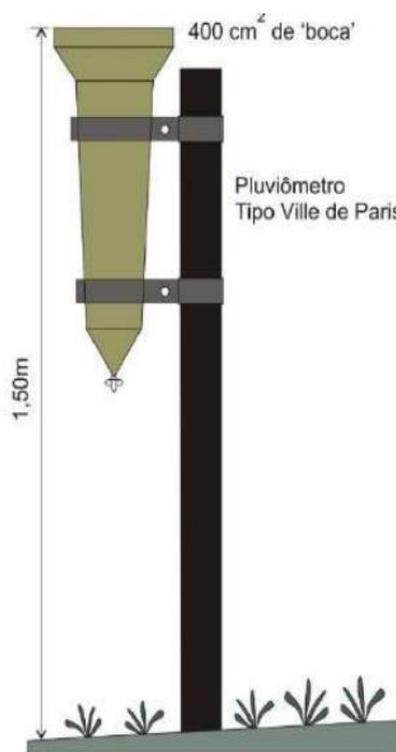
Segundo Rojas (2017) as precipitações podem ser entendidas como volumes ou alturas d'água na fase líquida que caem em uma superfície plana, unitária e impermeável, podendo ser expressa em milímetros de água por unidade superfície. Os registros de precipitação podem ser feitos por meio de dois equipamentos, que são os pluviômetros e os pluviógrafos.

De acordo com Costa (2017), as chuvas são diretamente responsáveis por grandes movimentos de massas, sendo, por vezes, deflagrados após eventos chuvosos. Um número considerável de movimentos de massa ocorre durante a estação chuvosa, sendo associado a chuvas intensas, precedidas ou não de chuva antecedente (LACERDA, 1997). As chuvas são apenas um dos aspectos a serem considerados para análise das condições que propiciam os escorregamentos. Porém, diversos outros fatores também são atuantes. No entanto, os eventos pluviométricos são os aspectos mais significativos desses deslocamentos de terra.

Nos pluviômetros são registradas leituras da altura total de água precipitada, referente a lâmina d'água acumulada da precipitação. Os registros são lidos como milímetros por dia. As leituras devem ser realizadas diariamente, sempre no mesmo horário, cobrindo as leituras de chuva das últimas 24 horas, embora o equipamento não seja capaz de fornecer a distribuição e intensidade horária de chuva. A Figura 2 a seguir exemplifica um pluviômetro do tipo Ville de Paris (GEO-RIO, 2014).

Os pluviógrafos, diferentemente dos pluviômetros, permitem continuamente o registro da intensidade de precipitação, medindo a variação da altura da lâmina d'água com o tempo, assim é possível registrar de forma simultânea a duração e a intensidade da precipitação.

Figura 2 – Pluviômetro Ville de Paris.



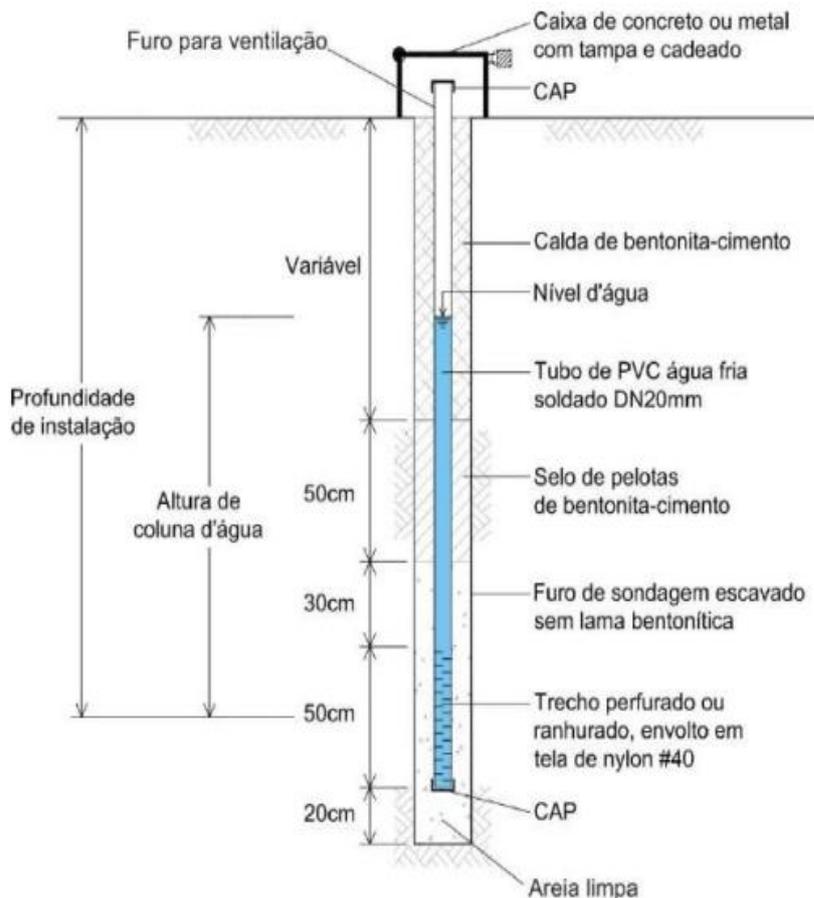
Fonte: GEO-RIO (2014).

2.6.2 Poropressão

A análise do comportamento da poropressão é uma das características mais importantes para o monitoramento de obras geotécnicas, como barragens, aterros e taludes. Os instrumentos mais empregados no monitoramento dessa grandeza são os piezômetros (PZ) que, segundo Dunnycliff (1988), têm duas aplicações gerais. A primeira para monitoramento de redes de fluxo e a segunda para avaliar a estabilidade de uma massa de solo ou rocha.

Os piezômetros podem ser de diferentes tipos e seu uso associa-se a aplicação a que são destinados. Dunnycliff (1988) observa que os piezômetros podem ser agrupados considerando dois grupos, aqueles que possuem diafragma entre o transdutor e o poro ou água da junta e aqueles que não possuem. Os instrumentos do primeiro grupo são piezômetros com transdutores pneumáticos, de corda vibrante e strain gage de resistência elétrica. Já aqueles do segundo grupo são os piezômetros hidráulicos de tubo vertical e tubo duplo. A Figura 3 mostra o piezômetro do tipo Casagrande, para o qual será dado maior enfoque neste trabalho.

Figura 3 – Seção esquemática de um piezômetro do tipo Casagrande.

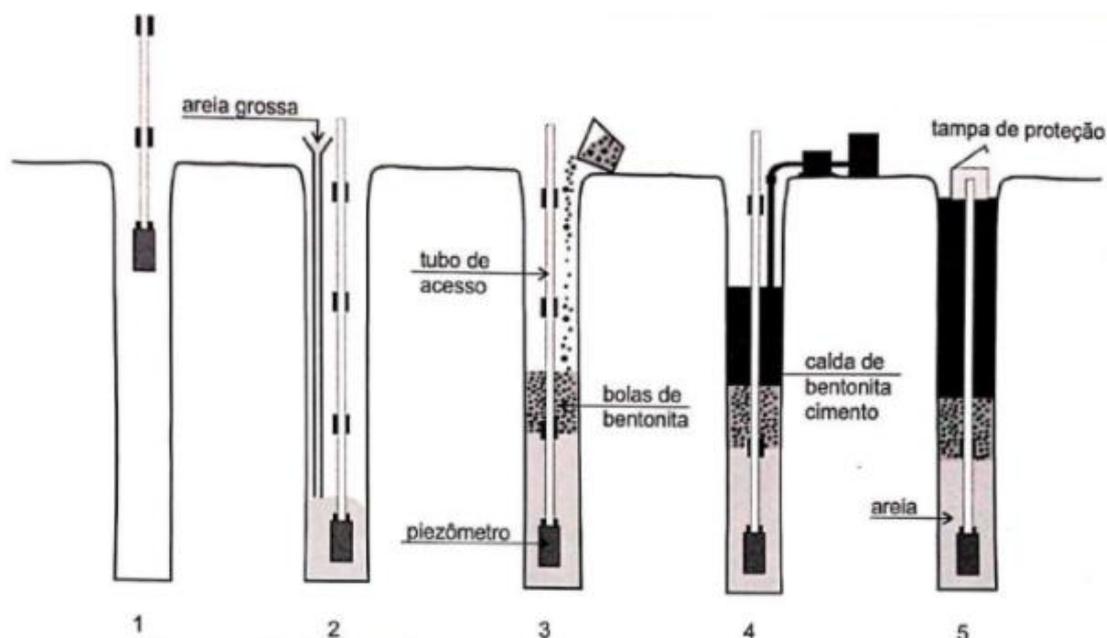


Fonte: GEO-RIO (2014).

O piezômetro Casagrande é composto por um tubo de PVC com diâmetros entre 20 e 32mm e um elemento poroso na extremidade inferior. Pode ser instalado em um furo de sondagem (percussão ou rotativa), recomendando-se não utilizar lama bentonítica durante a perfuração, a fim de evitar a impermeabilização do furo, podendo usar revestimento caso seja identificado problemas de estabilidade (GEO-RIO, 2014).

O procedimento de instalação do piezômetro Casagrande, segundo Cerqueira (2017), consiste em três etapas básicas: perfuração, selagem/preenchimento do furo e automação do instrumento. Após a abertura do furo, e alocação do tubo, deve-se preencher o espaço entre as paredes do furo e o elemento poroso com areia lavada, permitindo a passagem de água livremente. Na sequência, para execução do selo são lançadas livremente na boca do furo, bolas ou mistura de bentonita (a depender da profundidade) para vedação do furo e elemento poroso do tubo. A Figura 4 mostra a sequência de instalação desse tipo de piezômetro.

Figura 4 – Sequência de instalação de um piezômetro Casagrande.



Fonte: GEO-RIO (2014).

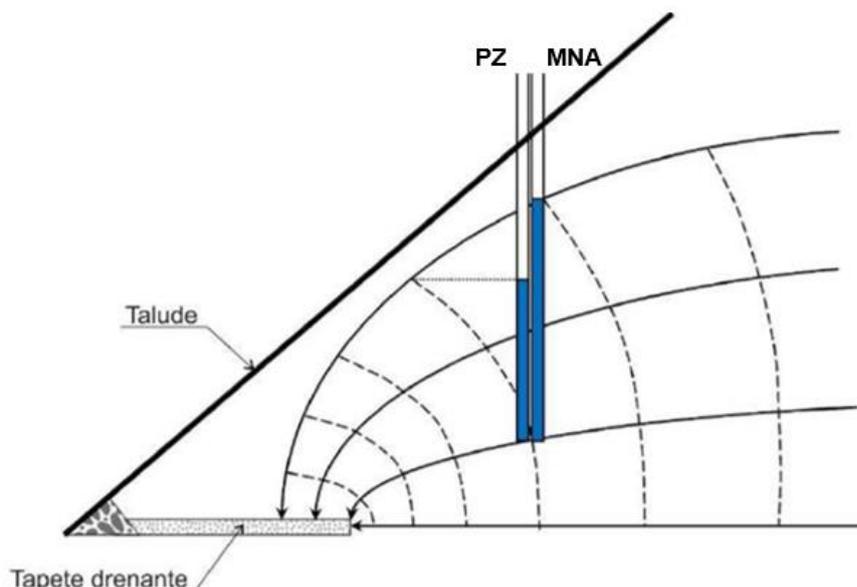
Os piezômetros Casagrande são muito empregados nos projetos de instrumentação por apresentam algumas vantagens, como instalação simples, ser um instrumento robusto e durável, pouca necessidade de manutenção, não requer mão de obra especializada. Entretanto, sua principal desvantagem consiste no tempo de resposta muito longo, especialmente, para solos com coeficientes de permeabilidade muito baixos, além de estarem mais suscetíveis aos efeitos de colmatação quando cravados (CERQUEIRA, 2017).

2.6.3 Nível d'água

Localizar e monitorar o nível d'água no solo é essencial para qualquer obra de geotécnica, com base nos ensinamentos destacados por Dunnicliff (1988). Conhecer sua variação em decorrência das precipitações e outros agentes se faz necessário para um bom entendimento e funcionamento das obras.

De acordo com a GEO-RIO (2014), o medidor de nível d'água (MNA) possui o mesmo princípio de fundamento do piezômetro de Casagrande. A diferença consiste no fato do MNA apresentar um elemento poroso em todo o comprimento do instrumento, localizando-se na região de variação do nível d'água. Na Figura 5 pode-se observar uma seção longitudinal típica de um medidor de nível d'água.

Figura 6 – Diferença de leituras entre PZ e MNA instalados em um solo submetido a um fluxo em regime permanente.



Fonte: Adaptado de GEO-RIO (2014).

Fusaro (2007) listou alguns erros que são frequentes na instalação e leitura do instrumento, sendo eles:

- Ausência ou má execução do selo superior, ocorrendo alterações nas leituras pela entrada de água pluvial ou de irrigação de taludes gramados;
- Deformação ou corte do cabo de leitura;
- Graduação do cabo de leitura deficiente;
- Posicionamento incorreto do sensor de leitura, ponto onde ocorre o fechamento do circuito ao contato com a coluna d'água. Na maioria das sondas, o sensor se localiza alguns centímetros (3 ou 4cm) acima da ponta. A trena graduada já deverá considerar esta diferença; e
- Cadastramento equivocado das cotas de instalação (cotas da base e do topo do tubo).

2.6.4 Tensão

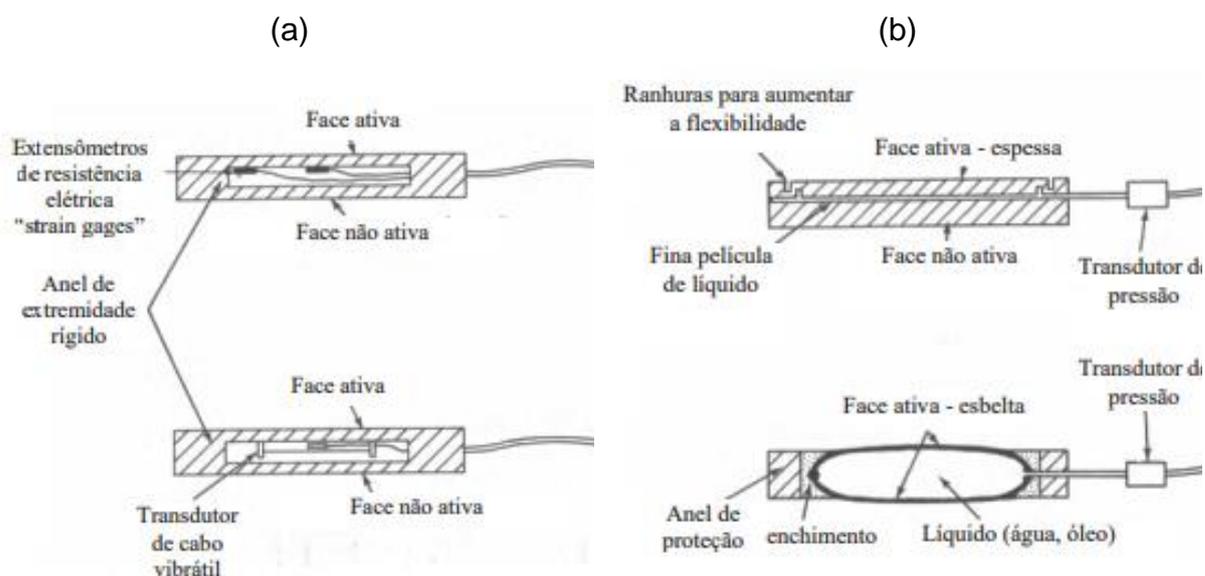
De acordo com Dunnycliff (1988), as medidas de tensão total no solo se enquadram em duas categorias: medições dentro de uma massa de solo e medidas na face de um elemento estrutural. Os instrumentos utilizados para a medição destas grandezas são as chamadas células de tensões totais.

Existem dois tipos de células de tensão total, conhecidas como célula de diafragma e célula hidráulicas, as quais estão apresentadas na Figura 7. Para o tipo diafragma, tem-se que uma membrana circular apoiada em um anel rígido registra as deformações impostas pelo solo por meio de um extensômetro de resistência elétrica (strain gage) ou por um transdutor de corda vibrante (DUNNICLIFF, 1988).

A célula do tipo hidráulica apresenta duas placas de aço unidas e espaço interno preenchido com fluido, conectado a um transdutor de pressão, de modo que a tensão total é medida por meio do equilíbrio induzido através da pressão submetida ao fluido interno (DUNNICLIFF, 1988).

Em geral, as medições de tensões totais estão associadas a medidas de poropressões, de forma a se avaliar a distribuição das tensões efetivas atuantes nas estruturas e os correspondentes gradientes de pressões.

Figura 7 – Tipos de células de tensão total: (a) diafragma; (b) hidráulica.



Fonte: Adaptado de Dunicliff (1988).

2.6.5 Deslocamentos

Os deslocamentos são definidos como qualquer movimento de rochas ou de solos. O monitoramento de deslocamentos pode ser realizado em superfície e em subsuperfície (profundidade), auxiliando no entendimento da movimentação e na construção de sistemas de alerta e alarme em área de risco.

2.6.5.1 Deslocamento superficial

Os deslocamentos superficiais são muito relevantes, pois apresenta fácil obtenção, permitindo observar a evolução do deslocamento, avaliar a dinâmica do movimento, bem como verificar as implicações de possíveis agentes deflagradores e a efetividade de soluções de estabilização (EISENBERGER, 2003).

A verificação de partes da superfície do terreno, seja de talude, barragem, túneis, pode ser obtida por meio de diversos métodos de monitoramento, os quais estão apresentados no Quadro 3 por Gili et al. (2000) com sua precisão, alcance e os tipos de medidas que podem ser efetuadas.

Quadro 3 – Principais métodos de monitoramento superficial.

Método	Resultado	Alcance Típico	Precisão Usual
Fita métrica de precisão	Δ distância	<30m	0,5mm/30m
Extensômetro de fio fixo	Δ distância	<10-80m	0,3mm/30m
Haste para abertura de trincas	Δ distância	<5m	0,5mm
Topografia de triangularização	$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	<300-1000m	5-10mm
Nivelamento geométrico	ΔZ	variável	2-5mm/km
Nivelamento geométrico de precisão	ΔZ	variável	0,2-1mm/km
Medição eletrônica de distância (EDM)	Δ distância	variável (usual 1-14km)	1-5mm + 1-5ppm
Fotogrametria terrestre	$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	ideal <100m	20mm de 100m
Fotogrametria aérea	$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	$H_{v\acute{o}o}$ <500m	10cm
Clinômetro	$\Delta\alpha$	10°	0,01-0,1°
GPS	$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	variável (usual <20km)	5-10mm + 1-2ppm

Fonte: Adaptado de Gili et al. (2000).

Observa-se que existe uma série de métodos que podem ser aplicadas para o monitoramento do deslocamento superficial, cuja escolha está relacionada com o tipo de movimento esperado e disponibilidade de equipamentos.

Um tipo de instrumentação muito comum em obras geotecnicas são os marcos superfícies (MS), que consistem em elementos rígidos instalados na superfície do terreno. Os deslocamentos verticais e horizontais são obtidos através de levantamentos topográficos periódicos, cujas medidas são corrigidas em função de um marco fixo instalado em local indeformados, fora da zona de influência do deslocamento (FONSECA, 2003). Caso não haja pontos com essas características é recomendada a instalação de benchmarks profundos (DUNNICLIFF, 1988).

2.6.5.2 Deslocamento em profundidade

Dunnicliff (1988) afirma que para os movimentos de massa em camadas internas do solo é recomendada a instalação de monitoramento de subsuperfície. Como principal instrumento para medição do deslocamento horizontal em profundidade tem-se o inclinômetro, capaz de medir a variação da inclinação ao longo de um tubo-guia, que, na maioria das vezes, é instalado em um furo de sondagem (WILSON e MIKKELSEN, 1978).

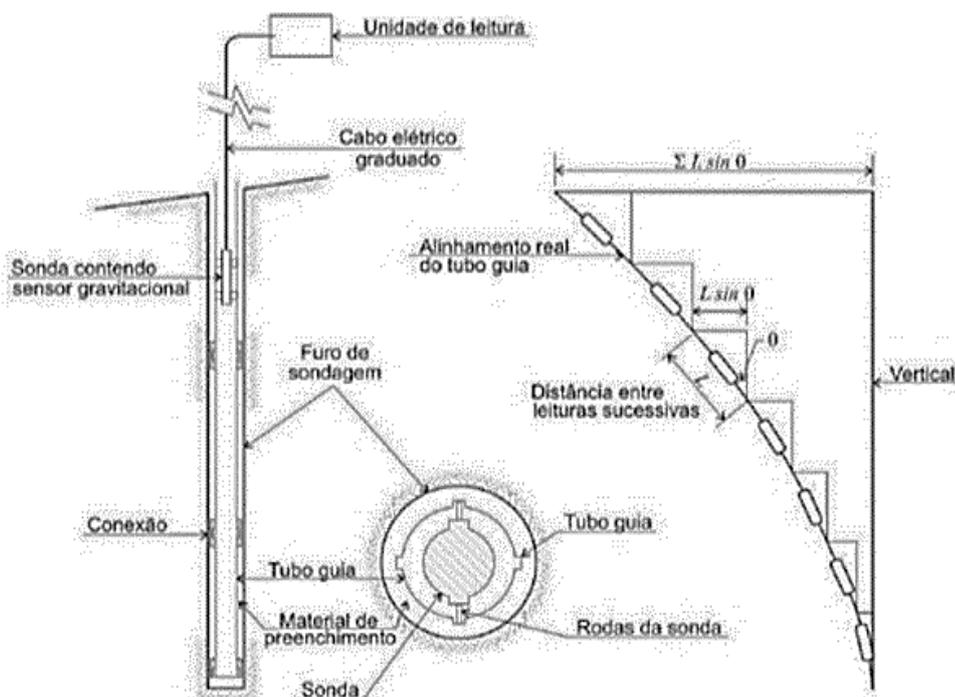
De acordo com Wilson e Mikkelsen (1978), o inclinômetro é capaz de definir as superfícies de ruptura ou zonas de movimentação relativa a áreas estabilizadas. Esta superfície é definida em função das leituras realizadas no equipamento, obtidas através de um transdutor sensível à gravidade, que contém um pêndulo (acelerômetro) capaz de medir a inclinação em relação a vertical.

Dunnicliff (1988) destaca quatro elementos principais na realização de medições por meio do inclinômetro, podendo-se citar o tubo-guia, o torpedo portátil (inclinômetro), a unidade de leitura portátil, e o cabo elétrico graduado que conecta o torpedo à unidade de leitura e serve de sustentação à descida do torpedo no tubo-guia (Figura 8). O corpo do inclinômetro é constituído de um elemento cilíndrico de aço inoxidável, munido de dois pares de rodas-guia, denominado “torpedo”. De acordo com Drehmer (2014), o inclinômetro contém dois acelerômetros nas orientações dos planos de medida, que são capazes de registrar a inclinação.

O tubo guia pode ser instalado no terreno através de furo de sondagem ou durante a construção de uma estrutura de solo compactado, cuja extremidade inferior deve ser fixada em rocha ou em uma camada que se garanta a ausência de movimentos (GEO-RIO, 2014). Além disso, a orientação das ranhuras (eixo A e B) deve seguir a direção esperada para o movimento de massa (COSTA, 2017).

Após a instalação do tubo, o procedimento de leitura é feito, para alguns aparelhos mais modernos, simultaneamente para os eixos A e B em profundidades fixas. A obtenção do deslocamento horizontal pode ser feita a partir da distância conhecida entre dois pontos de leitura e a diferença entre duas leituras de inclinação (GEO-RIO, 2014).

Figura 8 – Desenho esquemático do funcionamento do inclinômetro.



Fonte: Adaptado de Machan e Bennett (2008).

2.6.5.3 Rotação

Existem equipamentos que são responsáveis pela medição da rotação na superfície do terreno, como é o exemplo do tiltímetro, sendo comumente utilizados no monitoramento de movimentos de massa em taludes, porém podem ser aplicados em quaisquer situações de falha que se espere uma componente rotacional no deslocamento (WILSON e MIKKELSEN, 1978).

De acordo com Dunnicliff (1988), este tipo de instrumento também pode ser utilizado no monitoramento da inclinação de cortinas de contenção em taludes, bem como pode ter uso temporário para fazer uma indicação rápida sobre tendências de deformação. Ainda de acordo com o autor, o tiltímetro pode ser usado no monitoramento de subsidência em áreas de mineração, e na detecção de eventos sísmicos. Este tipo de equipamento apresenta um pêndulo que se movimenta de acordo com a inclinação do instrumento, ou seja, o transdutor se movimenta devido à força da gravidade (FORMOSO, 1999).

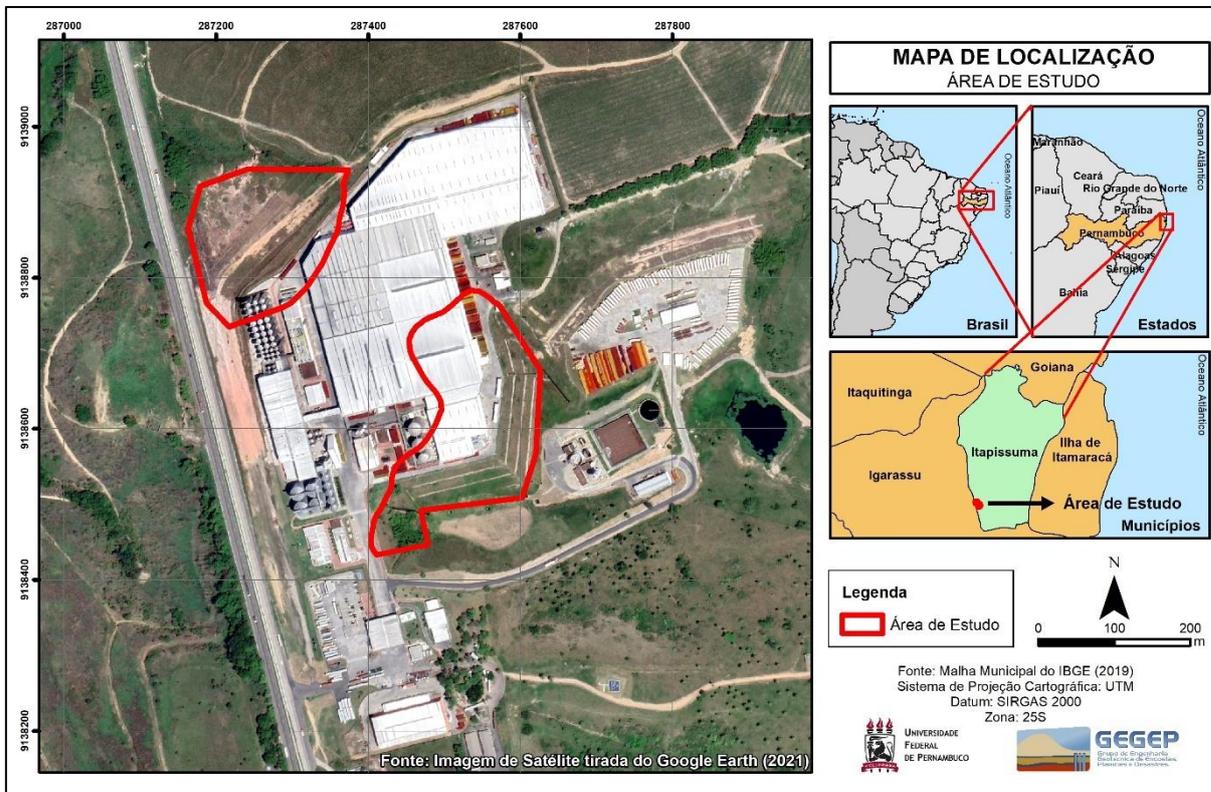
3 ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo tem-se uma breve descrição dos aspectos gerais da área de estudo e a linha do tempo do caso em análise – desde o aparecimento das patologias, apresentando a caracterização geológica-geotécnica, a instrumentação antes da obra de contenção, o projeto de estabilização, até o monitoramento após a obra de estabilização dos taludes de aterros com estrutura de contenção em vigas ancoradas e drenagem sub-horizontal profunda.

3.1 ASPECTOS GERAIS

A área de estudo desta pesquisa está localizada na região metropolitana do Recife (RMR), geograficamente a uma latitude de $7^{\circ}47'19,5''$ Sul e a uma longitude de $34^{\circ}55'37,5''$ Oeste e altitude de 7 m do nível do mar. Faz parte da mesorregião Metropolitana e na Microrregião Itamaracá de Pernambuco, limitando-se a norte com Goiana, a sul com Igarassu, a leste com Ilha de Itamaracá, e a oeste com Igarassu, distando 40,5 km da capital Recife (Figura 9).

Figura 9 – Mapa de Localização da área de Estudo.



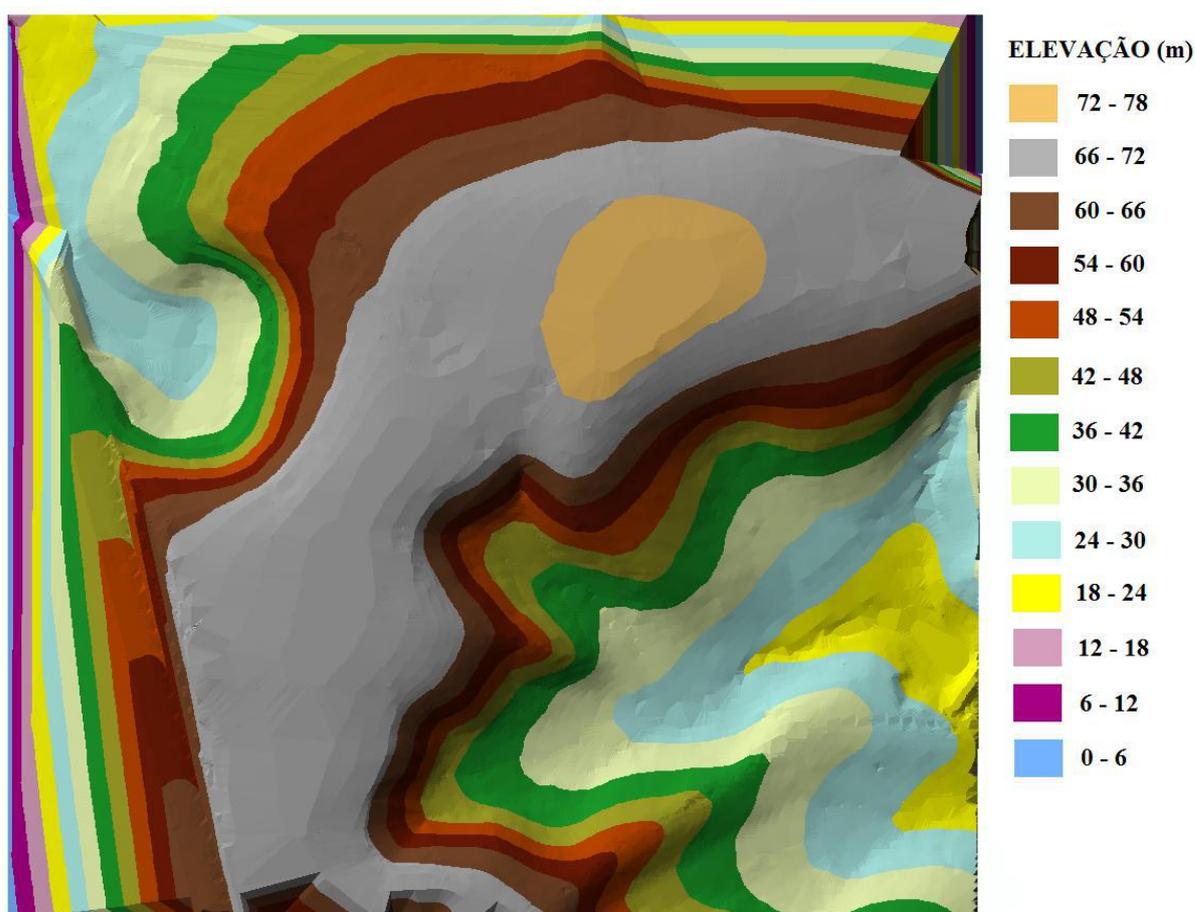
Fonte: O Autor (2022).

Os aterros são representados por solos sedimentares da Formação Barreiras. Foram construídos a partir do corte de aproximadamente 8 m do topo de uma encosta em terreno natural, cuja cota média em torno de 72 m. O quantitativo retirado foi suficiente para atender o volume necessário para o aterro.

A Figura 10 apresenta o Modelo Digital de Terreno antes do aterro. No terreno natural foi procedido o corte de 8 m, criando dessa forma uma área plana na cota de 64 m. Executaram-se dois aterros partindo da base do terreno natural até atingir a cota 64. Ambos apresentam aproximadamente de 27,50 m, com inclinação de 1:1,5 e 3 ou 4 patamares, com áreas de cerca de 43.991 m² e 26.901 m² denominados, respectivamente, Região Aterro 1 e Região Aterro 2. Esses aterros foram compactados com o material da mesma jazida e no mesmo período.

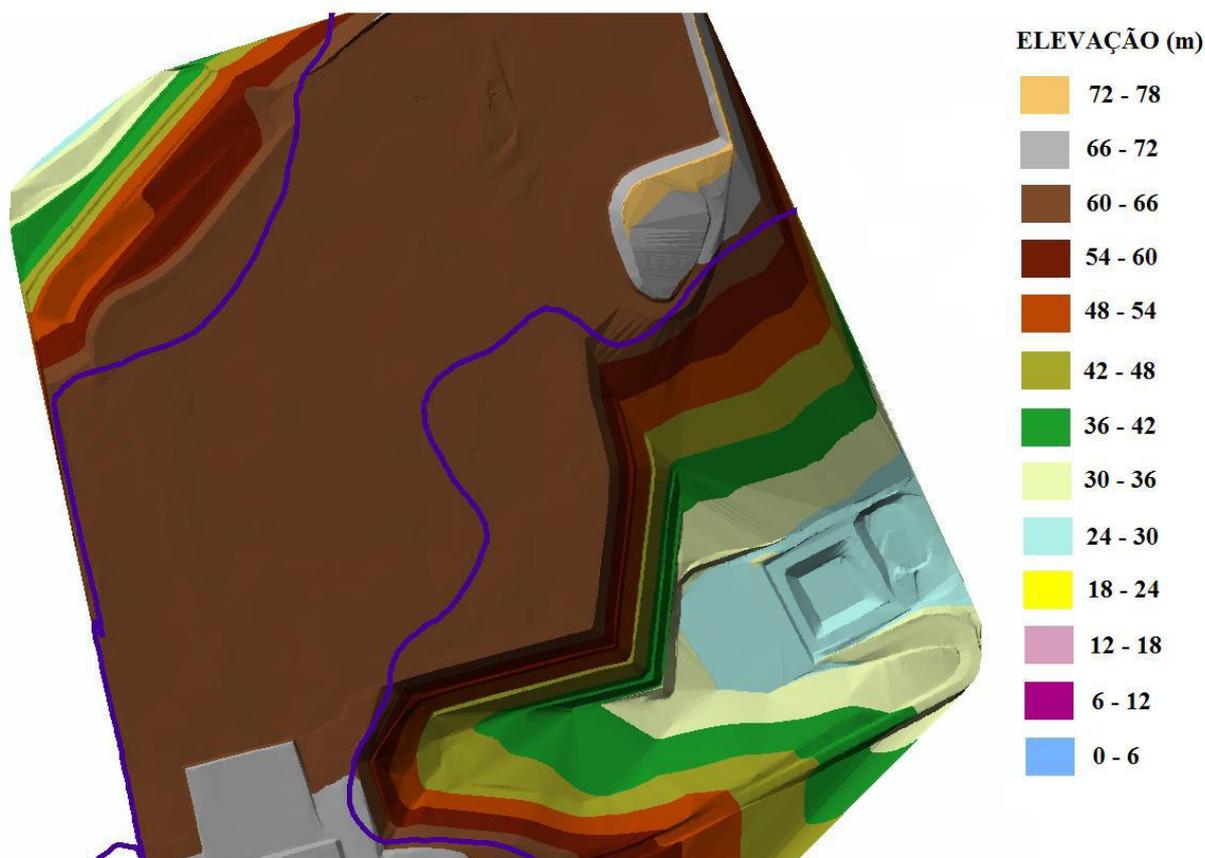
A Figura 11 apresenta o modelo digital do terreno após execução dos aterros.

Figura 10 – Modelo Digital do Terreno – topografia do terreno natural.



Fonte: Souza Neto (2016).

Figura 11 – Modelo Digital do Terreno – topografia após conclusão dos aterros.



Fonte: Souza Neto (2016).

3.2 LINHA DO TEMPO DO CASO ESTUDADO

Após a finalização da construção dos aterros, começaram a surgir manifestações patológicas, a exemplo de fissura e trincas em alvenarias (Figura 12), trincas em pavimentos (Figura 13) e rachaduras no solo (Figura 14). A Figura 15 mostra a localização da Região do Aterro 1 e da Região do Aterro 2, os limites do terreno natural e dos aterros, e as fissuras, trincas e rachaduras cadastradas.

A partir do aparecimento das patologias construtivas, foi realizado um Projeto com a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), por meio do Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas Planícies e Desastres (GEGEP), sob a coordenação do Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho, para caracterização geotécnica de campo e de laboratório e elaboração do Projeto de Estabilização dos aterros.

Figura 12 – Tricas em alvenarias.



Fonte: Coutinho et al. (2015).

Figura 13 – Trincas de cisalhamento no pavimento de concreto.



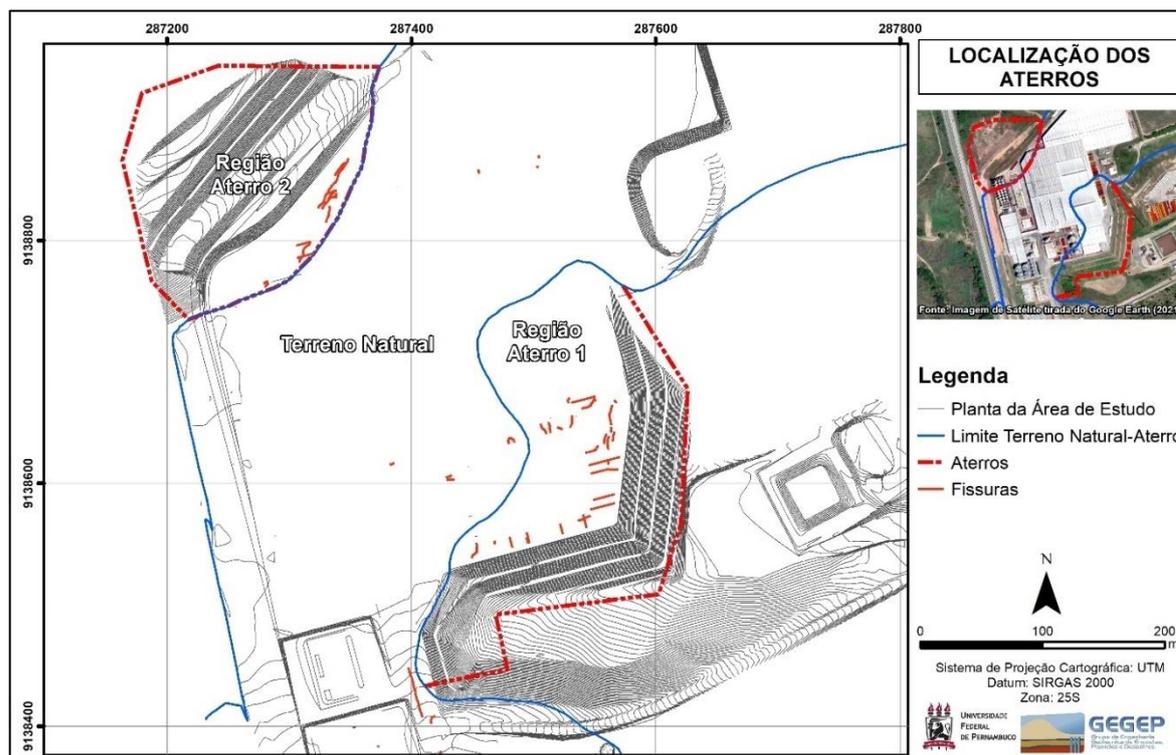
Fonte: Coutinho et al. (2015).

Figura 14 – Rachadura no solo.



Fonte: Coutinho et al. (2015).

Figura 15 – Localizações dos aterros.



Fonte: O Autor (2022), adaptado de Coutinho et al. (2015).

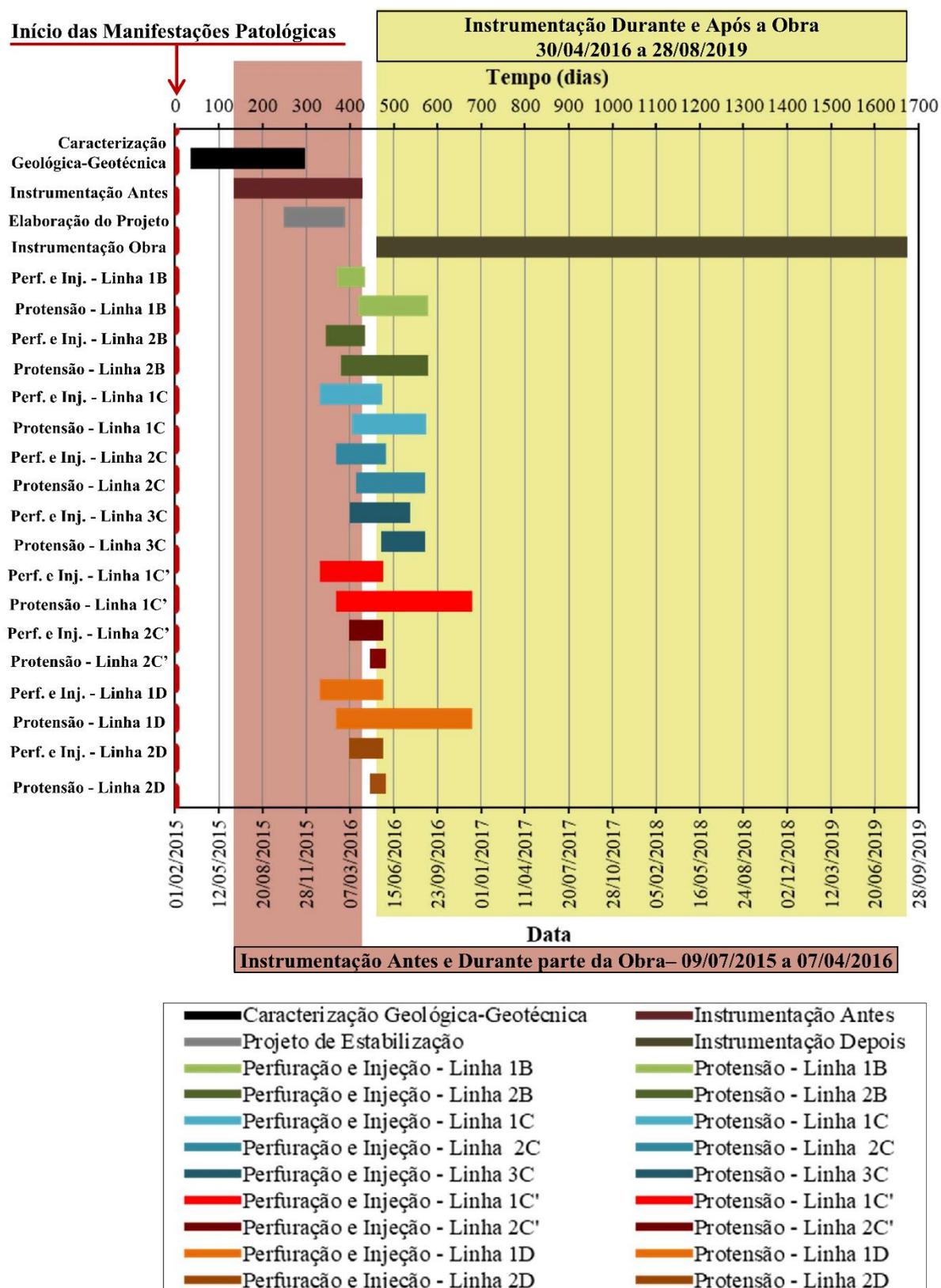
No Quadro 4 consta um resumo das principais etapas do caso estudado. Tem-se como marco inicial as manifestações patológicas, sendo considerado o dia 01/02/2015 como o zero. As demais fases – Caracterização Geológica-Geotécnica, Instrumentação Antes, Projeto de Estabilização, Execução da Contenção do Aterro 1 e do Aterro 2, Instrumentação Durante e Após a Execução da Contenção; serão apresentadas e discutidas nos próximos capítulos. A Figura 16 apresenta a linha do tempo do caso estudado nessa pesquisa.

Quadro 4 – Etapas do caso estudado.

Etapa da Obra	Períodos	
	Data	Tempo (dias)
Manifestação Patológica	01/02/2015	0
Caracterização Geológica-Geotécnica	01/04/2015 a 31/10/2015	59 a 272
Instrumentação Antes	09/07/2015 a 07/04/2016	158 a 431
Projeto de Estabilização	01/11/2015 a 31/01/2016	273 a 364
Execução da Contenção do Aterro 1	22/01/2016 a 17/11/2016	415 a 648
Execução da Contenção do Aterro 2	22/03/2016 a 10/11/2016	355 a 655
Instrumentação Durante e Após a Execução da Contenção	30/04/2016 a 28/08/2019	454 a 1669

Fonte: O Autor (2022).

Figura 16 – Linha do tempo do caso estudado.



Fonte: O Autor (2022).

4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

Este capítulo apresenta uma síntese dos resultados obtidos de trabalhos desenvolvidos anteriormente para caracterização da área de estudo, através de atividades em campo e laboratório.

4.1 GEOLOGIA LOCAL

O município de Itapissuma está inserido geologicamente na Província Borborema, sendo constituído dos sedimentos da Formação Itamaracá, do grupo Barreiras e dos depósitos flúvio-marinhos e aluvionares, compostos dos litotipos salgadinho e vertentes. O relevo é formado pelas áreas arenosas litorâneas, no qual estão incluídos a restinga, o mangue e as dunas.

A Formação Barreiras é caracterizada por interdigitações de fácies medianas a distais. Tais interdigitações ocorrem através de camadas arenosas grossas a conglomeráticas, intercaladas por níveis essencialmente conglomeráticos e camadas siltico-argilosas. Camadas arenosas grossas até conglomeráticas podem apresentar estratificações cruzadas e planares. As composições são em geral quartzosas e apresentam coloração variegada (avermelhada, alaranjada, amarelada e marrom). Os níveis conglomeráticos são representados por uma matriz areno-argilosa que suporta grãos tamanho calhau e seixo, subangulosos a angulosos, predominantemente de quartzo e subordinadamente blocos de feldspatos intemperizados e concreções ferríferas. As camadas siltico-argilosas de coloração variando de cinza avermelhada, esverdeada e roxa, mostram laminação; ocorrem também níveis argilosos, brancos, intercalados nos sedimentos arenoso-argilosos (VALENÇA, 2017).

A Formação Itamaracá é representada por siltitos argilosos intercalados com arenitos finos a muito finos, arenitos calcíferos e fosforito. Os siltitos areno-argilosos intercalados com arenitos finos a muito finos têm ocorrência mais restrita. Tais sedimentos geralmente ocorrem com colorações cinza esverdeada a creme, são estratificados e pouco porosos em virtude dos níveis argilosos. A friabilidade e os grãos de quartzo do tamanho de areia grossa a média, subarredondos são características comuns. O conteúdo carbonático é facilmente verificado com o gotejamento de ácido clorídrico (HCl) em amostras. Conteúdos carbonáticas efervesce através deste gotejamento (VALENÇA, 2017).

Na área trabalhada foi procedido o gotejamento e foi constada a ausência de conteúdo carbonático confirmando que a unidade geológica trata-se da Formação Barreiras.

4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A caracterização geotécnica foi realizada através em levantamento de campo e investigações geotécnicas, bem como retirada de amostras para a realização de ensaios de laboratório, de onde foram definidos e delimitados os perfis característicos das duas regiões de aterros. A campanha de investigações geotécnicas foi realizada para auxiliar no projeto de estabilização.

O programa de investigação para caracterização geotécnica na localidade contou com ensaios de campo e de laboratório (Figura 17). Os ensaios de campo realizados foram: sondagens de simples reconhecimento com medidas de N_{SPT} ; ensaio de condutividade hidráulica “in situ”, através do permeâmetro Guelph; ensaio de piezocone (CPTU – Piezocone Penetration Test). Os ensaios de laboratório foram: ensaios de granulometria com e sem defloculante; limites de consistência; densidade real dos grãos; compactação; ensaios edométricos duplos natural e inundado; ensaios triaxiais drenados e não drenados.

As sondagens de simples reconhecimento com medidas de N_{SPT} a cada metro. No total foram realizados 15 furos à percussão, sendo 7 na Região do Aterro 1 e 8 na Região do Aterro 2. As sondagens seguiram as especificações da NBR 6484 (ABNT, 2001) para execução das sondagens de simples reconhecimento e a classificação do solo de acordo com sua compacidade ou consistência seguiu as especificações contidas na NBR 7250 (ABNT, 1982).

A avaliação da condutividade hidráulica in situ” não saturada foi realizada em 7 verticais, seguidas as recomendações presentes no manual do usuário do permeâmetro “Guelph” (SOILMOISTURE, 1991). Na área de aterro foram realizados cinco verticais (G1, G2, G3, G5 e G6) e no terreno natural foram realizadas duas verticais (G4 e G7). A cada metro (1 m, 2 m, 3 m e 4 m) da vertical em execução foi realizado um ensaio para obtenção do coeficiente de permeabilidade saturada (K_{fs}) e o potencial mátrico (φ_m) do solo, com exceção do furo G7, pois devido a interferência de camada resistente no primeiro metro; o ensaio iniciou a partir de 2 m.

Foram realizadas duas campanhas de ensaios de piezocone. A primeira campanha de ensaios foi realizada no mês de setembro de 2015, contemplando a execução de três perfurações (CPTU-01, CPTU-02 e CPTU-03) à velocidade padrão de 2,0 cm/s. A segunda campanha de ensaios foi realizada no mês de dezembro de

2015, contemplando a execução de três perfurações fora da velocidade padrão para possível tentativa de análise das condições de drenagem do aterro. Foram realizados dois furos à velocidade de 1,0 cm/s (CPTU-01A e CPTU-03A) e um furo à velocidade de 3,0 cm/s (CPTU-01B). Os procedimentos para realização do ensaio de piezocone foi norteado pelas normas D-5778 (ASTM, 1995) e NBR 12069 (ABNT, 1991).

A retirada das amostras indeformadas (bloco) e amolgadas para realização da campanha de ensaios de laboratório seguiram as especificações da NBR 9604 (ABNT, 1986). Foram extraídos 11 blocos de amostras indeformadas, representativos da Formação Barreiras.

A Tabela 1 apresenta uma síntese da localização, profundidade e data de retirada dos blocos apresentados na Figura 17.

Tabela 1 – Resumo da distribuição dos blocos na área de estudo.

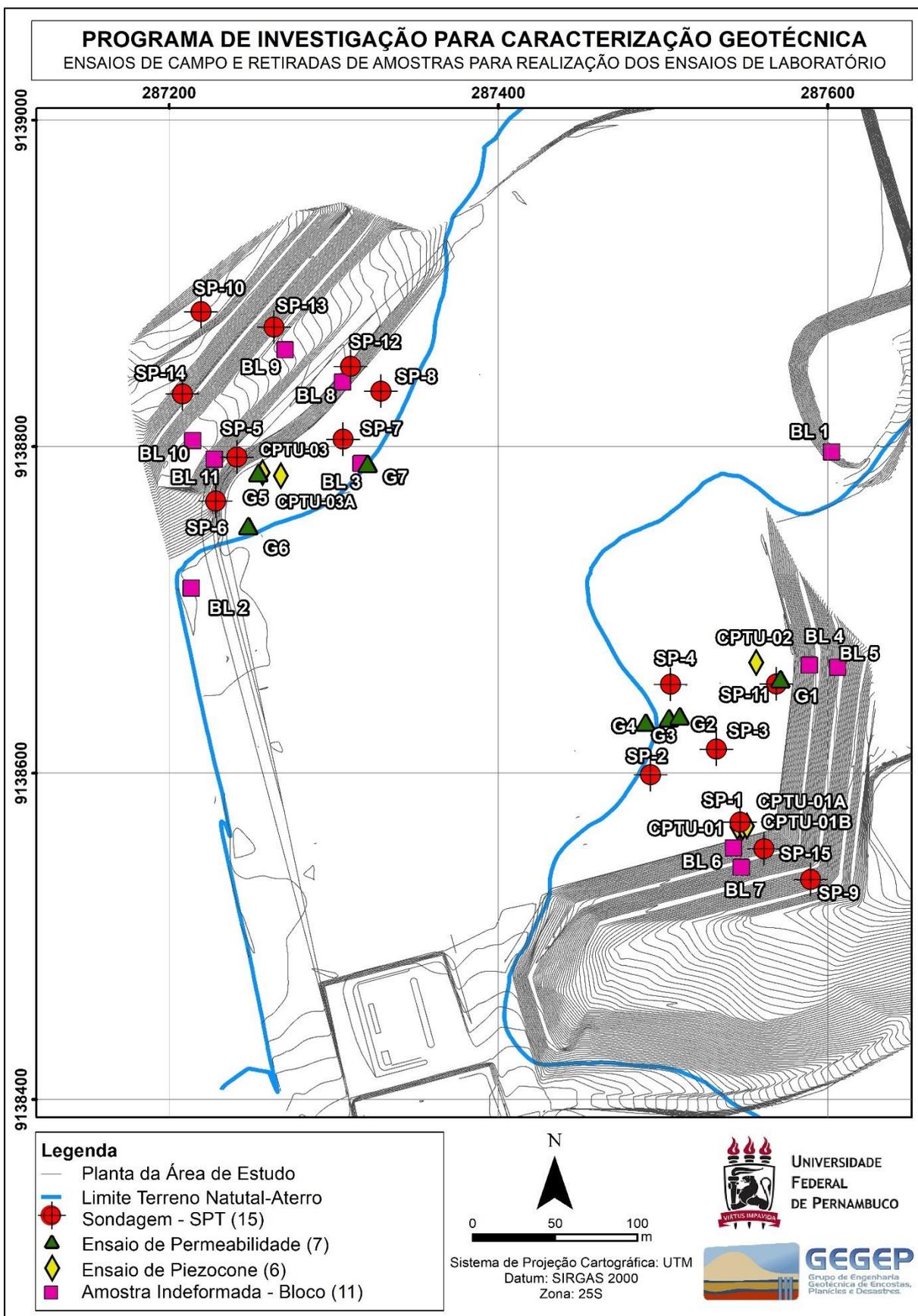
Bloco	Profundidade a partir do topo (m)	Localização	Data
Bloco 1	1,10	Terreno Natural / Jazida	07/08/2015
Bloco 2	1,70	Terreno Natural / Jazida	21/08/2015
Bloco 3	1,70	Fronteira: Terreno Natural-Aterro	15/10/2015
Bloco 4	1,10	Aterro – Área A	20/10/2015
Bloco 5	1,10	Aterro – Área A	20/10/2015
Bloco 6	1,40	Aterro – Área A	21/10/2015
Bloco 7	1,50	Aterro – Área A	21/10/2015
Bloco 8	2,35	Aterro – Área B	22/10/2015
Bloco 9	1,60	Aterro – Área B	22/10/2015
Bloco 10	2,40	Aterro – Área B	23/10/2015
Bloco 11	2,20	Aterro – Área B	23/10/2015

Fonte: Coutinho et al. (2015).

Os ensaios de laboratório foram: ensaios de granulometria com e sem defloculante; limites de consistência; densidade real dos grãos; compactação; ensaios edométricos duplos natural e inundado; ensaios triaxiais drenados e não drenado. Sendo realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI) da UFPE, conforme normas técnicas brasileiras da ABNT.

Os resultados e discussões sobre a caracterização geotécnica de campo e de laboratório foram anteriormente apresentadas nas dissertações de Souza Neto (2016) e de Mellia (2017), realizadas sob a orientação do Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Figura 17 – Programa de investigação para caracterização geotécnica da área de estudo.



Fonte: O Autor (2022), a partir Coutinho et al. (2015).

Nas Tabela 2 e Tabela 3 estão sumarizados todos os resultados obtidos através dos ensaios “guelph”.

Tabela 2 – Valores da permeabilidade (K_{fs}), potencial mátrico de fluxo do solo (Φ_m), umidade inicial e final para região do Aterro.

G1 - Vertical 1 - Aterro				
Profundidade (m)	K_{fs} (m/s) x 10⁻⁸	Φ_m (m²/s) x 10⁻¹¹	W_{inicial}	W_{final}
1	4,25	5,90	14,08	27,01
2	2,61	3,63	19,11	30,10
3	1,70	2,36	14,02	22,77
4	1,73	2,41	12,12	26,01
G2 - Vertical 2 - Aterro				
Profundidade (m)	K_{fs} (m/s) x 10⁻⁷	Φ_m (m²/s) x 10⁻¹¹	W_{inicial}	W_{final}
1	4,25	5,9	13,45	26,31
2	2,12	2,95	13,26	27,38
3	0,39	0,54	15,04	24,31
4	0,26	0,35	12,60	25,96
G3 - Vertical 3 - Aterro				
Profundidade (m)	K_{fs} (m/s) x 10⁻⁸	Φ_m (m²/s) x 10⁻¹¹	W_{inicial}	W_{final}
1	3,92	5,44	21,64	24,57
2	4,57	6,35	15,96	24,07
3	4,25	5,90	14,10	26,80
4	2,35	3,27	9,91	24,58
G5 - Vertical 5 - Aterro				
Profundidade (m)	K_{fs} (m/s) x 10⁻⁸	Φ_m (m²/s) x 10⁻¹¹	W_{inicial}	W_{final}
1	2,28	3,17	13,13	27,46
2	2,61	3,63	12,16	22,91
3	2,09	2,90	13,26	24,34
4	3,11	4,31	12,81	22,30
G6 - Vertical 6 - Aterro				
Profundidade (m)	K_{fs} (m/s) x 10⁻⁸	Φ_m (m²/s) x 10⁻¹¹	W_{inicial}	W_{final}
1	4,25	5,90	11,76	22,81
2	6,37	8,85	12,81	24,36
3	5,23	7,27	13,50	21,21
4	5,96	8,27	19,38	26,58

Fonte: Souza Neto (2016).

Tabela 3 – Valores da permeabilidade (K_{fs}), potencial mátrico de fluxo do solo (Φ_m), umidade inicial e final para região do Terreno Natural.

G4 - Vertical 4 – Terreno Natural				
Profundidade (m)	K_{fs} (m/s) x 10⁻⁷	Φ_m (m²/s) x 10⁻¹⁰	W_{inicial}	W_{final}
1	1,99	2,76	14,04	23,21
2	5,40	7,50	13,57	22,94
3	6,70	9,31	11,09	21,81
4	0,85	1,18	19,38	26,58
G7 - Vertical 7 – Terreno Natural				
Profundidade (m)	K_{fs} (m/s) x 10⁻⁶	Φ_m (m²/s) x 10⁻⁹	W_{inicial}	W_{final}
1	-	-	-	-
2	0,61	0,85	13,29	14,71
3	0,14	0,19	11,91	20,83
4	2,62	3,64	3,64	23,65

Fonte: Souza Neto (2016).

Nas Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização realizados nas amostras amolgadas dos blocos e nas janelas abertas no aterro.

Tabela 4 – Composição granulométrica do solo – Blocos.

Amostra	Prof. (m)	Localização	Pedreg. (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
Bloco 1	1,10	Terreno natural / Jazida	2,0	8,0	22,0	20,0	20,0	28,0
Bloco 2	1,70	Terreno natural / Jazida	16,0	7,0	19,0	15,0	14,0	29,0
Bloco 3	1,70	Terreno natural / Aterro	1,0	14,0	20,0	12,0	29,0	24,0
Bloco 4	1,10	Aterro	1,0	15,0	23,0	13,0	14,0	34,0
Bloco 5	1,10	Aterro	1,0	6,0	28,0	16,0	13,0	36,0
Bloco 6	1,40	Aterro	1,0	14,0	24,0	25,0	8,0	28,0
Bloco 7	1,50	Aterro	1,0	7,0	22,0	18,0	12,0	40,0
Bloco 8	2,35	Aterro	8,0	8,0	19,0	24,0	16,0	25,0
Bloco 9	1,60	Aterro	1,0	12,0	20,0	23,0	10,0	34,0
Bloco 10	2,40	Aterro	2,0	8,0	20,0	20,0	10,0	40,0
Bloco 11	2,20	Aterro	1,0	7,0	22,0	17,0	21,0	32,0

Fonte: Souza Neto (2016).

Tabela 5 – Densidade real dos grãos, limites de consistências e classificação SUCS – Blocos.

Amostra	Prof. (m)	Localização	Densidade Real (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS
Bloco 1	1,10	Terreno natural / Jazida	2,670	33,2	26,6	6,6	SM
Bloco 2	1,70	Terreno natural / Jazida	2,656	32,5	24,9	7,6	SM
Bloco 3	1,70	Terreno natural / Aterro	2,656	31,8	22,9	8,9	CL
Bloco 4	1,10	Aterro	2,659	32,0	19,1	12,9	CL
Bloco 5	1,10	Aterro	2,667	41,3	22,6	18,7	SC
Bloco 6	1,40	Aterro	2,659	22,6	18,3	4,3	SC
Bloco 7	1,50	Aterro	2,659	34,6	21,0	13,6	CL
Bloco 8	2,35	Aterro	2,642	29,0	19,0	10,0	SC
Bloco 9	1,60	Aterro	2,652	30,3	17,6	12,6	SC
Bloco 10	2,40	Aterro	2,659	30,5	20,1	10,4	CL
Bloco 11	2,20	Aterro	2,638	37,0	18,8	18,3	CL

Fonte: Souza Neto (2016).

Tabela 6 – Composição granulométrica do solo – Janelas.

Amostra	Prof. (m)	Localização	Pedreg. (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
Janela 1 ECAS 139	0,60 a 0,80	Aterro	1,0	10,0	27,0	13,0	12,0	37,0
Janela 2 ECAS 142	0,40 a 0,60	Aterro	0,0	2,0	18,0	32,0	13,0	35,0
Janela 2 ECAS 145	0,80 a 1,00	Aterro	0,0	9,0	23,0	22,0	12,0	34,0
Janela 3 ECAS 165	0,80 a 1,00	Aterro	0,0	8,0	23,0	23,0	13,0	33,0

Fonte: Souza Neto (2016).

Tabela 7 – Densidade real dos grãos, limites de consistências e classificação SUCS – Janelas.

Amostra	Prof. (m)	Localização	Densidade Real (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS
Janela 1 ECAS 139	0,60 a 0,80	Aterro	2,652	26,3	18,1	8,2	SC
Janela 2 ECAS 142	0,40 a 0,60	Aterro	2,653	32,3	23,6	8,7	SM
Janela 2 ECAS 145	0,80 a 1,00	Aterro	2,670	32,4	22,7	9,6	SC
Janela 3 ECAS 165	0,80 a 1,00	Aterro	2,659	33,3	23,8	9,5	SC

Fonte: Souza Neto (2016).

Os ensaios de compactação foram realizados por Souza Neto (2016) conforme especificações contidas na NBR 7182 (ABNT, 2016). Nos ensaios foi adotada a energia de referência do ensaio Proctor Normal. Os resultados das compactações dos blocos e janelas estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo dos resultados de compactação.

Amostra	Localização	Massa específica seca máxima (g/cm³)	Teor de umidade ótimo (%)
Bloco 1	Terreno natural / Jazida	1,825	14,0
Bloco 2	Terreno natural / Jazida	1,835	14,2
Bloco 3	Fronteira: Terreno natural / Aterro	1,710	15,8
Bloco 4	Aterro	1,760	15,5
Bloco 5	Aterro	1,795	13,5
Bloco 6	Aterro	1,818	11,9
Bloco 7	Aterro	1,775	13,3
Bloco 8	Aterro	1,810	13,1
Bloco 9	Aterro	1,790	14,7
Bloco 10	Aterro	1,660	16,7
Bloco 11	Aterro	1,760	13,4
Janela 1 ECAS 139	Aterro	1,690	13,3
Janela 2 ECAS 142	Aterro	1,740	12,5
Janela 2 ECAS 145	Aterro	1,785	12,3
Janela 3 ECAS 165	Aterro	1,762	12,5

Fonte: Souza Neto (2016).

Os ensaios de compressibilidade (edométrico duplo) foram realizados nas amostras indeformadas moldadas dos blocos, os corpos de prova foram ensaiados na condição de umidade natural e na condição inundada. Já as amostras amolgadas e posteriormente compactadas na energia Proctor Normal, coletadas nas janelas, foram ensaiados um corpo de prova na umidade ótima e o outro na condição inundada. Nas Tabela 9 a Tabela 12 são expostos os resultados dos ensaios realizados nos blocos indeformados. Os mesmos resultados obtidos para as amostras amolgadas coletadas nas janelas apresentados nas Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 9 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Bloco 1, 2 e 3.

Índice / Parâmetro	Bloco 1		Bloco 2		Bloco 3	
	Umidade natural	Inundado	Umidade natural	Inundado	Umidade natural	Inundado
Índice de vários, (e_0)	0,775	0,755	0,683	0,695	0,773	0,789
Índice de compressão, (C_c)	0,328	0,290	0,284	0,261	0,328	0,264
Índice de descompressão, (C_r)	0,020	0,21	0,020	0,20	0,026	0,023
Tensão de escoamento, σ'_{vm} (kPa)	211	200	147	65	170	100
Saturação inicial, Sr (%)	54,033	51,203	39,221	41,399	55,865	58,033
Umidade inicial, (W - %)	15,676	14,478	10,82	10,834	16,262	17,245
Peso específico úmido, ρ (g/cm ³)	1,740	1,742	1,738	1,737	1,742	1,740
Peso específico seco, ρ_d (g/cm ³)	1,505	1521	1,578	1,567	1,498	1,484
Expansão livre, (E_x)	-	0,05	-	0,09	-	0,100

Fonte: Souza Neto (2016).

Tabela 10 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Bloco 4, 5 e 6.

Índice / Parâmetro	Bloco 4		Bloco 5		Bloco 6	
	Umidade natural	Inundado	Umidade natural	Inundado	Umidade natural	Inundado
Índice de vários, (e_0)	0,831	0,830	0,726	0,726	0,692	0,694
Índice de compressão, (C_c)	0,352	0,219	0,245	0,241	0,344	0,230
Índice de descompressão, (C_r)	0,019	0,019	0,028	0,016	0,023	0,020
Tensão de escoamento, σ'_{vm} (kPa)	180	40	86	70	197	132
Saturação inicial, Sr (%)	43,660	44,253	58,704	58,723	47,893	48,909
Umidade inicial, (W - %)	13,643	13,813	15,979	15,984	12,463	12,768
Peso específico úmido, ρ (g/cm ³)	1,650	1,654	1,792	1,792	1,767	1,770
Peso específico seco, ρ_d (g/cm ³)	0,831	0,830	1,545	1,545	1,572	1,570
Expansão livre, (E_x)	0,352	0,219	-	0,045	-	0,125

Fonte: Souza Neto (2016).

Tabela 11 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Bloco 7, 8 e 9.

Índice / Parâmetro	Bloco 7		Bloco 8		Bloco 9	
	Umidade natural	Inundado	Umidade natural	Inundado	Umidade natural	Inundado
Índice de vários, (e_0)	0,813	0,816	0,790	0,812	0,738	0,737
Índice de compressão, (C_c)	0,228	0,224	0,327	0,244	0,418	0,447
Índice de descompressão, (C_r)	0,026	0,029	0,022	0,020	0,031	0,017
Tensão de escoamento, σ'_{vm} (kPa)	33	23	225	41	193	113
Saturação inicial, S_r (%)	63,006	63,733	54,170	54,210	54,691	54,573
Umidade inicial, (W - %)	19,265	19,549	13,435	13,453	15,223	15,171
Peso específico úmido, ρ (g/cm ³)	0,813	0,816	1,811	1,810	1,758	1,758
Peso específico seco, ρ_d (g/cm ³)	0,228	0,224	1,476	1,458	1,526	1,527
Expansão livre, (E_x)	0,026	0,029	-	0,190	-	0,125

Fonte: Souza Neto (2016).

Tabela 12 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Bloco 10 e 11.

Índice / Parâmetro	Bloco 10		Bloco 11	
	Umidade natural	Inundado	Umidade natural	Inundado
Índice de vários, (e_0)	0,948	0,947	0,792	0,790
Índice de compressão, (C_c)	0,276	0,280	0,199	0,199
Índice de descompressão, (C_r)	0,021	0,022	0,023	0,024
Tensão de escoamento, σ'_{vm} (kPa)	55	32	212	107
Saturação inicial, S_r (%)	60,260	59,919	73,897	73,555
Umidade inicial, (W - %)	21,480	21,332	17,030	16,908
Peso específico úmido, ρ (g/cm ³)	1,658	1,657	1,920	1,920
Peso específico seco, ρ_d (g/cm ³)	1,365	1,366	1,472	1,474
Expansão livre, (E_x)	-	0,050	-	0,100

Fonte: Souza Neto (2016).

Tabela 13 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Janela 1 ECAS 139 e Janela 2 ECAS 142.

Índice / Parâmetro	Janela 1 ECAS 139		Janela 2 ECAS 142	
	Umidade natural	Inundado	Umidade natural	Inundado
Índice de vários, (e_0)	0,574	0,577	0,520	0,520
Índice de compressão, (C_c)	0,201	0,157	0,182	0,121
Índice de descompressão, (C_r)	0,020	0,019	0,017	0,022
Tensão de escoamento, σ'_{vm} (kPa)	161,5	45	200	55
Saturação inicial, S_r (%)	61,491	61,197	62,003	61,974
Umidade inicial, (W - %)	13,312	13,312	12,153	12,158
Peso específico úmido, ρ (g/cm ³)	1,909	1,906	1,958	1,957
Peso específico seco, ρ_d (g/cm ³)	1,685	1,682	1,810	1,809
Expansão livre, (E_x)	-	0,050	-	1,040

Fonte: Souza Neto (2016).

Tabela 14 – Resumo dos resultados dos ensaios edométricos duplo – Janela 2 ECAS 145 e Janela 3 ECAS 165.

Índice / Parâmetro	Janela 2 ECAS 145		Janela 3 ECAS 165	
	Umidade natural	Inundado	Umidade natural	Inundado
Índice de vários, (e_0)	0,516	0,499	0,508	0,509
Índice de compressão, (C_c)	0,164	0,122	0,167	0,157
Índice de descompressão, (C_r)	0,019	0,035	0,017	0,019
Tensão de escoamento, σ'_{vm} (kPa)	173,8	57	200	90
Saturação inicial, S_r (%)	64,984	67,203	64,971	65,360
Umidade inicial, (W - %)	12,563	12,571	12,409	12,520
Peso específico úmido, ρ (g/cm ³)	1,982	2,005	1,982	1,982
Peso específico seco, ρ_d (g/cm ³)	1,761	1,781	1,763	1,762
Expansão livre, (E_x)	-	1,425	-	0,275

Fonte: Souza Neto (2016).

Reginatto e Ferrero (1973) classifica a probabilidade de colapso do solo com base no valor do coeficiente de colapsibilidade (C). O coeficiente de colapsibilidade de cada amostra foi determinado a partir dos ensaios edométrico duplo das amostras sob condições de umidade natural e inundadas (para as amostras do bloco indeformados). As informações para o cálculo do coeficiente de colapsibilidade e a

classificação segundo Reginatto e Ferrero (1973) encontram-se na Tabela 15. Os pesos específicos naturais foram obtidos a partir dos corpos de prova dos ensaios edométricos. As profundidades do bloco representam a diferença de altura entre o nível do terreno e o centro do bloco.

Tabela 15 – Classificação de colapsibilidade do solo segundo Reginatto e Ferrero (1973).

Amostra	Localização	Prof. (m)	γ_{nat} (kN/m ³)	σ_{v0} (kPa)	σ_{vpa} (kPa)	σ_{vpn} (kPa)	Reginatto e Ferrero (1973)	
							C	Classificação
Bloco 1	Terreno natural / Jazida	1,25	17,4	21,8	200	2011	0,090	CC
Bloco 2	Terreno natural / Jazida	1,85	17,4	32,2	65	147	0,286	CC
Bloco 3	Fronteira: terreno natural-atero	1,85	17,4	32,2	100	170	0,492	CC
Bloco 4	Aterro	1,25	16,5	20,6	40	180	0,122	CC
Bloco 5	Aterro	1,25	17,9	22,4	70	86	0,748	CC
Bloco 6	Aterro	1,55	17,7	27,4	132	197	0,617	CC
Bloco 7	Aterro	1,65	17,5	28,9	23	33	-1,439	VC
Bloco 8	Aterro	2,50	18,1	45,3	41	225	-0,024	VC
Bloco 9	Aterro	1,75	17,6	30,8	115	205	0,4803	CC
Bloco 10	Aterro	2,55	16,6	42,3	32	55	-0,811	VC
Bloco 11	Aterro	2,35	1,92	45,1	107	212	0,371	CC

CC = condicionalmente colapsível; VC = verdadeiramente colapsível.

Fonte: Souza Neto (2016).

Para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo foram realizados ensaios triaxiais. As amostras deformadas coletadas nas janelas foram compactadas na energia Proctor Normal na umidade ótima obtidas dos ensaios de compactação, os ensaios realizados nessas amostras foram do tipo CIU-C (consolidado isotrópico não drenado – compressão).

A moldagem dos corpos de prova a partir dos blocos indeformados coletados na área de estudo, foi realizada na condição de umidade natural. Nestes casos os ensaios foram do tipo CID-C. Ademais o bloco 4 e o bloco 11 também tiveram suas amostras amolgadas compactadas na umidade ótima e ensaiadas no triaxial (CID-C).

Os ângulos de atrito e coesões obtidos nos ensaios triaxiais realizados nos corpos de prova dos blocos indeformados e nos corpos de prova compactados na umidade ótima (energia Proctor Normal) das amostras coletadas nas janelas abertas no aterro e das amostras dos blocos 4 e 11 estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Resumo dos ângulos de atritos e coesão.

Amostra	Localização	Coesão (saturada) (kPa)	Ângulo de atrito (saturado) ϕ(°)	Tipo de ensaio
Bloco 1	Terreno natural / jazida	1,3	34,6	CID
Bloco 2	Terreno natural / jazida	4,0	35,1	CID
Bloco 3	Fronteira: terreno natural-aterro	1,2	30,9	CID
Bloco 4	Aterro	2,8	31,4	CID
Bloco 5	Aterro	4,0	32,1	CID
Bloco 6	Aterro	2,0	33,2	CID
Bloco 7	Aterro	2,3	33,5	CID
Bloco 8	Aterro	2,2	33,9	CID
Bloco 9	Aterro	2,8	35,2	CID
Bloco 10	Aterro	4,0	32,6	CID
Bloco 11	Aterro	2,5	33,2	CID
Janela 1 - ECAS 139	Aterro	3,9	35,0	CIU
Janela 2 - ECAS 142	Aterro	3,4	35,8	CIU
Janela 2 - ECAS 145	Aterro	2,4	36,7	CIU
Janela 3 - ECAS 165	Aterro	4,3	35,6	CIU
BL4C	Aterro	4	34	CID
BL11C	Aterro	3	34,5	CID

Fonte: Souza Neto (2016).

5 PROGRAMA DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO ANTES DA SOLUÇÃO DE ESTABILIZAÇÃO

O estudo de instrumentação geotécnica tem por objetivo identificar as fragilidades da área de estudo, os condicionantes naturais de uma encosta e as características geotécnicas. Neste capítulo estão apresentados a metodologia e os resultados e discussões do programa de monitoramento geotécnico utilizado antes da solução de estabilização.

5.1 METODOLOGIA

Os valores são obtidos através de uma sonda sensor, comumente chamado de torpedo, o qual é introduzido em um tubo-guia vertical, fornecendo dados que permitem medir os deslocamentos horizontais de massas de solo. O inclinômetro mede o ângulo de inclinação do tubo-guia com a vertical, na posição em que o torpedo se encontra.

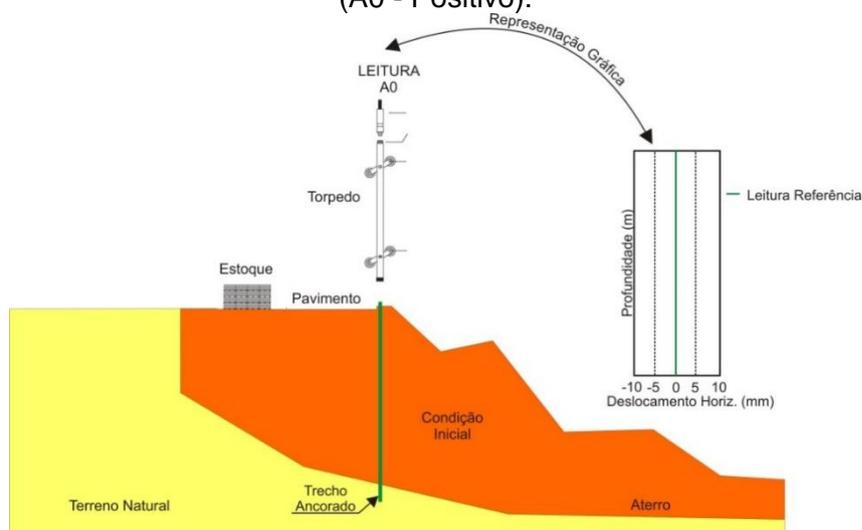
5.1.1 Deslocamentos horizontais

Os deslocamentos horizontais são médios em relação a um valor de referência, que passam a ser o marco zero dos deslocamentos medidos a cada leitura ao longo no período de monitoramento. A seguir estão descritos os procedimentos metodológicos para a leitura de referência e as leituras de monitoramento.

5.1.1.1 Leitura de referência

A leitura de referência é definida através de uma média aritmética dos resultados de até três leituras consecutivas em curto período de tempo. Para cada local há uma leitura de referência específica de acordo com as condições de instalação do tubo guia, conforme poderá ser visto nos resultados de ensaios. A Figura 18 apresenta uma ilustração da condição de campo e a representação gráfica para a leitura de referência.

Figura 18 – Posição Inicial do Inclinômetro no tubo, sendo a roda alta no sentido do talude (A0 - Positivo).

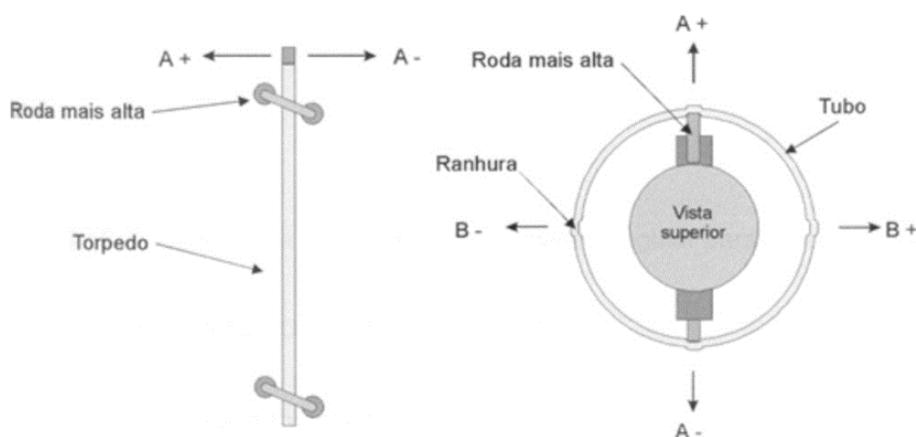


Fonte: Coutinho et al. (2015).

5.1.1.2 Leituras de monitoramento

Para obtenção dos deslocamentos horizontais, primeiramente, foram definidos que o eixo “A” seria o eixo correspondente ao sentido principal do movimento da encosta, sendo e o eixo “B” perpendicular ao eixo “A”, conforme Figura 19. Definidos os eixos, introduzia-se o torpedo com sensor lentamente no interior do tubo-guia até a profundidade final do tubo. Com o torpedo posicionado no final do tubo, à medida que o torpedo vai sendo puxado de baixo para cima, até atingir a extremidade superior do tubo, media-se a inclinação do tubo em intervalos iguais 0,50 m, através da unidade de leitura digital portátil (Digitilt II). A profundidade do torpedo era ajustada de forma a coincidir com um valor inteiro (em metros) da escala marcada no cabo.

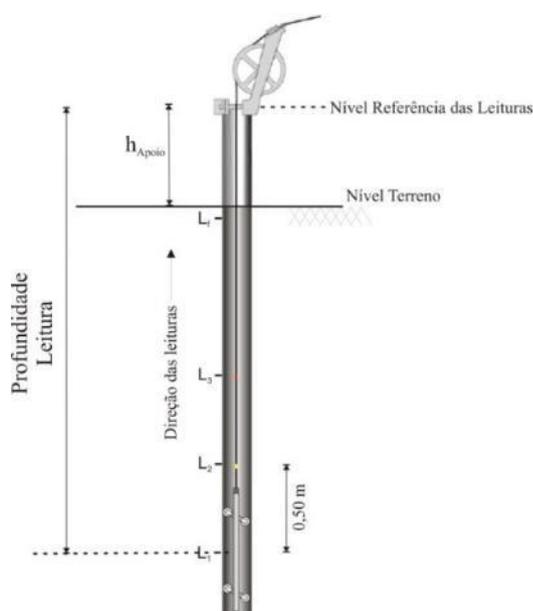
Figura 19 – Orientação do torpedo no tubo guia.



Fonte: Coutinho et al. (2015).

O nível de referência das leituras ficou definido como sendo a boca de cada tubo, conforme Figura 20. Em cada profundidade foram procedidas duas medições; sendo a primeira, com a roda superior do torpedo na direção do movimento “A0” e, após terminar todas as leituras nesta posição, o torpedo foi girado em 180 graus, posicionado no fundo do tubo e posteriormente, realizavam-se as leituras “A180” nas mesmas profundidades, conforme. Após a leitura completa do eixo “A0” e “A180”, procede-se as leituras do eixo “B0” e “B180” adotando a mesma metodologia para o eixo “A”.

Figura 20 – Definição do nível de referência para as leituras.

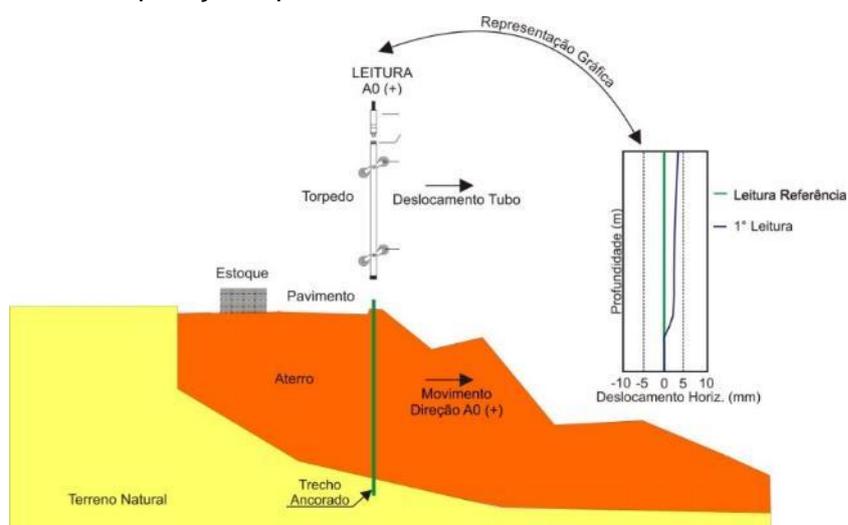


Fonte: Coutinho et al. (2015).

Os valores indicados no painel da unidade de leitura digital são proporcionais ao ângulo de inclinação θ que o torpedo faz com a vertical. Para cada eixo, foram obtidas duas leituras em cada profundidade, onde no programa de cálculo foi utilizada a leitura combinada, procurando-se assim, eliminar possíveis erros de leitura.

Os cálculos para determinação dos ângulos de inclinação com a vertical do tubo-guia e dos deslocamentos horizontais foram realizados através do programa DigiPro 2, da Slope Indicator. Na Figura 21, verifica-se um modelo de representação gráfica onde constam a leitura de referência e a 1ª Leitura, realizada normalmente 15 dias após a leitura de referência. No caso hipotético, observa-se que houve um deslocamento positivo, ou seja, no sentido descendente da encosta.

Figura 21 – Comparação hipotética entre a 1ª Leitura e Leitura de Referência.



Fonte: Coutinho et al. (2015).

A realização das leituras foi definida, a princípio, a cada 15 dias sendo em seguida adaptado no decorrer do tempo de acordo com a tendência do movimento, tendo como referência a análise dos resultados obtidos.

As primeiras leituras, foram realizadas após um período mínimo de 48 horas da instalação dos tubos-guia, onde foram realizadas uma série leituras para cada vertical. Estas leituras foram consideradas as leituras de referência, comparando-as com as leituras posteriores, para determinação dos deslocamentos horizontais ocorridos.

5.2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A seguir estão apresentados os resultados e as discussões para as regiões dos Aterros 1 e 2 quanto aos deslocamentos horizontais em profundidade, aos deslocamentos horizontais resultante máximo e ângulo de inclinação com a vertical, bem como a evolução temporal e espacial dos vetores resultantes dos deslocamentos horizontais em diferentes profundidades.

5.2.1 Dados dos inclinômetros

O monitoramento por inclinômetro visa medir ângulos de inclinação e deslocamentos dos movimentos horizontais do subsolo. A rede de monitoramento antes da execução das medidas de intervenção contou com 5 inclinômetros instalados em diferentes profundidades, sendo dois instalados na Região Aterro 1 (I-1, I-2 e I-1N) e outros dois instrumentos localizados na Região Aterro 2 (I-3 e I-4) (Figura 22).

Os inclinômetros fizeram leitura desde julho de 2015, e apresentam leituras finais em datas distintas, como pode ser observado no Quadro 5. Os instrumentos I-3 e I-4, situados na região do Aterro 2 compreendem maior intervalo de leitura.

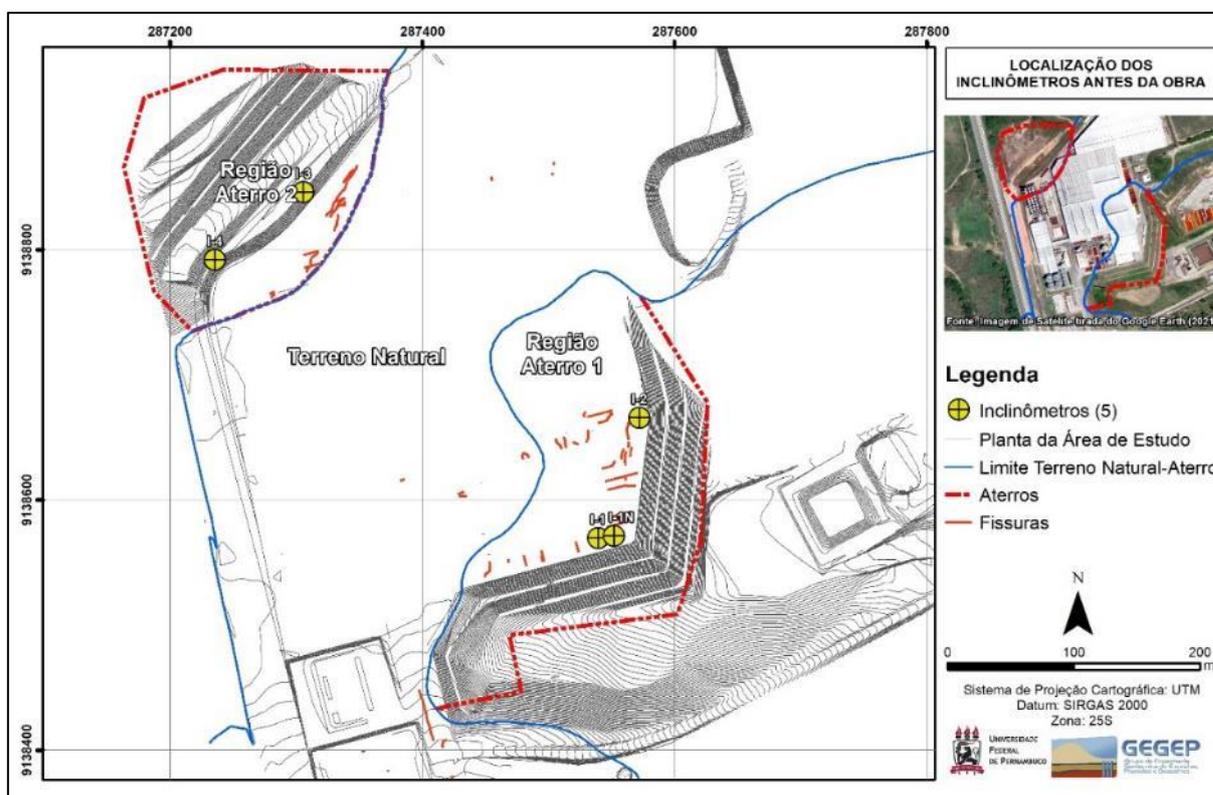
Quadro 5 – Datas de leituras dos instrumentos.

Inclinômetro	Data Instalação		L (m) Total	Profundidade Leituras (m)*		
	Início	Fim		L _i – Leitura Inicial (mais profunda)	L _f – Leitura Final (mais superficial);	ΔL - Intervalo entre leituras.
I-1	01/07/2015	29/09/2015	27,50	27,00	0,50	0,50
I-1N	28/01/2016	09/03/2016	29,50	29,00	0,50	0,50
I-2	29/07/2015	09/12/2015	30,00	29,50	0,50	0,50
I-3	18/06/2015	07/04/2016	26,40	26,00	0,50	0,50
I-4	25/06/2015	07/04/2016	27,15	27,00	0,50	0,50

Fonte: O Autor (2022).

As leituras de inclinômetros indicam que os taludes estão movimentando nas regiões de contato entre o solo natural e o solo compactado. Para todas verticais (I-1, I-2, I-3 e I-4), verifica-se deformações totais crescentes, iniciando na região de mudança de material, comumente definida como zona de contato.

Figura 22 – Posição de instalação dos inclinômetros antes da execução da obra.



Fonte: O Autor (2022), adaptado de Coutinho et al. (2015).

Os deslocamentos medidos do tubo de inclinômetro são obtidos para dois eixos perpendiculares entre si: “Eixo A” e “Eixo B”. Para obtenção do movimento resultante, realiza-se a composição destes deslocamentos o movimento resultante de campo.

Durante a campanha de leituras, alguns tubos apresentaram condições restritivas para a realização das leituras ou perda da capacidade de indicar os movimentos horizontais devido à falta de ancoragem na ponta. A seguir, apresentam-se os locais com tubos inoperantes (Quadro 6). Com isso, os resultados do I-1 a partir do dia 29/09/2015 e do I-1N não foram apresentados, pois não possuem confiabilidade e representatividade da movimentação ocorrida.

Quadro 6 – Registro da ocorrência nos Inclinômetros durante a última tentativa de leitura.

Tubo	Data Ocorrência	Ocorrência
IN-1	09/10/2016	Deslocamento horizontal ao longo do tubo, inclusive no trecho ancorado no terreno de maior resistência.
IN-1N	09/03/2016	Bloqueio ao deslocamento vertical do torpedo de leitura à aproximadamente 23,00 m e no dia 22/03/2016 o bloqueio foi a 13,00 m. Estes acontecimentos ocorreram após a instalação de tirantes nas proximidades do tubo.

Fonte: O Autor (2022), adaptado de Coutinho et al. (2015).

5.2.1.1 Análise dos deslocamentos horizontais em profundidade

A seguir estão apresentados os resultados e as discussões dos deslocamentos horizontais em profundidade para as regiões dos Aterros 1 e 2.

5.2.1.1.1 Região Aterro 1

No caso do inclinômetro I-1 (Figura 23), nota-se que estava ocorrendo deslocamento máximo na superfície acumulado da ordem de 22mm no sentido sudeste, sendo 13mm no sentido sul e 15mm no sentido leste. Este comportamento se estendia ao longo de todo comprimento do tubo, limitado na profundidade de 27,5m, onde no SPT mostra um incremento no número de golpes.

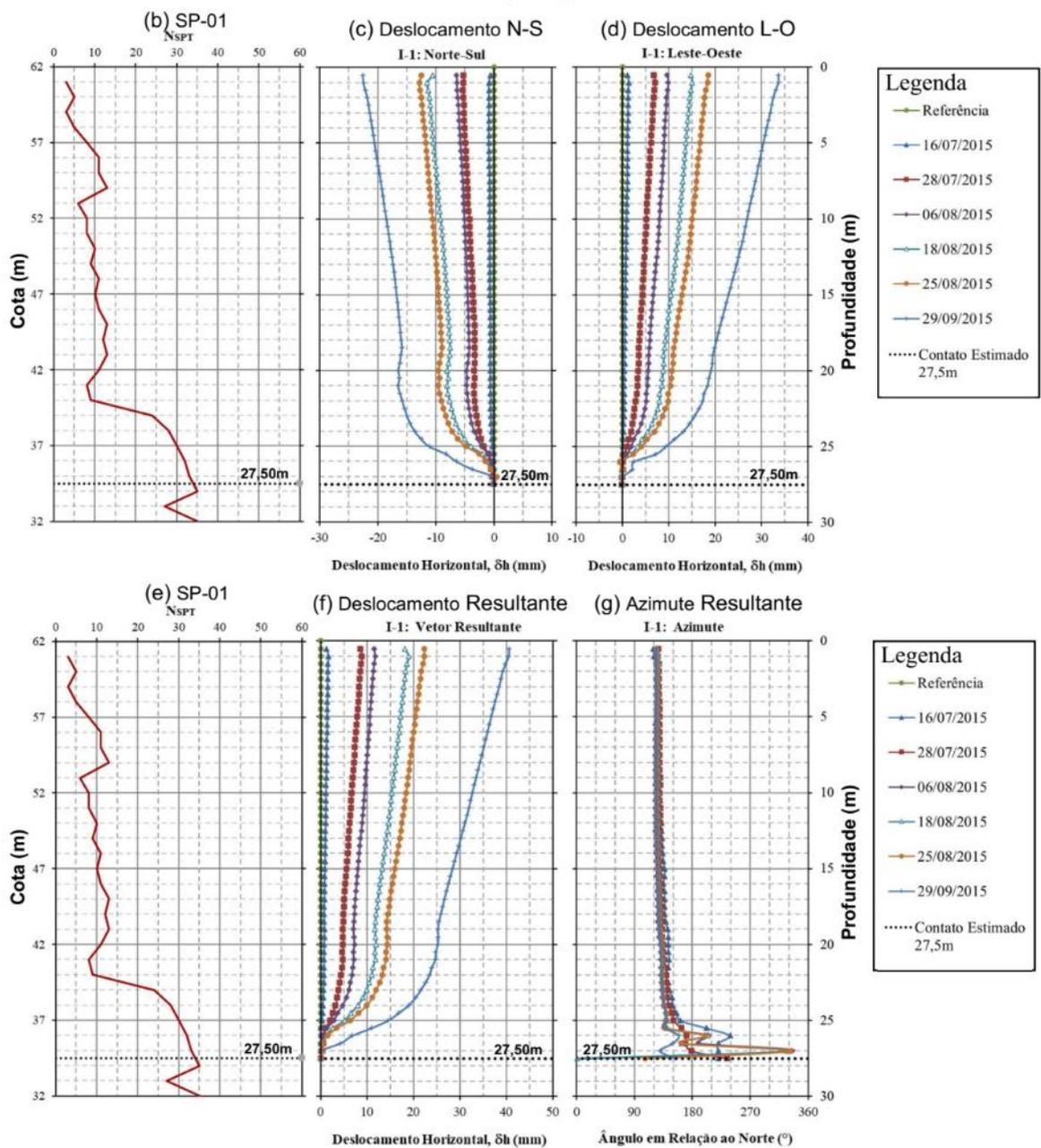
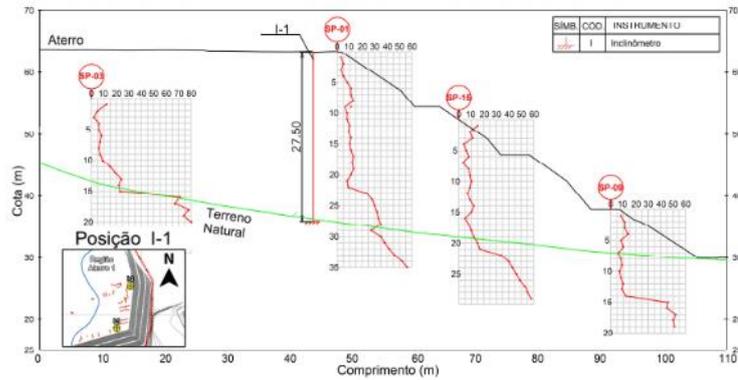
No caso do inclinômetro I-2 (Figura 24c), percebe-se que o deslocamento na direção Norte-Sul não apresentava componente significativo na superfície. O deslocamento foi crescendo em profundidade, atingindo o seu máximo por volta das cotas 47m e 42m, cuja valor é próximo a 12,5mm no sentido sul. A partir desse ponto o deslocamento tende a zero até próximo o limite de contato entre as duas camadas (aterro e solo compactado), que ocorre por volta de 25,1m. A partir desse ponto o

deslocamento volta a crescer no sentido sul atingindo 5mm e retornando a zero na base do instrumento.

No que se refere ao deslocamento na direção Leste-Oeste do I-2 (Figura 24d), percebe-se que até a cota 42m o deslocamento apresentava sentido oeste, atingindo o máximo de 7,5mm, em profundidade inferior a 5m. Pode ser observado que entre as leituras de 26/10/2015 e 24/11/2015 houve um acréscimo de 5mm para esse trecho do deslocamento. Por volta da cota 42m percebe-se que o deslocamento muda de sentido, passando agora a direção leste, cujo máximo da ordem de 7,5mm é atingido em 25m de profundidade, ou seja, próximo a zona limite entre as duas camadas. A partir daí, o deslocamento tende a mudar de sentido novamente atingindo o máximo por volta de 5mm no sentido oeste na cota 34m, e retorna a zero na base do instrumento.

Figura 23 – Resultados do inclinômetro I-1.

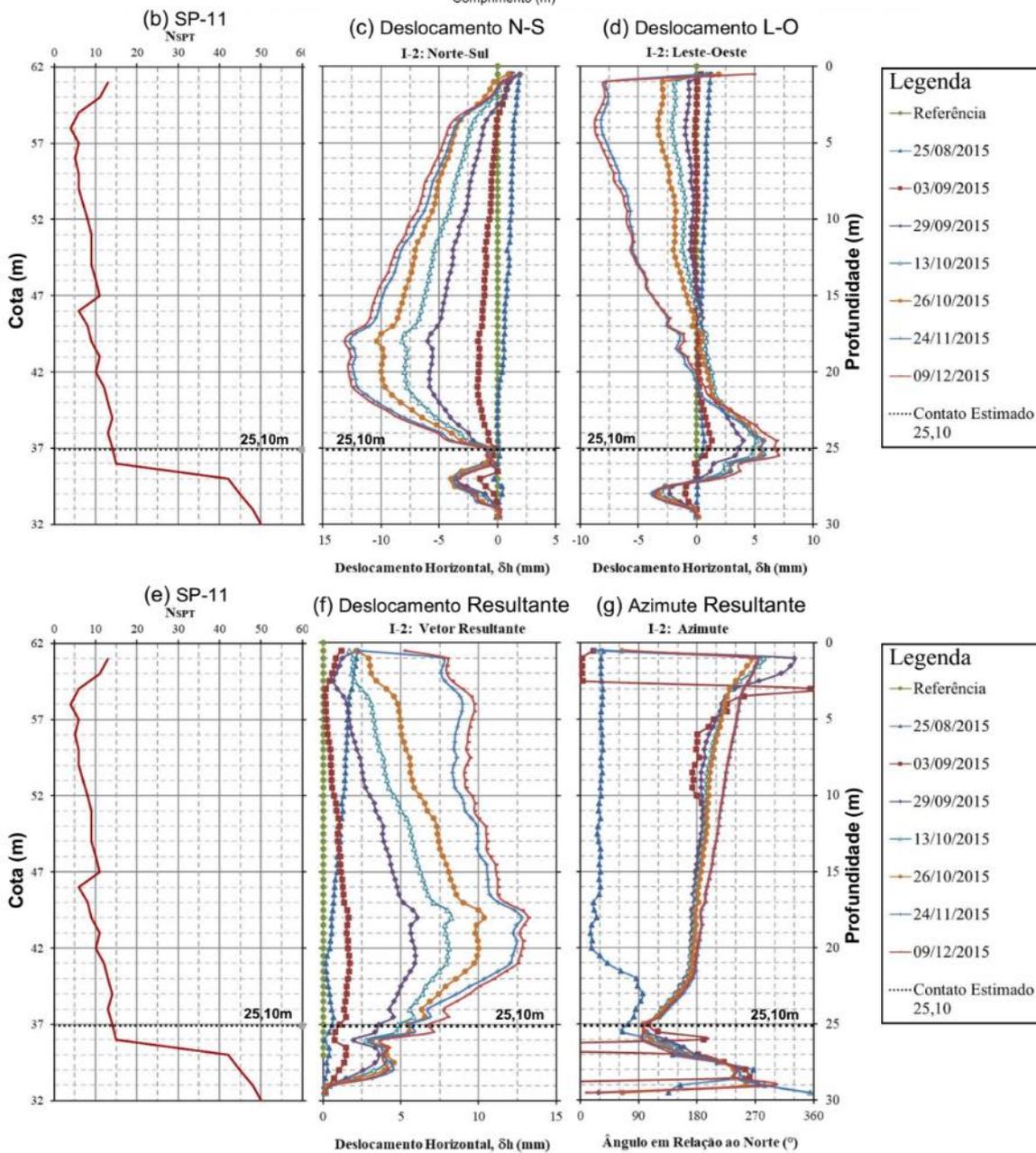
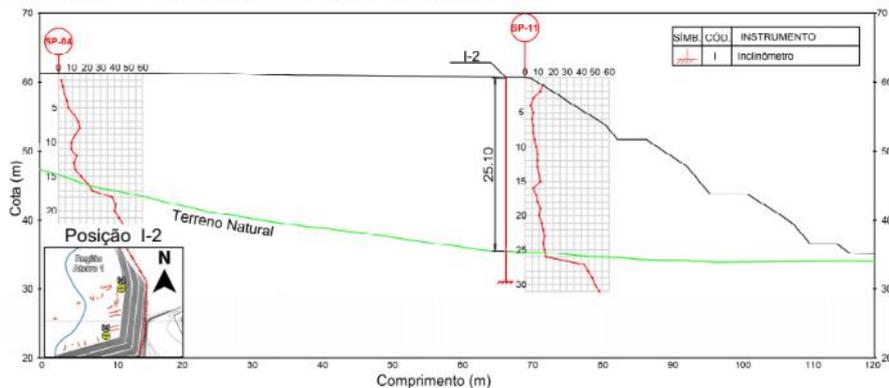
(a) Ilustração da Seção do I-1 com respectivas sondagens.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 24 – Resultados do inclinômetro I-2.

(a) Ilustração da Seção do I-2 com respectivas sondagens.



Fonte: O Autor (2022).

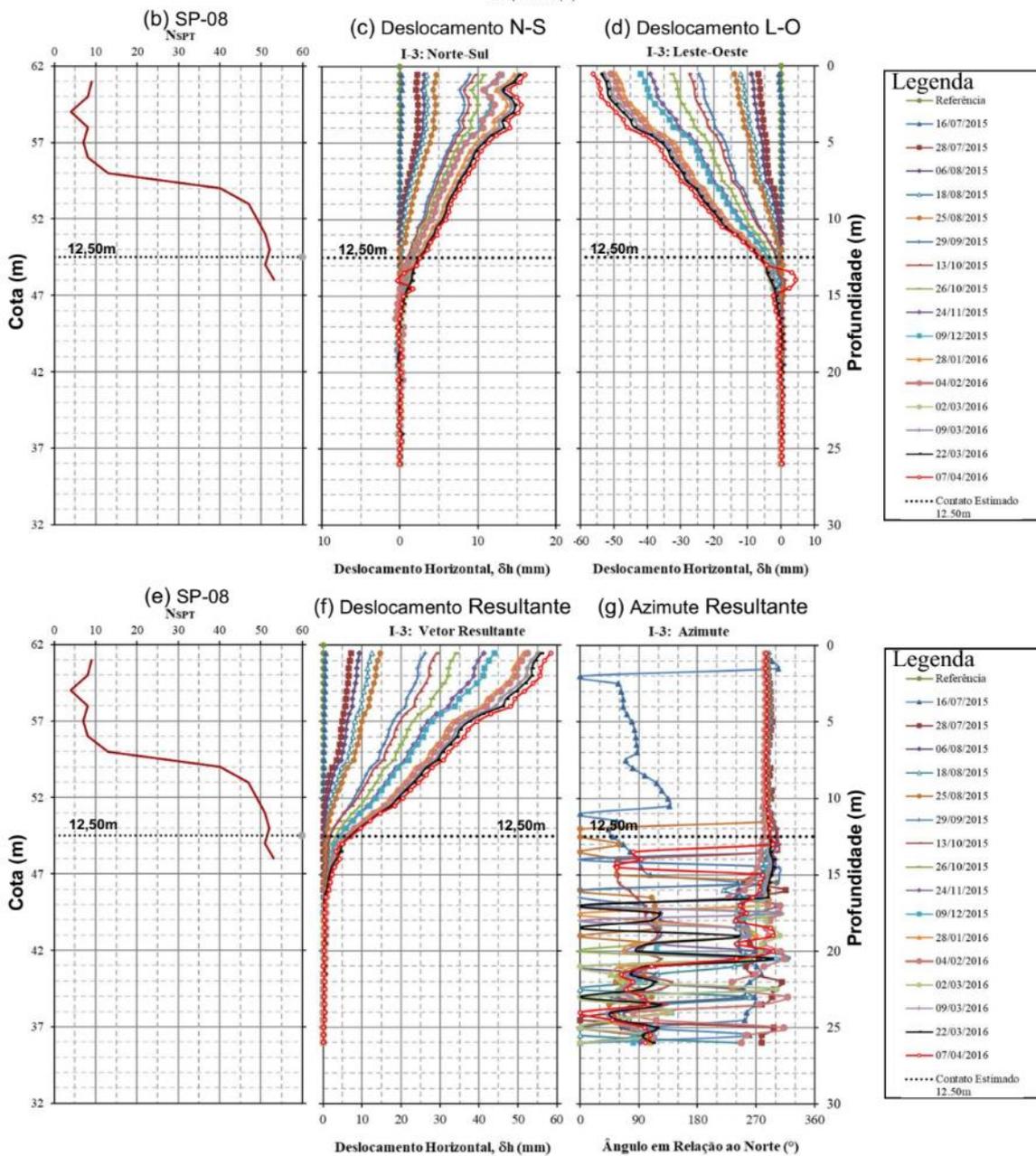
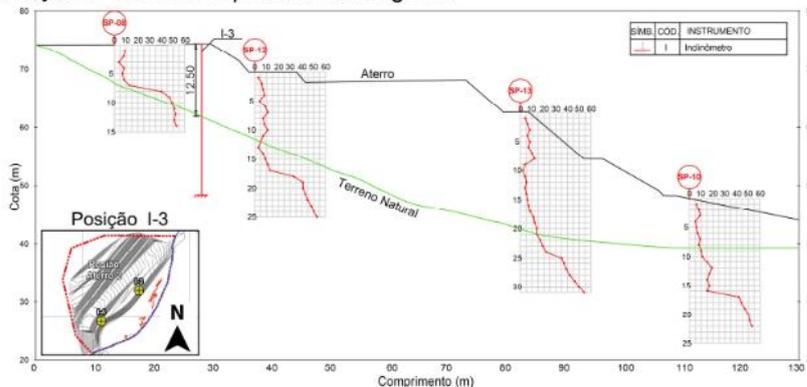
5.2.1.1.2 Região Aterro 2

O inclinômetro I-3 (Figura 25) apresenta deslocamento máximo na superfície acumulado de aproximadamente de 60mm, sendo 15mm no sentido norte e 55mm no sentido oeste. Este comportamento se estende ao longo do comprimento do tubo, tendendo a zero na cota de 47m, próximo a zona do limite de contato entre as camadas (profundidade de 12,5m), correspondendo a profundidade que não há mais resultados do ensaio SPT.

O inclinômetro I-4 (Figura 26) apresenta deslocamento máximo na superfície acumulado de aproximadamente de 52mm, sendo 40mm no sentido norte e 40mm no sentido oeste. Este comportamento se estende ao longo do comprimento do tubo, tendendo a zero na cota de 39m, próximo a zona do limite de contato entre as camadas (profundidade de 22,6m), correspondendo a profundidade em que há incremento nos resultados do ensaio SPT. Salienta-se o fato de que o deslocamento na direção Leste-Oeste (Figura 26d) apresenta uma incompatibilidade de leituras até a profundidade de 3m nas datas 09/03/2016 e 22/03/2016, cujo sentido se daria para leste. Estes dados se apresentam incompatíveis com o comportamento do deslocamento medido no instrumento em diferentes datas, de modo a ser desconsiderado.

Figura 25 – Resultados do inclinômetro I-3.

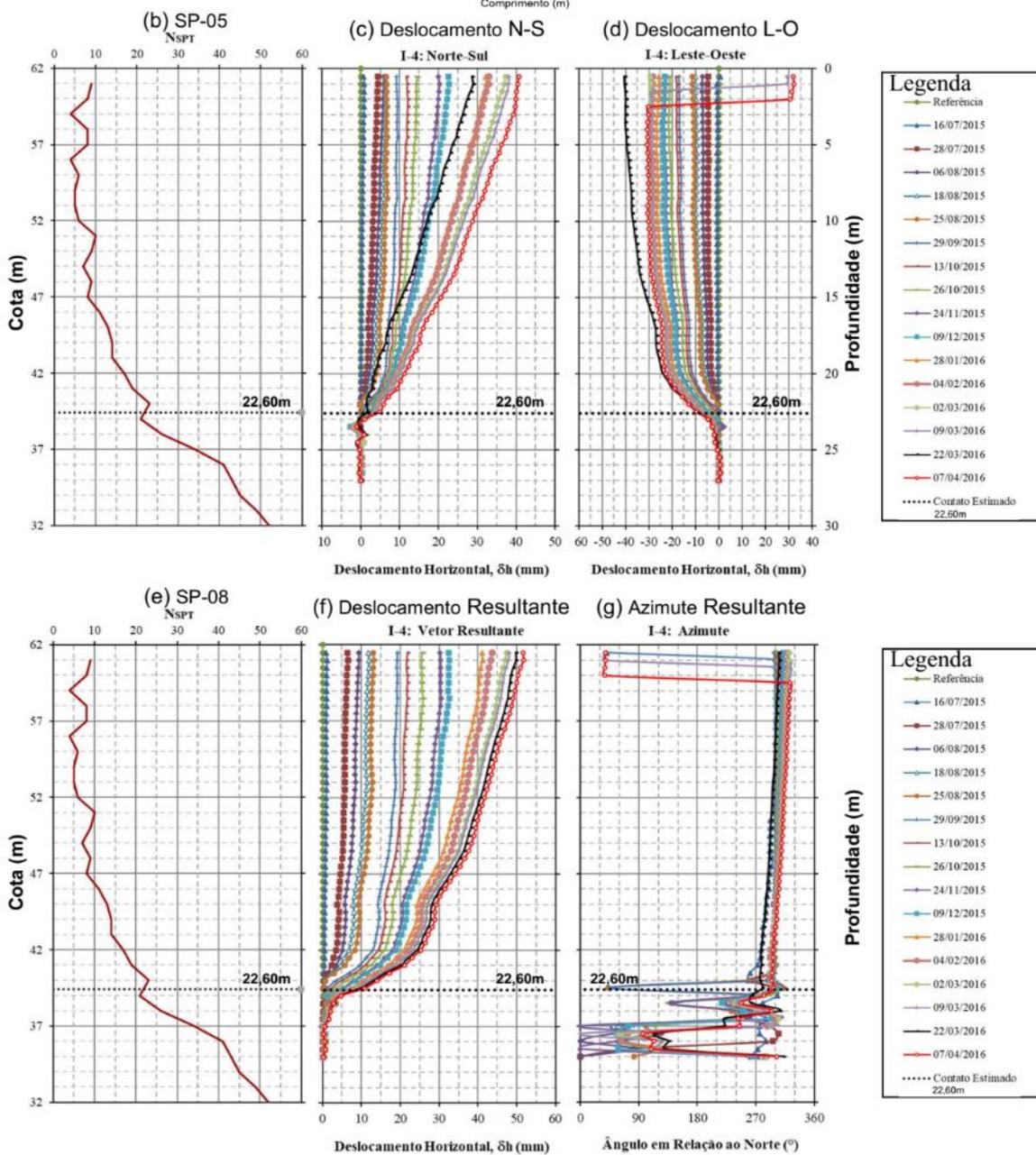
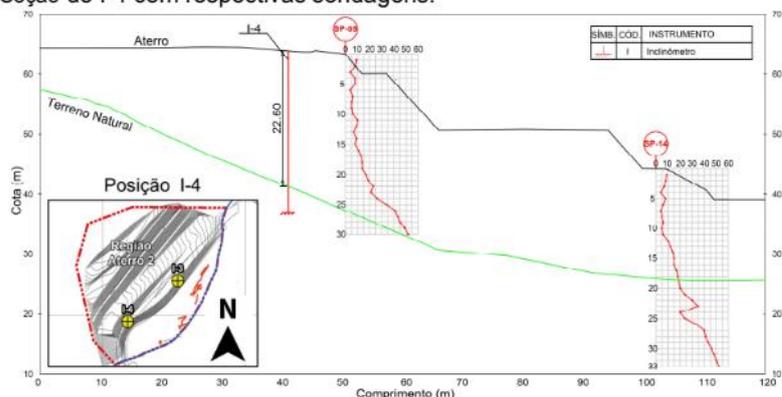
(a) Ilustração da Seção do I-3 com respectivas sondagens.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 26 – Resultados do inclinômetro I-4.

(a) Ilustração da Seção do I-4 com respectivas sondagens.



Fonte: O Autor (2022).

5.2.1.2 Análise pontual do deslocamento horizontal resultante máximo ($Y_{\text{máx}}$) e ângulo de inclinação com a vertical (θ)

A partir das informações da instrumentação, verificou-se os deslocamentos horizontal resultante máximos e sua respectiva velocidade em duas profundidades: na superfície (Cota 62m e Profundidade 0,5m) e na cota onde se observa o deslocamento máximo, sendo um indicativo da zona com maior deformação. As cotas e profundidades de leituras de deslocamento máximo analisadas para os diferentes instrumentos estão dispostas no Quadro 7.

Quadro 7 – Cota e profundidade de deslocamento máximo analisada.

Instrumento	Cota de deslocamento máximo	Profundidade de deslocamento máximo
I-1	37m	25,5m
I-2	44,5m	18m
I-3	52m	10,5m
I-4	40m	22,5m

Fonte: O Autor (2022).

Foi ainda analisado a evolução da variação de ângulo de inclinação em relação a vertical para a cota e profundidade em que se observa a maior inclinação. Para esta análise foi verificado o ângulo formado em relação a vertical para os dois eixos A e B.

5.2.1.2.1 Região Aterro 1

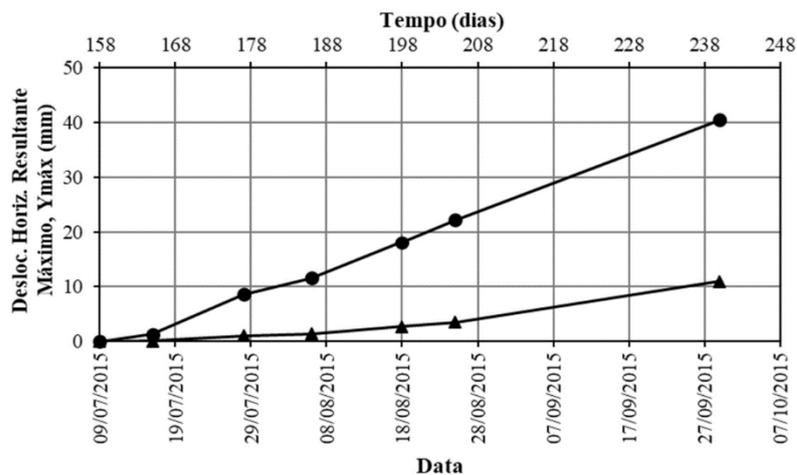
Os dados do Inclinômetro I-1 apresentados na Figura 27a, demonstram que o deslocamento é maior na superfície (Cota 62m e Profundidade 0,5m), com uma tendência de crescimento quase linear, atingindo 40mm em um intervalo de tempo de 82 dias. Além disso, observa-se que a velocidade do deslocamento (Figura 27b), por consequência, também é maior na superfície, sendo observada uma tendência de redução para as leituras finais. No caso da velocidade na cota 37m, percebe-se uma tendência de crescimento ao longo de toda a série, porém com valores menores do que 0,25mm/dia.

A variação do ângulo para o inclinômetro I-1 dispostos na Figura 28, para a cota 37m, cuja profundidade corresponde a profundidade de 22,5m, tem comportamento convergente para os dois eixos até 28/07/2015. A partir dessa data, os eixos apresentam comportamento de crescimento com tendência linear equivalente para os eixos, porém em sentidos diferentes.

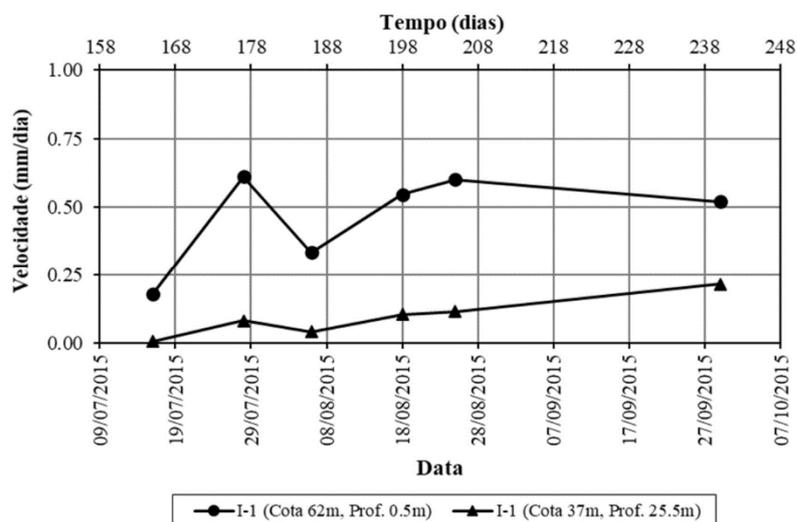
Com relação ao Inclínômetro I-2 percebe-se que o deslocamento horizontal máximo (Figura 29a) ocorre na cota 44,5m que corresponde a profundidade de 18m, sendo observada uma tendência de crescimento praticamente linear até 26/10/2015. Posteriormente o deslocamento atinge o valor máximo de 13mm em 09/12/2015, correspondendo a um período de análise de 110 dias. A velocidade (Figura 29b) para esta mesma cota tem comportamento praticamente linear, com uma leve tendência de redução a partir de 26/10/2015. No caso da cota superficial, percebe-se uma redução inicial da velocidade, seguido por uma tendência de estabilização da velocidade e incremento a partir de 24/11/2015.

A variação do ângulo para o inclinômetro I-2 dispostos na Figura 30, para a cota 62m, que corresponde a profundidade de 0,5m, tem comportamento convergente para os dois eixos até 03/09/2015. A partir dessa data, os eixos apresentam comportamento de crescimento com tendência linear, porém em sentidos diferentes. Percebe-se que o eixo A apresenta uma taxa de crescimento mais acelerado que o eixo B, que atingem $1,46^\circ$ e $-0,20^\circ$, respectivamente, na data final.

Figura 27 – Deslocamento horizontal máximo e velocidade para o I-1.

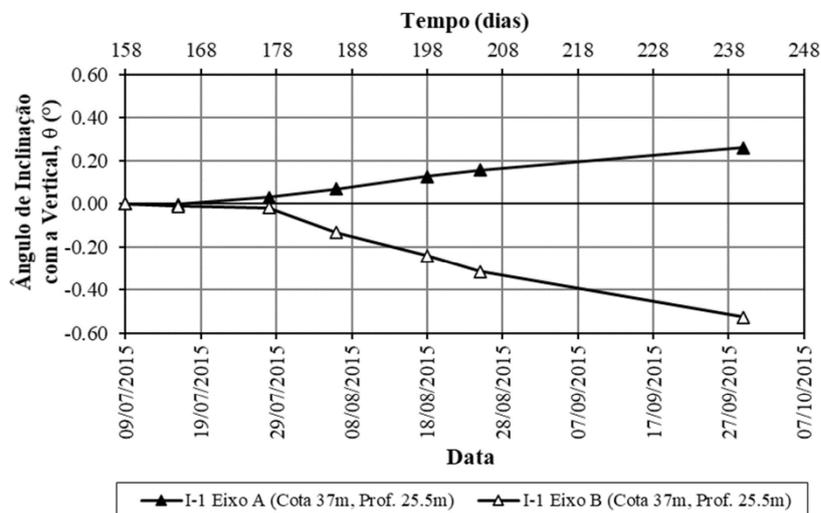
(a) Deslocamentos Horizontal Resultante Máximo ($Y_{\text{máx}}$) vs Tempo para o I-1

(b) Velocidade vs Tempo para o I-1



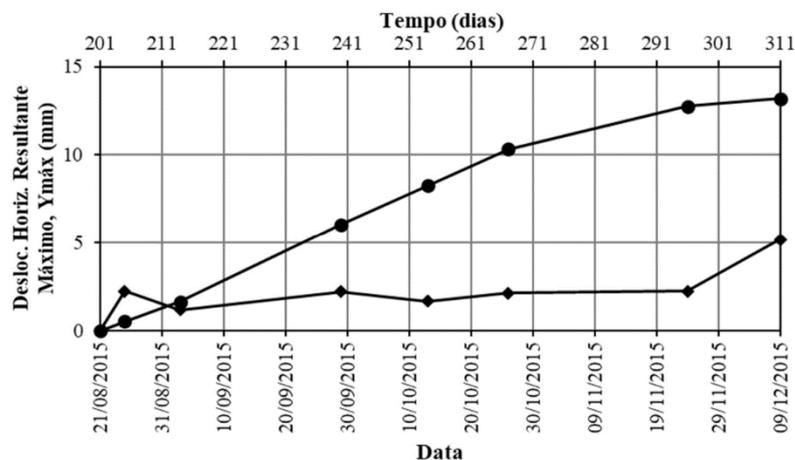
Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2015).

Figura 28 – Ângulo de inclinação em relação a vertical para o inclinômetro I-1.

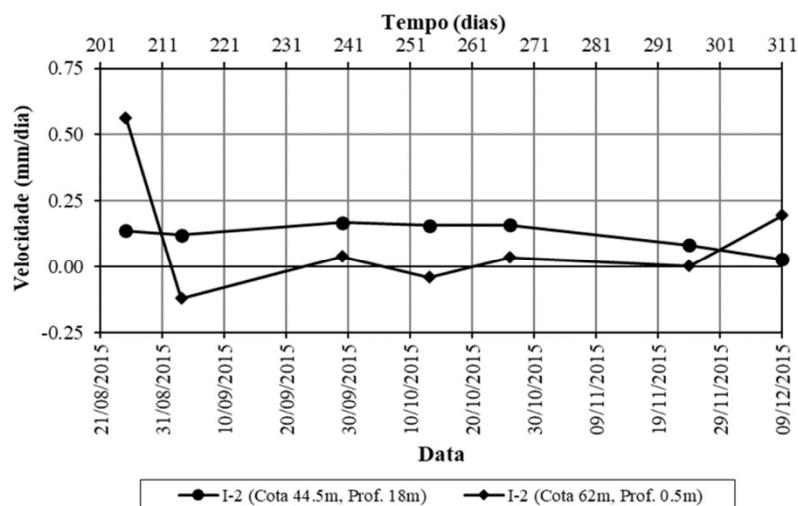


Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2015).

Figura 29 – Deslocamento horizontal máximo e velocidade para o I-2.

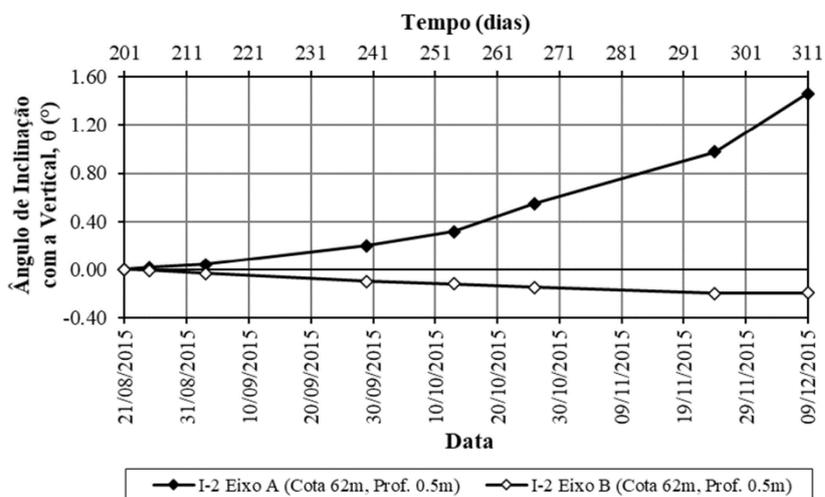
(a) Deslocamentos Horizontal Resultante Máximo ($Y_{\text{máx}}$) vs Tempo para o I-2

(b) Velocidade vs Tempo para o I-2



Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2015).

Figura 30 – Ângulo de inclinação em relação a vertical para o inclinômetro I-2.



Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2015).

5.2.1.2.2 Região Aterro 2

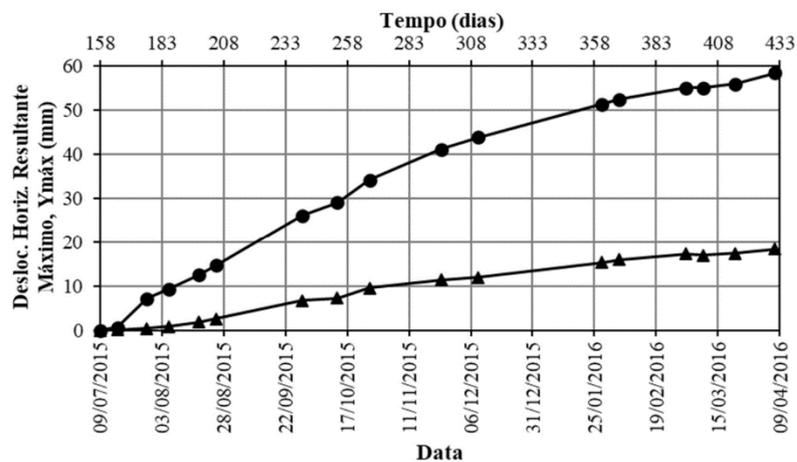
O deslocamento horizontal máximo do inclinômetro I-3 (Figura 31a) é maior para a cota superficial com tendência de crescimento praticamente linear, atingindo 58mm em 275 dias. A velocidade dos deslocamentos (Figura 31b) é maior para a profundidade de 0,5m, apresentando oscilações, porém com tendência geral de redução, especialmente a partir de 26/10/2015. A partir de 09/03/2016 percebe-se um aumento da velocidade atingindo 0,16mm/dia na última leitura. Pode-se observar que a velocidade calculada para a cota 52m, que corresponde a profundidade de 10,5m, apresenta comportamento similar ao da cota superficial, correspondendo as tendências de aumento e redução ao longo da série, entretanto com valores menores, atingindo 0,06mm/dia em 07/04/2016.

A variação do ângulo para o inclinômetro I-3 dispostos na Figura 32, para a cota 52m, que corresponde a profundidade de 10,5m, tem comportamento convergente para os dois eixos até 28/07/2015. A partir dessa data, os eixos apresentam comportamento de crescimento com tendência linear, porém em sentidos diferentes. Os dois eixos crescem com praticamente a mesma taxa.

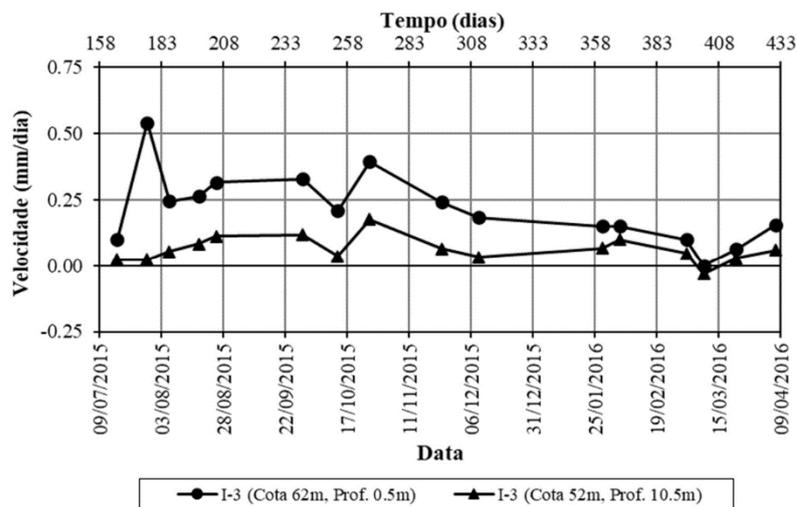
Em relação ao deslocamento horizontal máximo do Inclinômetro I-4 (Figura 33a), percebe-se que as duas cotas apresentam comportamento de crescimento praticamente linear, porém com maiores valores para a cota superficial (profundidade 0,5m), sendo observado o valor máximo de 52mm ao final das leituras (em 07/04/2016). As velocidades observadas para as duas cotas (Figura 33b) apresentam comportamento similar, com os mesmos trechos de crescimento e redução da velocidade. Entretanto, nota-se que a velocidade da cota superior tem maior velocidade, a qual atinge 0,12mm/dia ao final das leituras.

A variação do ângulo para o inclinômetro I-4 dispostos na Figura 34, para a cota 40m, que corresponde a profundidade de 22,5m, tem comportamento convergente para os dois eixos até 25/08/2015. A partir dessa data, os eixos apresentam comportamento de crescimento com tendência linear, porém em sentidos diferentes. Percebe-se que o Eixo A cresce com uma taxa maior do que o eixo B, de modo que atingem $0,7^\circ$ e $-0,18^\circ$, respectivamente, ao final da leitura.

Figura 31 – Deslocamento horizontal máximo e velocidade para o I-3.

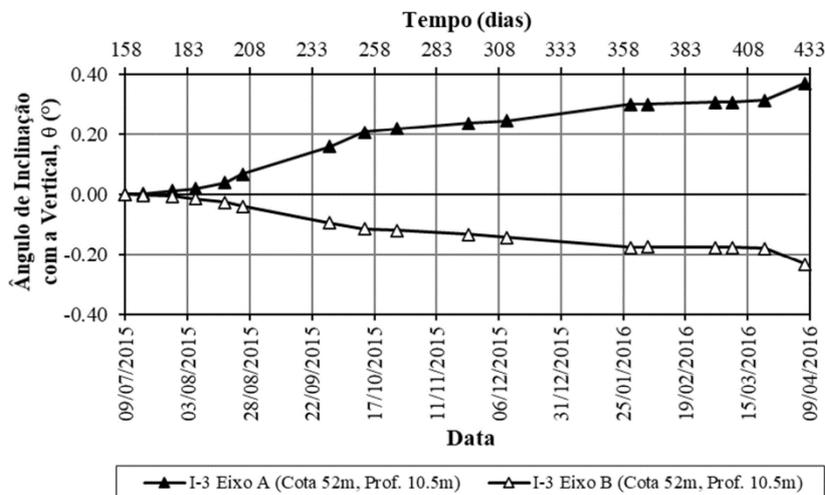
(a) Deslocamentos Horizontal Resultante Máximo ($Y_{\text{máx}}$) vs Tempo para o I-3

(b) Velocidade vs Tempo para o I-3



Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2015).

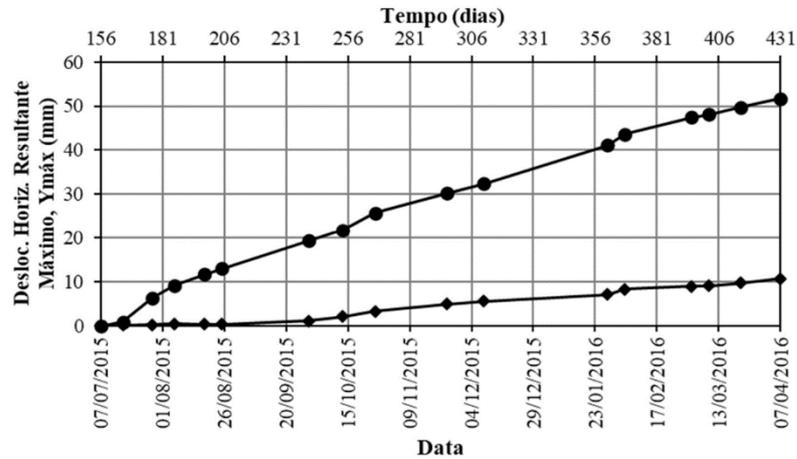
Figura 32 – Ângulo de inclinação em relação a vertical para o inclinômetro I-3.



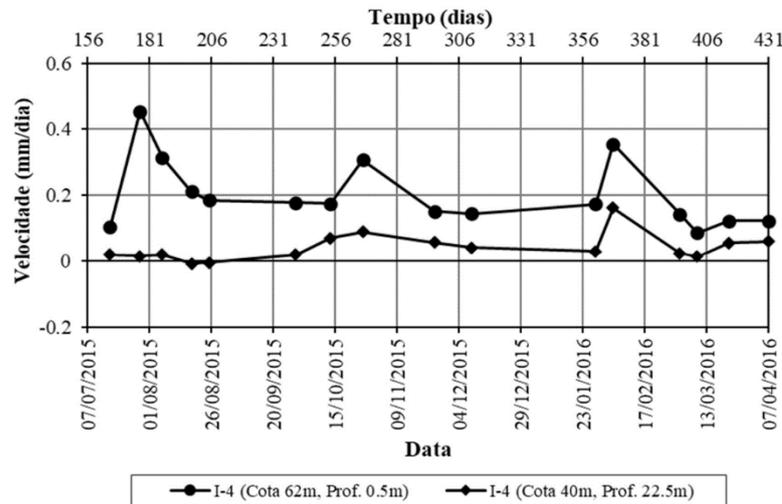
Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2015).

Figura 33 – Deslocamento horizontal máximo e velocidade para o I-4.

(a) Deslocamentos Horizontal Resultante Máximo ($Y_{m\acute{a}x}$) vs Tempo para o I-4

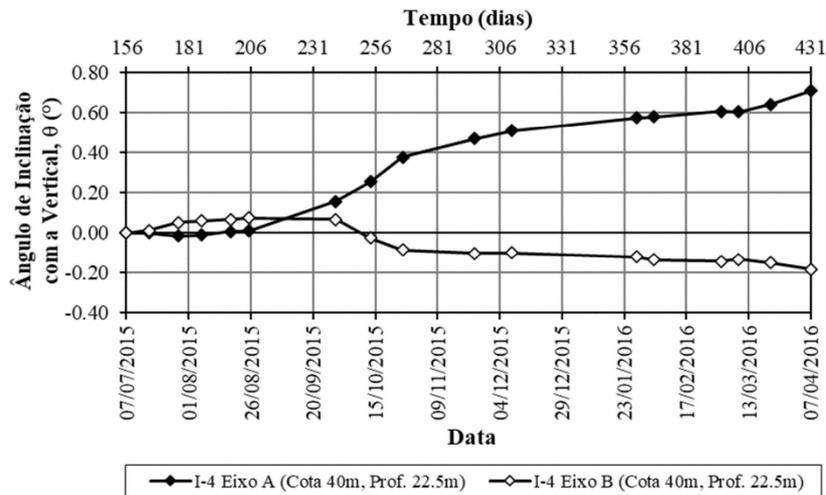


(b) Velocidade vs Tempo para o I-4



Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2015).

Figura 34 – Ângulo de inclinação em relação a vertical para o inclinômetro I-4.



Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2015).

5.2.1.3 Análise da evolução temporal e espacial dos vetores resultantes dos deslocamentos horizontais em diferentes profundidades

As figuras apresentam uma série de mapas que representam a evolução temporal e espacial dos vetores resultantes dos deslocamentos horizontais em diferentes profundidades para o Aterro 1 (Figura 35) e para o Aterro 2 (Figura 36). A metodologia para a construção dos mapas se deu com a representação do vetor resultante, ou seja, da magnitude e direção (azimute) dos deslocamentos horizontais medidos por meio de inclinômetros e que estão ilustrados por setas. A magnitude dos deslocamentos é dada em milímetros e a direção em azimute, a variação das cores da seta indica a variação do tempo, também são indicadas as cotas e profundidades analisadas.

5.2.1.3.1 Região Aterro 1

Na Figura 35a podemos visualizar a localização dos I-1 e I-2 e os vetores resultantes variando com o tempo na cota 62m e profundidade de 0,50m. Nesse mapa observa-se que os vetores do I-1 apresentam a direção em torno de 125° , destacando-se na cor verde o vetor com maior intensidade sendo ela 40,52mm na data 29/09/2015. No I-2 é destacado a maior magnitude no dia 09/12/2015 que apresenta deslocamento de 5,20mm e Azimute medindo $69,57^\circ$.

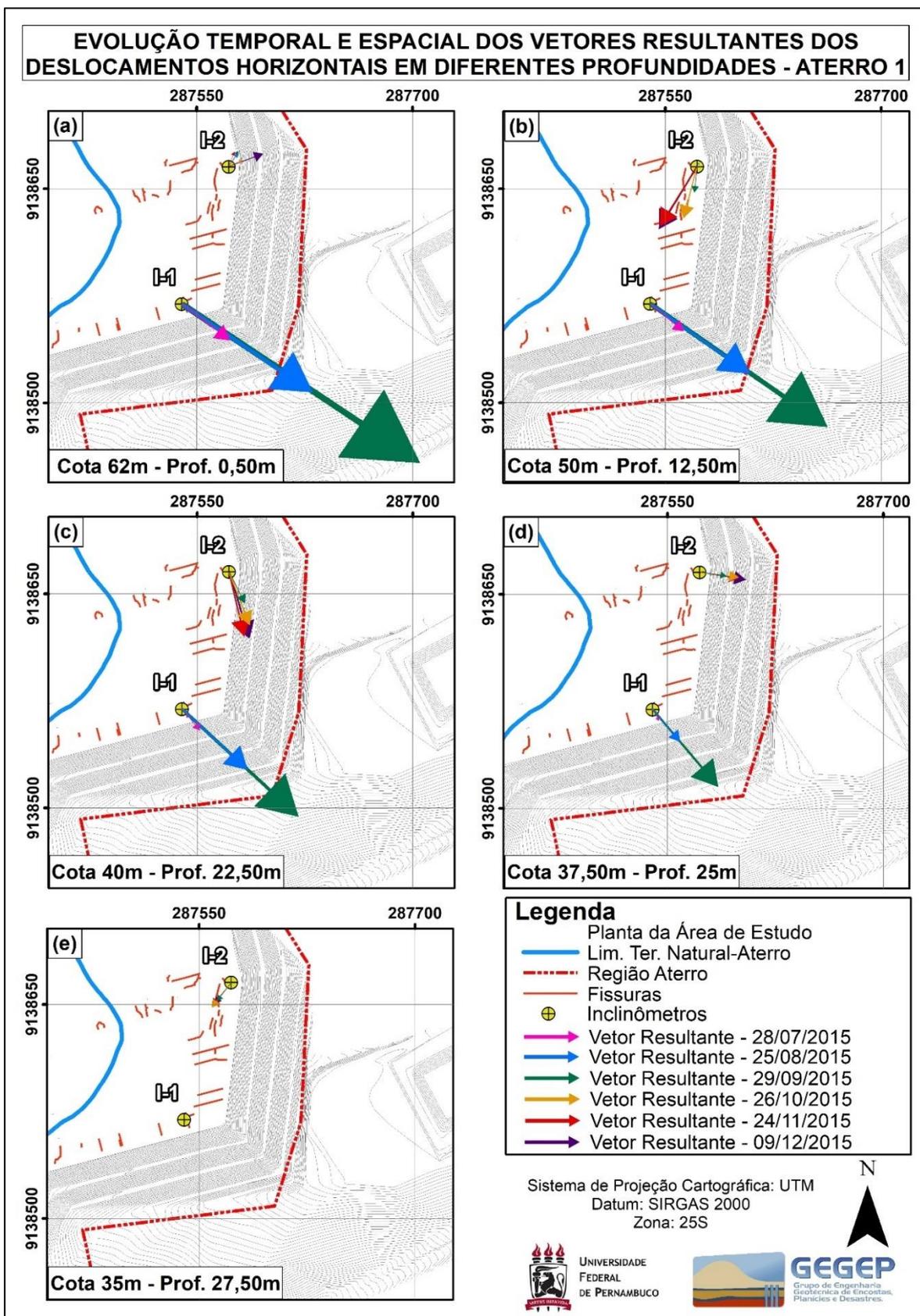
Os vetores resultantes para cota de 50m e profundidade 12,5m são apresentados na Figura 35b. Os vetores do I-1 apresentam a direção em torno de 125° , destacando-se na cor verde o vetor com maior intensidade sendo ela 30,53mm na data 29/09/2015. No I-2 os vetores apresentam a direção em torno de 200° , é destacado as maiores magnitudes nos dias 09/12/2015 e 24/11/2015 que apresentam deslocamento de 10,48mm e 9,94mm respectivamente.

Analisando a Figura 35c, considerando a cota de 40m e profundidade de 22,5m, é possível observar que no I-1 os vetores resultantes apresentam direção em torno de 135° , com maior intensidade de 22,7mm no dia 29/09/2015 e menor intensidade de 4,12mm no dia 28/07/2015. No I-2 os vetores apresentam a direção em torno de 160° , com maior intensidade de 10,02mm no dia 09/09/2019 e menor intensidade de 0,36 mm no dia 25/08/2015.

Observa-se na Figura 35d a representação dos vetores resultantes na cota 37,5m e profundidade 25m, no I-1 os vetores mostram uma direção medindo em torno

de 140° , mostrando maior intensidade de 14,56mm no dia 29/09/2015 e menor intensidade de 2,10mm no dia 28/07/2015. Percebe-se que no I-2 os vetores apresentam direção em torno de 98° , com maior intensidade em torno de 6,73mm. Analisando a Figura 35e, considerando a cota 35m e profundidade 27,50m, os valores de intensidade no I-1 estão em torno de 0,10 e azimute variando entre 106° e 234° , no I-2 a direção dos vetores está em torno de 215° , com maior intensidade no dia 26/11/2015 medindo 4,55mm e menor intensidade no dia 25/08/2015 medindo 0,23mm.

Figura 35 – Evolução temporal e espacial dos vetores resultantes em diferentes profundidades para o Aterro 1.



Fonte: O Autor (2022).

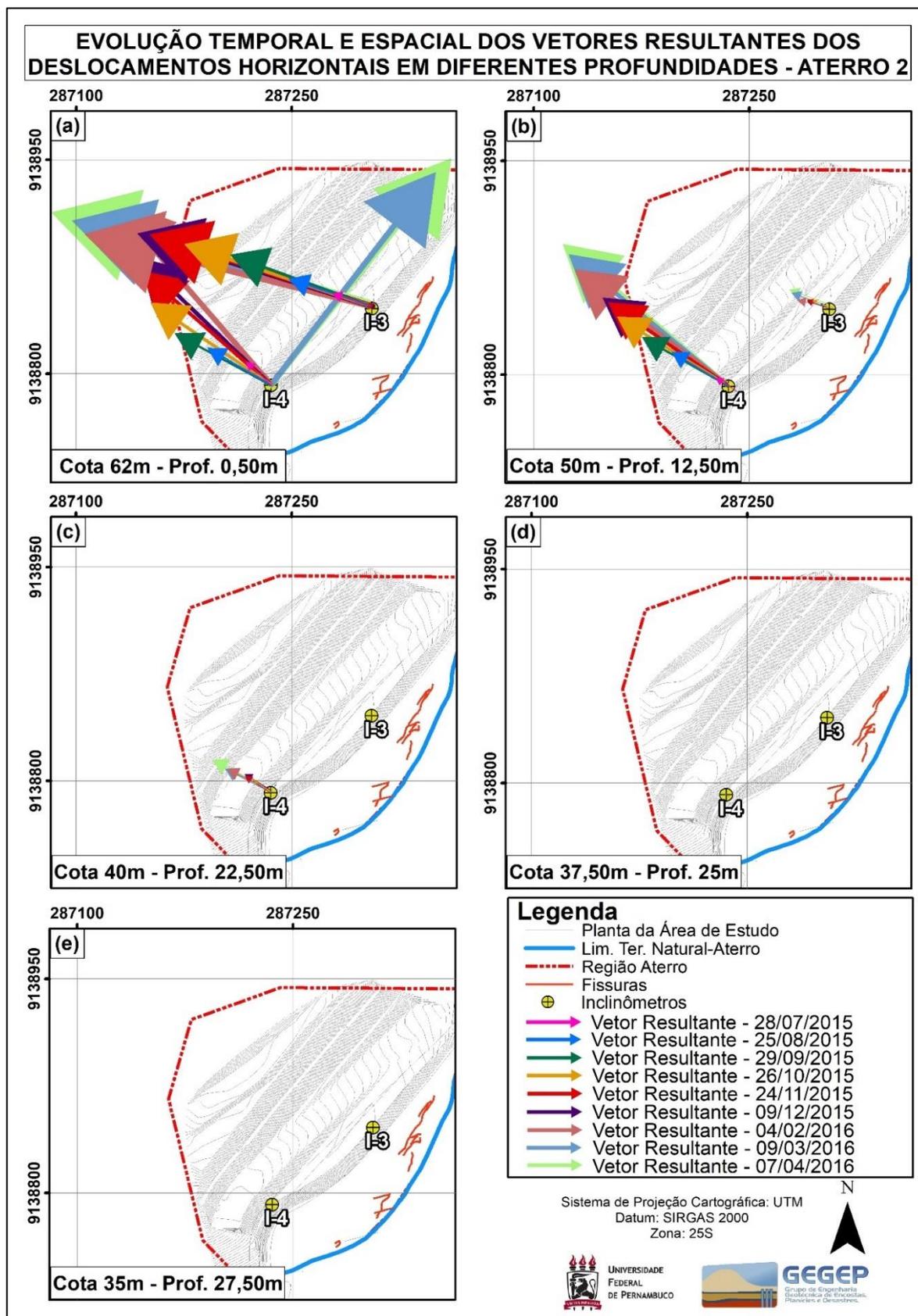
5.2.1.3.2 Região Aterro 2

Na Figura 36a são apresentados os vetores resultantes do I-3 e I-4 com suas respectivas variações ao longo do tempo. Considerando a cota 62m e profundidade 0,50m, os vetores resultantes do I-3 apresentam a direção em torno de 290° e intensidade máxima de 58,45mm no dia 07/04/2016. Os vetores do I-4 apresentam a direção em torno de 300° onde são encontradas intensidades variando entre 6,40mm e 43,59mm, para os dias 09/03/2016 e 07/04/2016 as direções são em torno de 40° e as intensidades medem 48,08mm e 51,67mm respectivamente.

Observa-se na Figura 36b a representação dos vetores resultantes na cota 50m e profundidade 12,5m, no I-3 os vetores mostram uma direção medindo em torno de 290°, mostrando maior intensidade de 7,20mm no dia 07/04/2016 e menor intensidade de 0,15mm no dia 28/07/2015. Percebe-se que no I-4 os vetores apresentam direção em torno de 300°, com maior intensidade em torno de 38,90mm. Analisando a Figura 36c, considerando a cota 40m e profundidade 22,50m, os valores de intensidade no I-3 estão em torno de 0,10 e 0,42 e azimute variando entre 60° e 297°, no I-4 a direção dos vetores está em torno de 300°, com maior intensidade no dia 07/04/2016 medindo 10,82mm e menor intensidade no dia 28/07/2015 medindo 0,37mm.

Analisando a Figura 36d, considerando a cota de 37,5m e profundidade de 25m, é possível observar que no I-3 os vetores resultantes apresentam direção variando entre 72° e 313°, com maior intensidade de 0,10mm nos dias 09/12/2015 e 04/02/2016 e menor intensidade de 0,04mm nos dias 28/07/2015, 25/08/2015, 29/09/2015, 09/03/2016. No I-4 os vetores resultantes apresentam direção variando entre 73° e 299°, com maior intensidade de 0,59mm no dia 07/04/2016 e menor intensidade de 0,07mm no dia 28/07/2015. Os vetores resultantes do I-4 para cota de 35m e profundidade 27,5m são apresentados na Figura 36e. O I-3 não chega nessa cota. Analisando o I-4 percebe-se que as direções dos vetores variam entre 82° e 301°, com maior intensidade no dia 09/03/2016 medindo 0,27mm e com menor intensidade nos dias 28/07/2015 e 25/08/2015 medindo 0,03mm.

Figura 36 – Evolução temporal e espacial dos vetores resultados em diferentes profundidades para o Aterro 2.

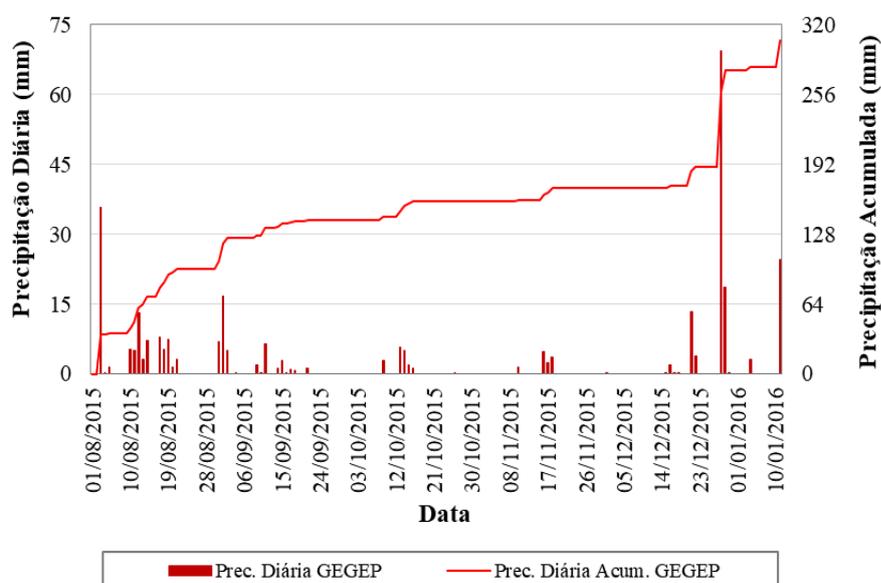


Fonte: O Autor (2022).

5.3 Dados do Pluviômetro

Buscando estudar foi instalado um pluviômetro na área de estudo, e o período de leitura está compreendido entre 01/08/2015 e 10/01/2016. As leituras para este pluviômetro eram realizadas para o período de 8h até 8h do dia seguinte. Além disso, não eram realizadas leituras aos finais de semana, ou seja, o dado da segunda-feira retratava o acumulado do final de semana. Este mesmo pensamento é válido perante a ocorrência de feriados, sendo registrado o acumulado de chuva no dia útil posterior. Na Figura 37 está apresentado o resultado para a precipitação diária e acumulada para o pluviômetro mencionado. É possível observar que há um pico de chuva em 28/12/2015 que atingiu 69 mm. Outro dia de maior precipitação foi identificado em 03/08/2015 correspondendo a 35 mm. Também percebe-se que entre os meses de setembro a início de dezembro são identificadas precipitações com menores intensidades.

Figura 37 – Precipitação diária no pluviômetro instalado no local da obra.



Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2015).

5.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Dado o exposto, observa-se que as leituras dos inclinômetros antes da proposta de estabilização não eram favoráveis, pois os taludes estavam se movimentando nas regiões de contato entre o solo natural e o solo compactado, tendo um potencial de ruptura. Sendo necessária uma análise de estabilidade com o intuito de implementar medida de estabilização através da execução de estrutura de contenção, como será apresentado nos capítulos seguintes.

6 PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO

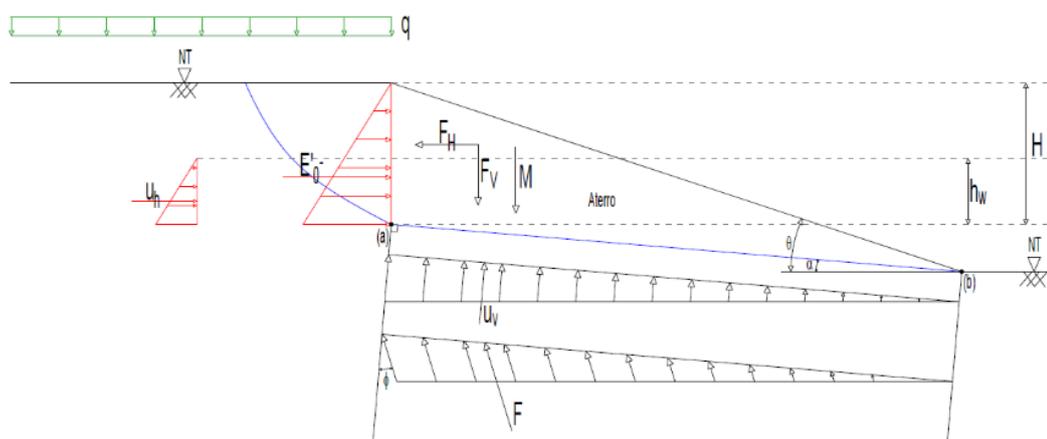
Neste capítulo apresenta-se um breve resumo da análise de estabilidade e do projeto de estabilização dos taludes de aterro, realizados pelo GEGEP, sob a coordenação do Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho. Além disso, a partir das imagens de execução da obra e as planilhas de fiscalização da execução dos tirantes, foi elaborado um resumo do As Built da obra.

A partir de investigação geológica-geotécnica por ensaios de campo, ensaios de laboratório e instalação, leitura e interpretação de instrumentação (inclinômetros) com vistas ao entendimento dos movimentos observados no aterro, foi possível dar andamento com a elaboração do projeto de estabilização para conter os movimentos horizontais identificados na área.

6.1 ANÁLISE DA ESTABILIDADE

O fator de segurança foi determinado pelo Método de Culmann. Este método baseia-se na hipótese que considera uma superfície de ruptura plana passando pelo pé do talude. A cunha assim definida é analisada quando a estabilidade como se fosse um corpo rígido (bloco) que desliza ao longo desta superfície. A Figura 38 apresenta a geometria do modelo adotado na análise de estabilidade.

Figura 38 – Geometria adotada no método de Culmann.



Fonte: Coutinho et al. (2016).

As informações para definir a posição da superfície de ruptura foram coletadas a partir dos resultados do inclinômetro. De acordo com essa instrumentação, o plano onde ocorre a máxima tensão cisalhante é o plano de contato entre o aterro e o terreno natural. Nas análises de estabilidade foram consideradas 4 situações iniciais para relação entre a altura de coluna de água (hw) e a altura do aterro (H): $hw/H = 0$, $hw/H = 0,2$, $hw/H = 0,3$, $hw/H = 0,4$.

A análise de estabilidade foi resolvida algebricamente. O esforço atuante é resistido pela parcela de resistência mobilizada. Para um fator de segurança de 1,05 e adotado como referência uma relação de 0,3 entre a altura de coluna de água e a altura do aterro (hw/h), temos que o ângulo de atrito mobilizado é de $25,4^\circ$.

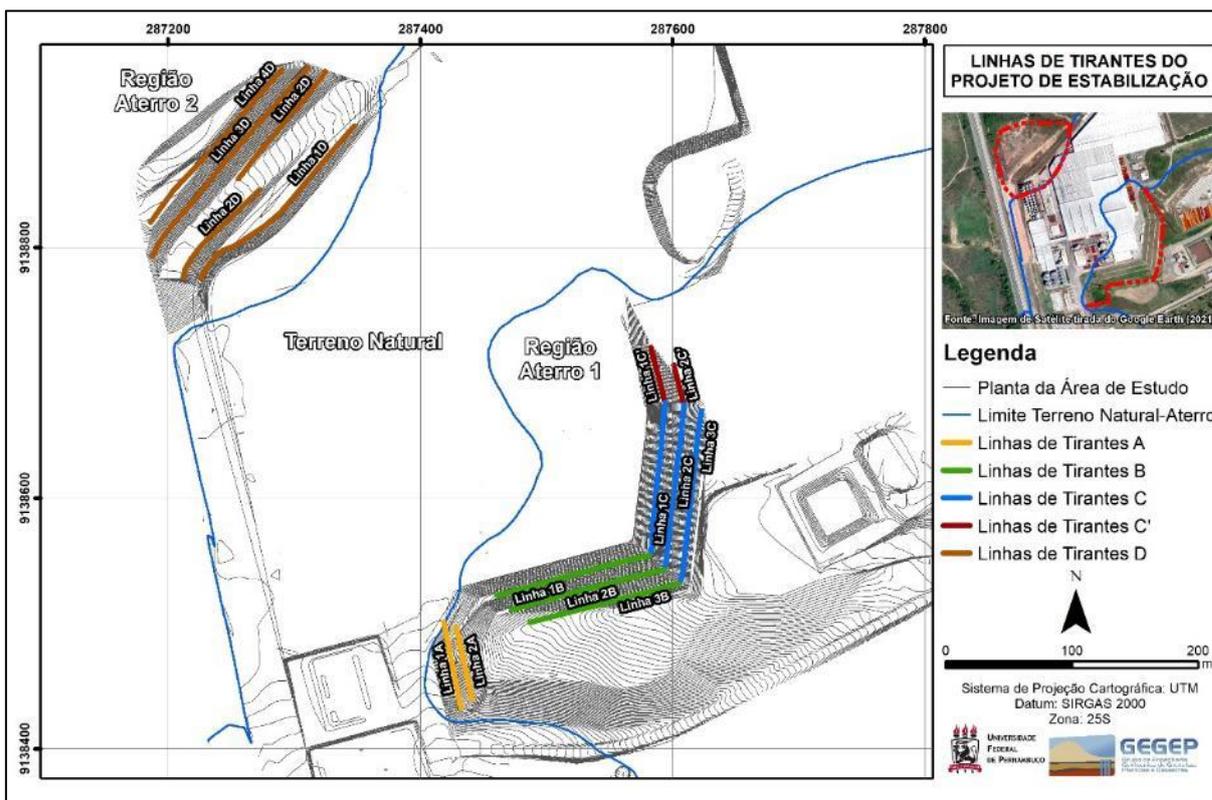
Na região de contato entre o aterro e terreno natural adotou-se uma coesão de 0 kPa devido a existência comprovada da movimentação do aterro e por falta de segurança no “encaixe” entre o aterro e o terreno natural. O ângulo de atrito varia em uma faixa de 25° a 30° .

6.2 ESTABILIZAÇÃO DOS TALUDES DE ATERRO

Após realização de investigação geológica-geotécnica por ensaios de campo, ensaios de laboratório e instalação, leitura e interpretação de instrumentação (inclinômetros) com vistas ao entendimento dos movimentos observados no aterro, elaborou-se um projeto de estabilização para conter os movimentos horizontais identificados na área.

A estabilização dos movimentos horizontais foi efetivada através da instalação de tirantes e instalação de um sistema de drenagem sub-horizontal profundo. Para instalação dos tirantes foram atendidas todas as recomendações previstas na NBR 5629 (ABNT, 2006). Para a Região do Aterro 1 foi dimensionada a execução de duas linhas de tirantes na Área A, de três linhas de tirantes na Área B, de três linhas de tirantes na Área C, de duas linhas de tirantes na Área C'. Para a Região do Aterro 2 foi dimensionada a execução de quatro linhas de tirantes na Área D (Figura 39).

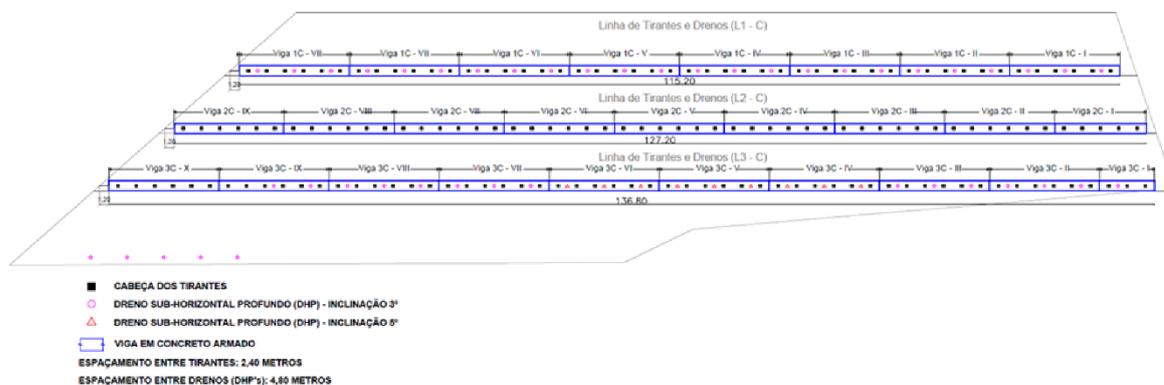
Figura 39 – Linhas de tirantes previstas no Projeto de Estabilização.



Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2016).

Os serviços de execução dos tirantes foram realizados por patamar e por nichos de 14,40 metros a partir do patamar mais alto. Os nichos foram escavados em sequência para facilitar o processo de escavação. Na Figura 40 apresenta-se a vista frontal da solução adotada. Observa-se que cada linha de tirante representa um patamar do talude, onde estão localizados os tirantes e os drenos sub-horizontais profundos.

Figura 40 – Vista frontal da solução adotada.

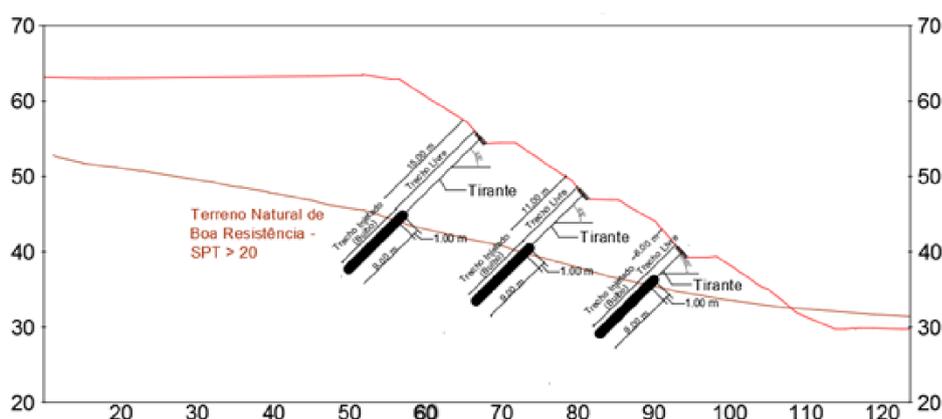


Fonte: Coutinho et al. (2016).

Foram executados os tirantes com espaçamento horizontal entre si de 2,40 m, inclinação de 45° e carga de trabalho de 450 kN (Figura 41). A carga do tirante foi transmitida ao maciço através de vigas de concreto armado (1,70 x 0,40 x 14,40 m). A drenagem sub-horizontal profunda (DHP) foi excetuada em duas linhas com espaçamento horizontal de 4,80 metros e inclinação de 3° ou 5° (Figura 42). Os DHPs foram instalados no patamar correspondente a primeira e terceira linha de tirantes.

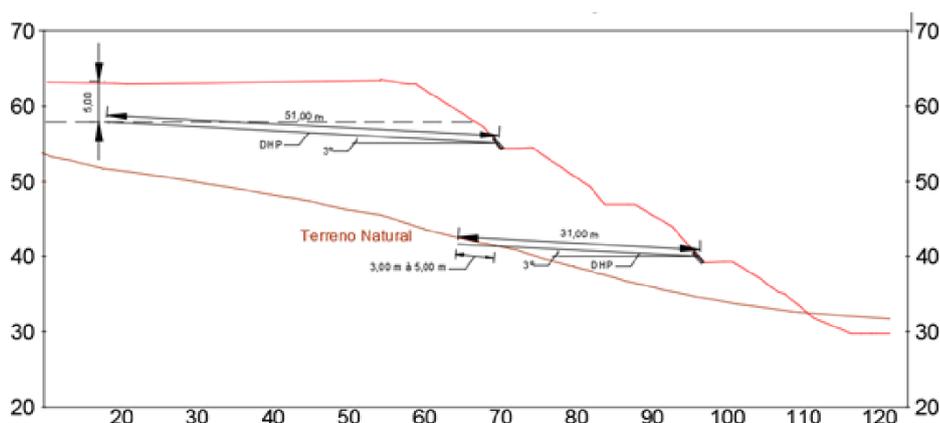
Deve ser ressaltado que não foi encontrado nível de água nas sondagens realizadas. Entretanto, os drenos foram executados para interceptar as águas da chuva que penetram no aterro através das fissuras no piso de concreto, conforme apresentando anteriormente. Além de captar e direcionar as águas de vazamentos de tubulações enterradas dentro do corpo do aterro, o que foi observado durante a investigação.

Figura 41 – Ilustração de uma seção tipo – tirantes.



Fonte: Coutinho et al. (2016).

Figura 42 – Ilustração de uma seção tipo – DHP.



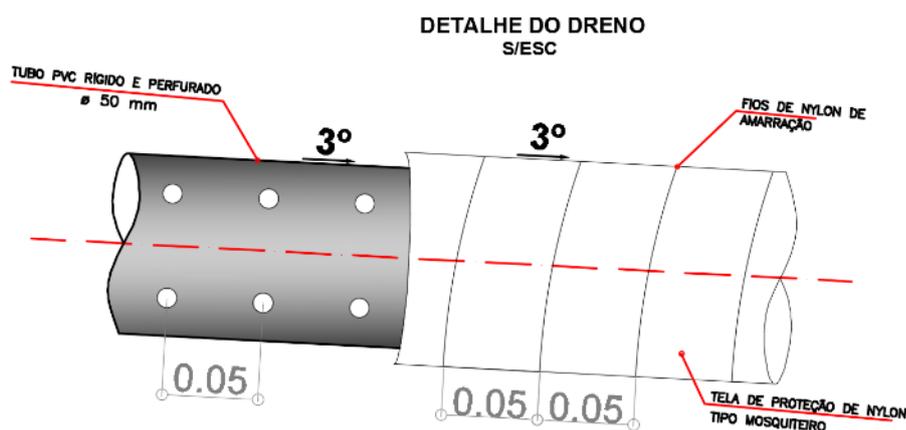
Fonte: Coutinho et al. (2016).

O trecho projetado para transmitir a carga do tirante para o terreno tem dimensão mínima de 10 m, sendo pelo menos 9 m inserido no terreno natural com boa resistência (SPT > 20) e mais 1 m inserido no contato entre o aterro e terreno natural.

As vigas de transferência de carga dos tirantes (vigas de solidarização dos tirantes) foram executadas em concreto armado com Fck de 35 MPa. Os orifícios na viga para colocação e protensão dos tirantes tem um diâmetro de 100 mm.

Os DHP foram constituídos por tubos de PVC rígido com resistência adequada a toda a fase de execução e operação da obra, providos de orifícios envolvidos por filtro de nylon introduzidos em perfurações executadas no talude (Figura 43). O conjunto de DHP foi destinado à interseção, captação e condução de águas subterrâneas para fora do talude de aterro.

Figura 43 – Detalhe do dreno sub-horizontal profundo.



Fonte: Coutinho et al. (2016).

Na Figura 44 está apresentado parte da armação da viga de concreto armado. Observa-se o detalhe da armação na região do tirante, a qual irá resistir a esforços concentrados que serão transmitidos pelo tirante através de placas de ancoragem de 260 mm x 260 mm x 50 mm. Na Figura 45 apresenta-se a viga concretada com os tirantes executados, já com a carga de trabalho, após protensão.

Figura 44 – Detalhe da execução das vigas e tirantes.



Fonte: Coutinho et al. (2016).

Figura 45 – Vista da ancoragem.



Fonte: Coutinho et al. (2016).

Figura 46 – Vista da Estabilização executada na Região do Aterro 1 (Área B, C e C').



Fonte: Coutinho et al. (2016).

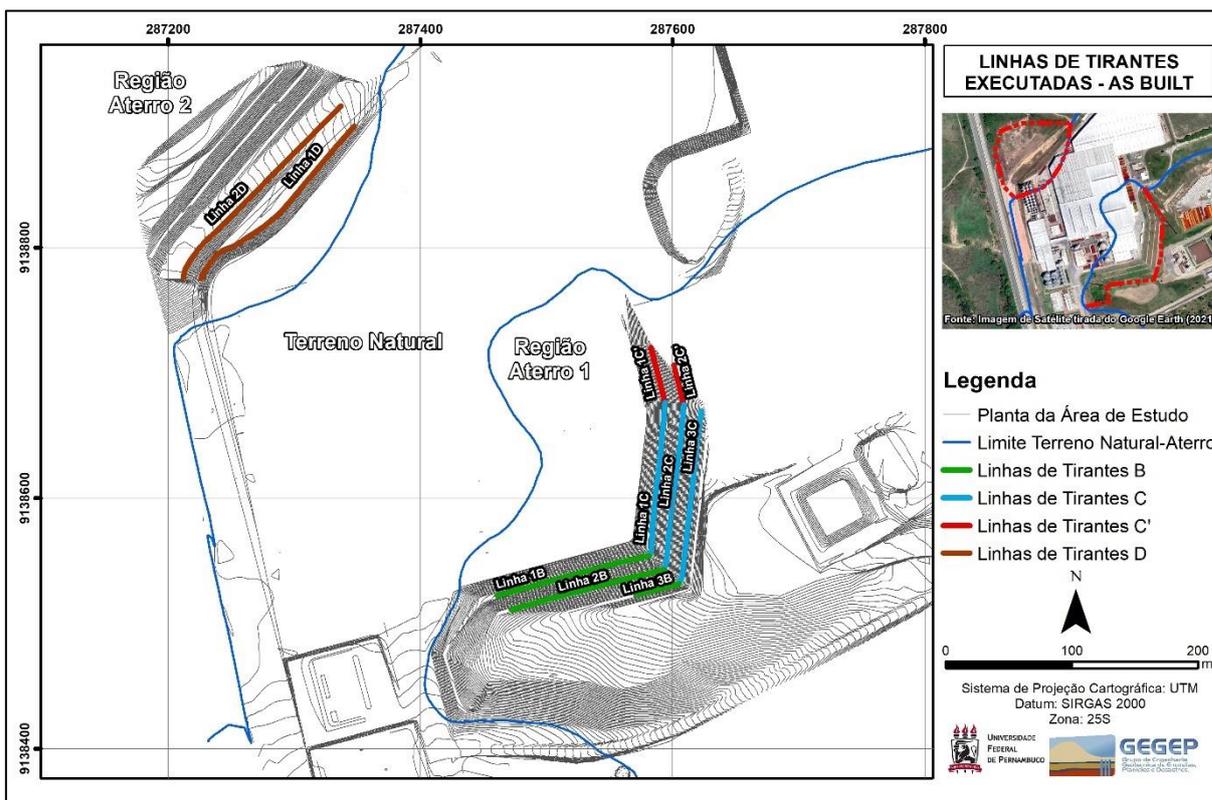
O fator de segurança após a estabilização do aterro foi 1,56. Observou-se que o fator de segurança teve um incremento no seu valor na ordem de 48 %

6.3 AS BUILT

Durante a execução da solução de estabilização foram realizadas algumas alterações no projeto. Com isso, algumas linhas de tirantes não foram executadas (Figura 47), sendo elas:

- Região do Aterro 1 – as duas linhas de tirantes na Área A (Linhas 1A e 2A) e parte da linha de tirantes inferior (Linha 3B) na Área B;
- Região do Aterro 2 – duas linhas de tirante da Área D (Linhas 3D e 4D).

Figura 47 – Linhas de tirantes executadas (As Built).



Fonte: O Autor (2022).

Destaca-se que foi executada na Região do Aterro 2 uma solução complementar em estaca prancha, próximo à linha de tirantes 1D.

7 CONTROLE DE EXECUÇÃO E COMPORTAMENTO

Neste capítulo foi descrito o controle de execução e comportamento dos tirantes, por meio do ensaio não destrutivo de impedância mecânica. Os dados apresentados nesse capítulo foram descritos a partir do Relatório Técnico emitido pela Rincen BTP Brasil (2018).

Ensaio não destrutivo são aqueles utilizados para obter informações acerca de características de determinado material ou estrutura, sem que seja necessário destruir ou causar nenhum tipo de dano as peças, eles não provocam perda na capacidade resistente do elemento.

De acordo com Evangelista (2002), os ensaios não destrutivos podem ser aplicados com os objetivos de:

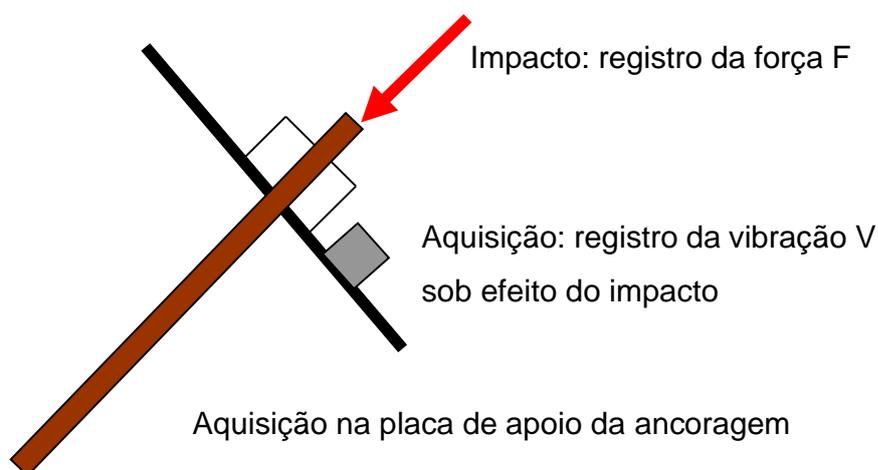
- controle tecnológico em pré-moldados ou construções em sito;
- aceitação, ou não, de materiais fornecidos;
- esclarecimento de dúvidas a respeito da mão de obra envolvida em mistura, lançamento, compactação ou cura do concreto, transporte;
- monitoramento do desenvolvimento da resistência visando remoção de fôrmas, duração da cura, aplicação de protensão ou de cargas, remoção de escoramento;
- localização e determinação da extensão de fissuras, vazios e falhas de concretagem;
- determinação da posição, diâmetro ou condições das armaduras;
- determinação da uniformidade do concreto;
- aumento do nível de confiança de um pequeno número de ensaios destrutivos;
- verificar a deterioração do concreto resultante de sobrecarga, fadiga, fogo, ataque do meio ambiente;
- avaliação do potencial de durabilidade do concreto;
- monitoramento de mudanças das propriedades do concreto ao longo do tempo;
- fornecimento de informações para que se verifique se é possível mudar a utilização de uma estrutura.

Um dos ensaios que pode ser aplicado é o ensaio de integridade, o qual é conhecido por “*Pile Integrity Test*” muito aplicado em fundações profundas para verificar a qualitativamente a integridade do fuste de estacas.

Este método é baseado na emissão de pulsos mecânicos, de modo que as ondas contornam os vazios e descontinuidades internas do concreto (EVANGELISTA, 2002). A reflexão pode ser gerada por golpes de martelo ou por outros meios mecânicos.

Deste modo, o ensaio consiste na aplicação de golpes de martelo instrumental sobre a estrutura, gerando ondas acústica longitudinais de baixo nível de vibração (Figura 48). Estas ondas são captadas por um acelerômetro instalado no topo da estrutura e convertidos em sinal elétrico, o qual, após tratamento, pode ser analisado graficamente. Chiodini et al. (2013) afirmam que é necessária a aplicação de vários golpes, de modo que o equipamento registre mais de uma leitura e assim se obtenha maior precisão nos dados obtidos.

Figura 48 – Esquema de realização do ensaio PIT.

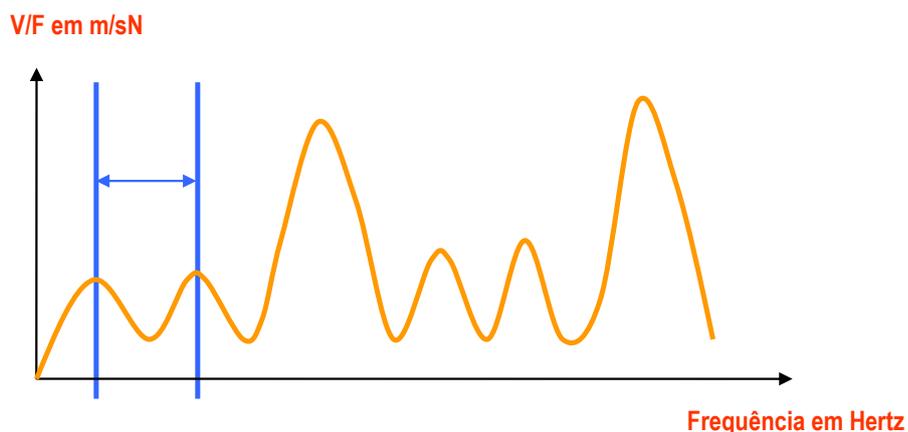


Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

De acordo com Chiodini et al. (2013), a onda trafega ao longo da estrutura ensaiada, e encontrando alguma variação nas características dos materiais sofrem reflexão antes de chegar ao término, de modo que essa reflexão causa variação na aceleração medida pelo sensor.

A Rincent BTP Brasil (2018) realizou a análise das informações obtidas pelo ensaio por meio de gráficos que relacionam a Curva V/F em função da frequência, em que F representa a força aplicada no martelo e V o registro de vibração sob o efeito do impacto.

Figura 49 – Curva V/F em função da frequência.



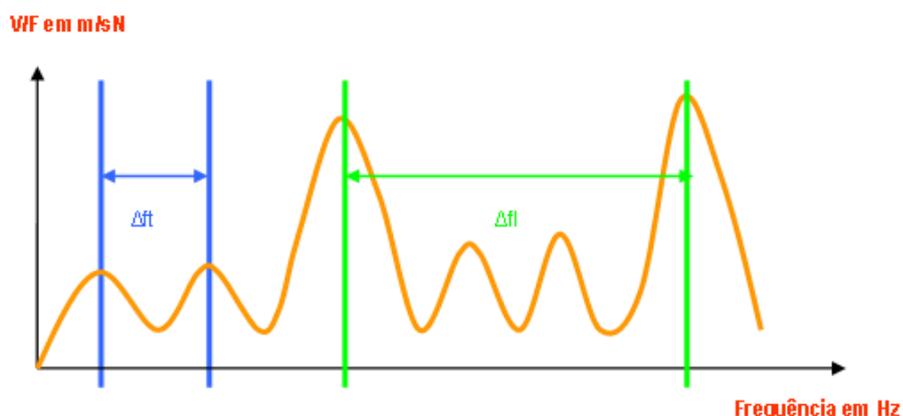
Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

A análise da curva é efetuada com os parâmetros resposta em frequência e rigidez dinâmica. No caso da resposta em frequência a Rincent BTP Brasil (2018), afirma que o regime vibratório dominante conduz a determinação do comprimento total do tirando e o comprimento “livre”. Os diferentes picos ou cavidades sucessivas da curva são posicionados em frequência, de acordo com as frequências próprias das vibrações. O comprimento correspondente será:

$$L = V / 2\Delta F$$

Onde Δf é a diferença de frequência entre dois picos ou cavidades sucessivas e V a velocidade de propagação das ondas no tirante.

Figura 50 – Curva V/F em função da frequência.



Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

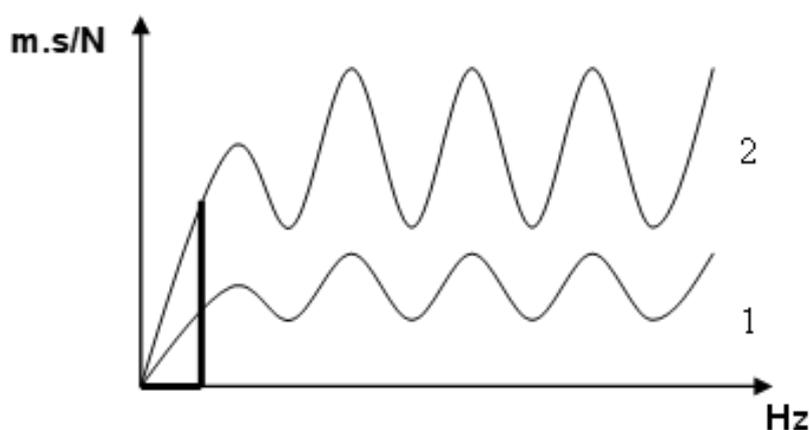
Assim, a vibração da parte livre do tirante é obtida na curva picos ou cavidades sucessivas distantes de ΔfI , ou seja, o comprimento $L_I = V / 2 \Delta fI$. A vibração da

totalidade do tirante é obtida na curva picos ou cavidades sucessivas distantes de ΔFt , ou seja, o comprimento $L_t = V / 2 \Delta Ft$.

O comprimento calculado deve ser comparado com o comprimento teórico do tirante. No caso de um tirante contínuo sem corte, os comprimentos calculados correspondem aos do tirante. No caso de um tirante seccionado, o comprimento calculado corresponde ao comprimento até o corte.

No caso da rigidez dinâmica, esta é proporcional ao inverso da inclinação na origem da curva, depende da inércia do sistema auscultado e do meio ao redor.

Figura 51 – Curva V/F em função da frequência.



Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

No caso de um tirante, ela depende do tipo do tirante e de suas características, de sua ancoragem, dos esforços aplicados e da estrutura geral. De acordo com a Rincent BTP Brasil (2018), esse parâmetro está ligado à rigidez estática, ou seja, à inclinação num ponto da curva esforço/deformação proveniente de um ensaio de tração direta. Portanto, a rigidez dinâmica é ligada ao esforço no tirante.

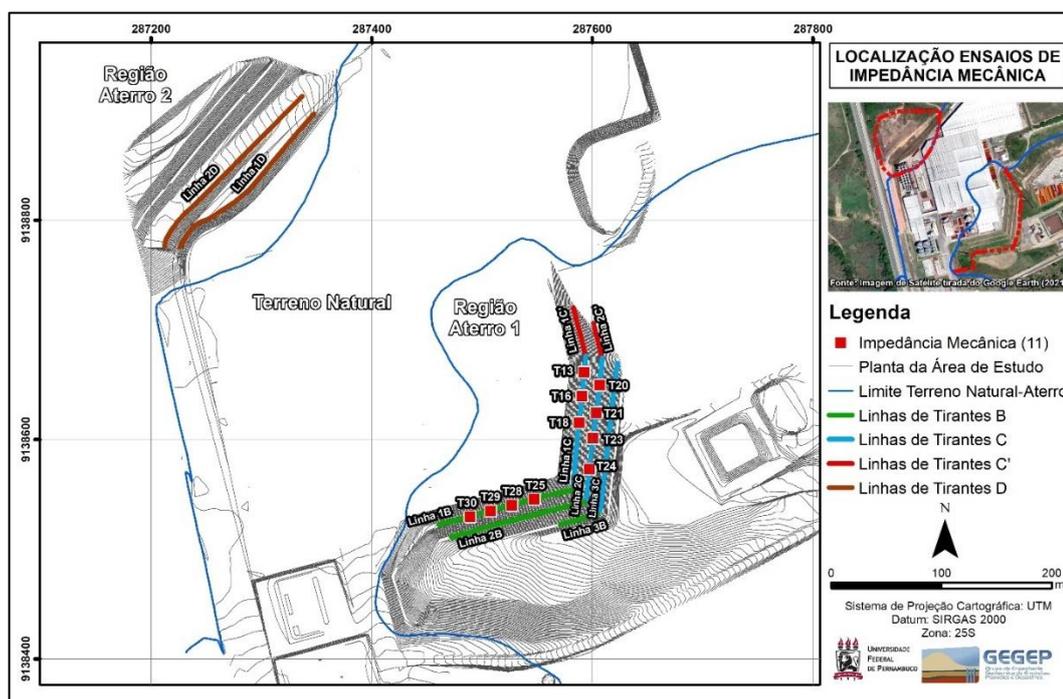
Uma rigidez correta significa (RINCENT BTP BRASIL, 2018):

- Uma ancoragem correta do tirante,
- A ausência de corte,
- A continuidade do tirante no seu comprimento.

7.1 METODOLOGIA

Os procedimentos a serem apresentados para o ensaio não destrutivo do tipo impedância mecânica foram obtidos no relatório da empresa responsável pela execução do ensaio, a Rincent BTP Brasil (2018).

Figura 52 – Localização dos ensaios de impedância mecânica.



Fonte: O Autor (2022), adaptado Coutinho et al. (2015).

Para cada tirante, seis aquisições, no mínimo, foram efetuadas. A fim de atenuar os barulhos parasitos aleatórios e amplificar a resposta vibratória do tirante, cada aquisição cumula dois ensaios.

O posicionamento do sensor de velocidade e do impacto do golpe requerem duas áreas planas de aproximadamente 5 cm x 5 cm na placa de apoio. A superfície na qual é posicionado o sensor de velocidade deve ser lisa e limpa. O sensor é colado na placa de apoio. O golpe é efetuado na placa de ancoragem ou na monobarra (Figura 53). Para cada aquisição, os sinais de força e de velocidade são visualizados e sua conformidade é verificada. Os resultados que podem ser explorados são registrados após o ensaio.

Figura 53 – Aplicação do golpe.



Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

7.2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A seguir estão apresentados os resultados e as discussões do comprimento e da rigidez dinâmica e tensão dos 11 tirantes analisados.

7.2.1 Comprimento

Os cálculos do comprimento apresentam incertezas advindas da velocidade a ser considerada. Deste modo, a empresa considerou duas velocidades para os cálculos, 4500 m/s e 5100 m/s. Nota-se que uma incerteza de 10% na velocidade induz a uma incerteza idêntica no comprimento calculado.

Tabela 17 – Comprimentos calculados a partir do ensaio.

Viga Nº	Tirante Nº	Comprimentos calculados			
		Comprimentos Livres		Comprimentos Totais	
		4500 m/s	5100 m/s	4500 m/s	5100 m/s
1B-V	T25	16,1	18,3	23,7	26,9
	T28	14,1	16,0	22,5	25,5
	T29	12,2	13,9	21,1	23,9
	T30	13,7	15,5	24,3	27,6
1C-III	T13	17,5	19,8	26,4	29,9
	T16	17,8	20,2	27,7	31,4
	T18	18,5	20,9	27,4	31,1
	T20	12,2	13,8	21,7	24,6
2C-IV	T21	10,3	11,7	21,5	24,3
	T23	10,4	11,9	20,0	22,6
	T24	9,7	11,1	21,7	24,6

Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

7.2.2 Rigidez dinâmica e tensão

Nos próximos tópicos estão os resultados e as discussões da rigidez dinâmica medida e da determinação das tensões nos tirantes analisados.

7.2.2.1 Rigidez dinâmica medida

Para cada tirante testado, a rigidez dinâmica considerada corresponde à média das rigidezes dinâmicas das aquisições selecionadas.

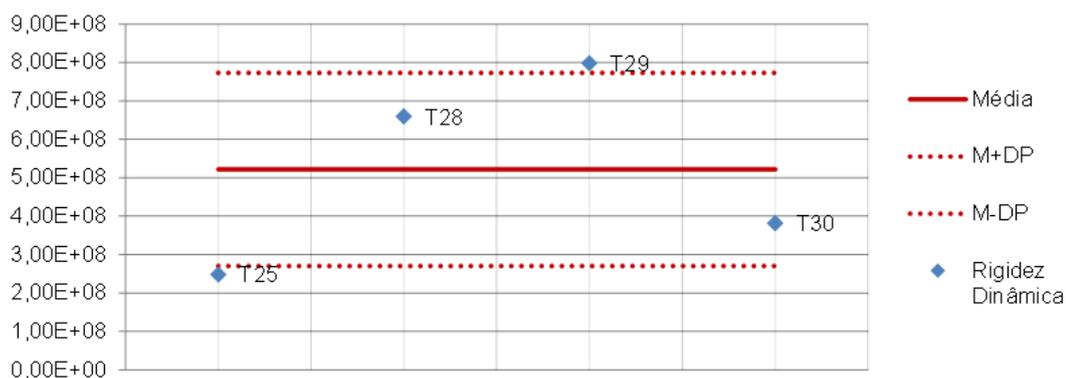
Tabela 18 – Rigidez dinâmica medida.

Viga Nº	Tirante Nº	Rigidez Dinâmica (E+08 N/m)
1B-V	T25	2,48
	T28	6,59
	T29	7,98
	T30	3,82
1C-III	T13	4,78
	T16	8,87
	T18	6,88
	T20	2,38
2C-IV	T21	4,98
	T23	3,26
	T24	1,46

Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

A rigidez média obtida nos 11 tirantes foi de $4,86 \text{ E}+08 \text{ N/m}$. O desvio padrão de $2,45 \text{ E}+08 \text{ N/m}$. O coeficiente de variação de 50,3%. A rigidez mínima foi de $1,46 \text{ E}+08 \text{ N/m}$ para o tirante nº 24 da Viga 2C-IV e a rigidez máxima é de $8,87 \text{ E}+08 \text{ N/m}$ para o tirante nº 16 da Viga 1C-III. As rigidezes são mostradas nas Figura 54, Figura 55, Figura 56 e Figura 57 nos gráficos seguintes:

Figura 54 – Rigidez dinâmica tirantes da VIGA 1B-V.



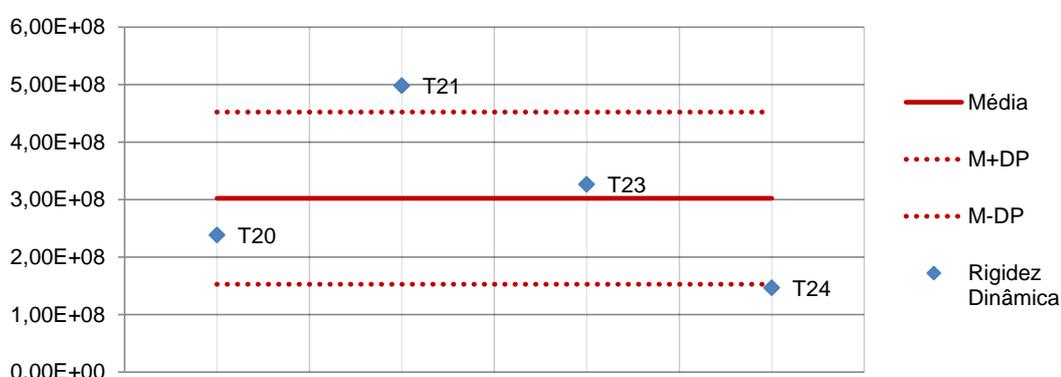
Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

Figura 55 – Rigidez dinâmica tirantes da VIGA 1C-III.



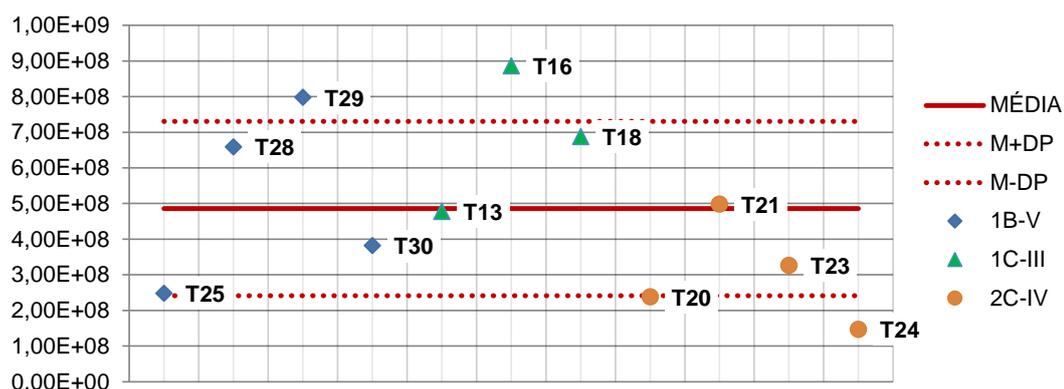
Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

Figura 56 – Rigidez dinâmica tirantes da VIGA 2C-IV.



Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

Figura 57 – Rigidez dinâmica todos os tirantes.



Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

7.2.2.2 Determinação das tensões nos tirantes

Rincent BTP Brasil possui uma grande experiência na determinação dos esforços em tirantes a partir das rigidezes dinâmicas, assim foi possível elaborar um banco de dados que permite ligar a raiz quadrada das rigidezes às tensões existentes nos tirantes levando em consideração o tipo de cortina e o tipo de tirante. Esse banco

de dados foi elaborado a partir de calibrações entre ensaios dinâmicos não-destrutivos e ensaios a tração ou instrumentação com células de carga.

Usando as raízes quadradas ligadas aos tirantes, ele permite determinar as tensões equivalentes, para comparar com os esforços existentes nos tirantes no momento dos ensaios e gênero da obra. Para isso utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\sqrt{RIG}=A \times T+B$$

Onde: RIG = rigidez proveniente das análises dos ensaios;

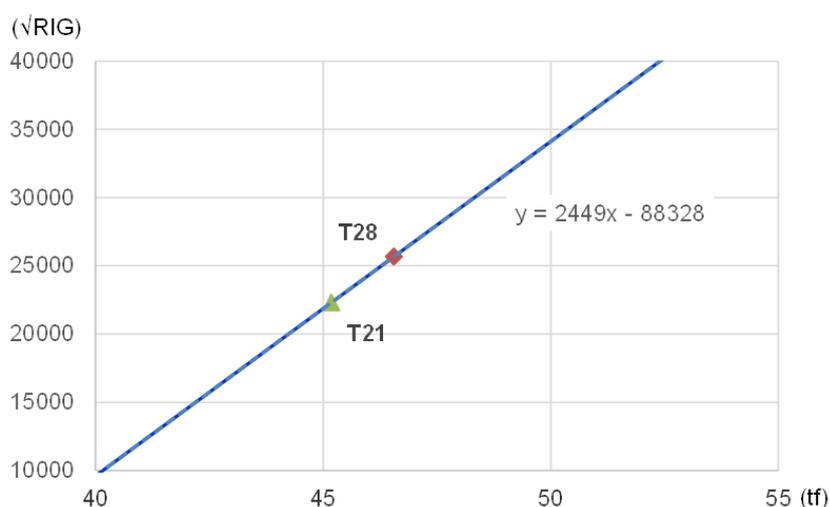
T = tensão a ser calculada (tf);

A = coeficiente angular da equação;

B = coeficiente linear da equação.

De posse da Rigidez média proveniente do ensaio e da tensão no tirante advindo da instrumentação ou do ensaio de calibração determina-se os coeficientes A e B, e conseqüentemente a equação da reta:

Figura 58 – Raiz quadrada da Rigidez dinâmica vs tensão no tirante.



Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

Reescrevendo a equação anterior e substituindo os coeficientes A e B temos:

$$T \text{ (tf)} = \frac{\sqrt{RIG} - 88328}{2449}$$

Portanto, com os valores das rigidezes de cada tirante é possível calcular a tensão de cada tirante, conforme é apresentado na tabela seguinte.

Tabela 19 – Tensão calculada de cada tirante.

Viga N ^o	Tirante N ^o	Tensão calculada (tf)
1B-V	T25	42,49
	T28	46,55
	T29	47,60
	T30	44,04
1C-III	T13	44,99
	T16	48,23
	T18	46,77
	T20	42,37
2C-IV	T21	45,18
	T23	43,44
	T24	41,01

Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

A tensão foi calculada por intermédio da instrumentação de duas células de carga nos tirantes T28 e T21. Os resultados da instrumentação são apresentados abaixo.

Tabela 20 – Resultados da instrumentação das células de carga.

Tirante	Executante	Célula de Carga	Leitura Inicial	
			Data	Carga
T28-1B	Costa Fortuna	N06	17/06/2016	46,55 tf
T34-2B	Costa Fortuna	N03	20/06/2016	46,66 tf
T15-1C	Engeobase	N01	17/06/2016	45,23 tf
T21-2C	Engeobase	N02	20/06/2016	45,18 tf
T19-1D	Costa Fortuna	N05	14/11/2016	45,26 tf
T52-1D	Costa Fortuna	N04	17/06/2016	47,26 tf
T34-2D	Engeobase	N07	21/11/2016	45,09 tf

Fonte: Rincent BTP Brasil (2018).

Os resultados indicam que os tirantes testados estavam íntegros (sem quebra) e tinham comprimento total e livre compatível com o projeto.

8 PROGRAMA DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DURANTE E APÓS A SOLUÇÃO DE ESTABILIZAÇÃO

Neste capítulo estão apresentados a metodologia e os resultados e discussões do programa de monitoramento geotécnico utilizado durante e após a solução de estabilização.

8.1 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida para a análise e tratamento de dados fundamenta-se no método de séries temporais (GUILART, 2007). O trabalho segue os passos da problemática dos movimentos da obra de aterros compactados e a importância do estudo sobre instrumentação e monitoramento geotécnico, por meio da confiabilidade dos resultados nas medições, características e preocupações no desenvolvimento de estabilização do solo do aterro.

O presente estudo analisou como o aterro e a solução de estabilização se comportaram no decorrer do tempo. Para tanto, alguns tópicos foram destacados, como: a instrumentação e monitoramento geotécnico do aterro. A informação de um programa de instrumentação geotécnica fornece ao especialista geotécnico os dados que se podem utilizar para realizar um projeto eficiente e monitorar o desenvolvimento da solução de estabilização executada (GARZON, 2015).

8.1.1 Instrumentação

Como o solo do aterro que compõe a encosta onde foi realizada a obra são heterogêneos, o entendimento do seu comportamento acaba sendo mais complexo, sendo necessária uma avaliação criteriosa dos parâmetros, buscando mais informações possíveis através da instrumentação. Dessa forma, por meio dos dados obtidos foi possível analisar vários fatores de ação no solo que possam ter influenciado os processos de movimentos de massa.

De acordo com Malko et al. (2014), um bom plano de instrumentação deve propor o monitoramento de aspectos geológico, geotécnicos, hidrológicos e ambientais por meio de instrumentos de medições que identifiquem variações de poropressão, deformações do sistema de contenção, deslocamentos de massa de solo e precipitações.

Dispondo fundamentalmente das leituras dos instrumentos utilizados e das respostas obtidas, a análise da solução de estabilização se inicia, com consideração das observações de campo e as outras informações disponíveis. Toda instrumentação foi definida com a determinação de seu objetivo, finalizando na avaliação e validação criteriosa dos dados obtidos (MACHADO, 2007).

Foram analisados os resultados dos equipamentos de instrumentação e utilizados para a interpretação dos dados utilizando as curvas de carga nos tirantes instrumentados ao longo do tempo nas seções da cortina das duas regiões de estudo.

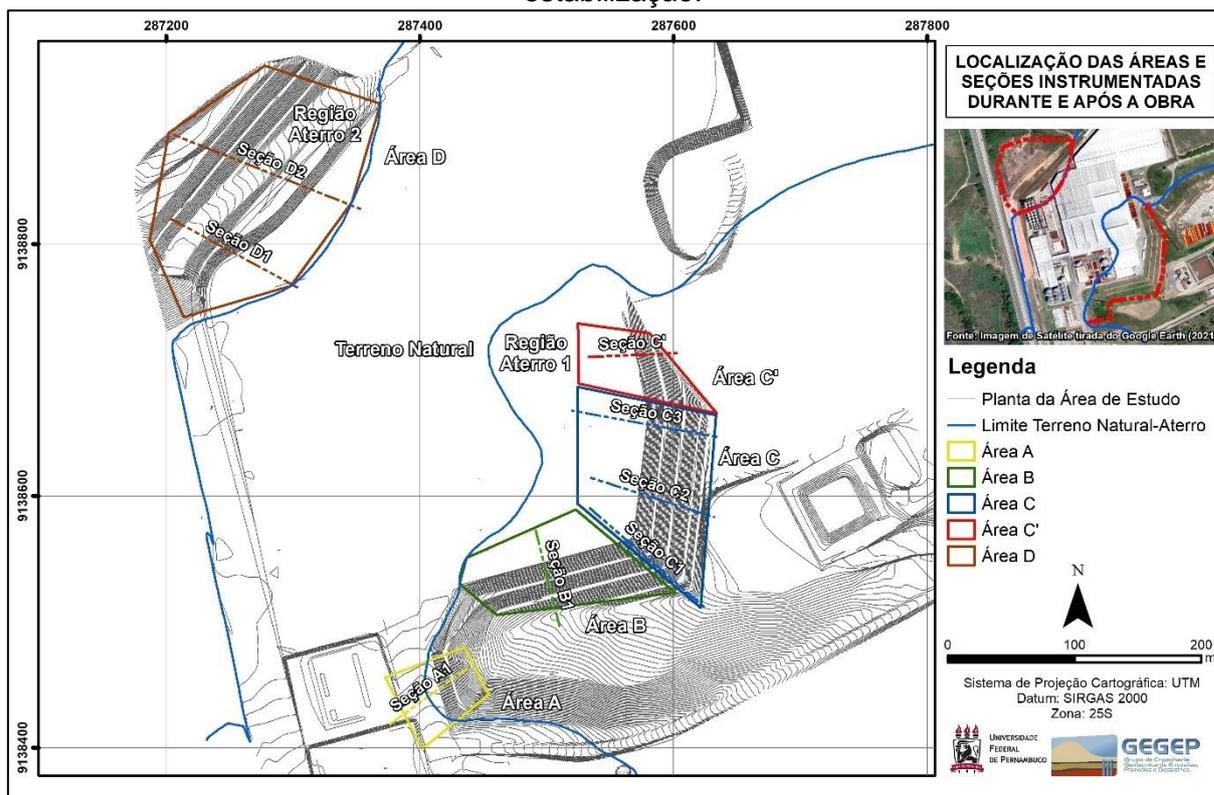
Os resultados obtidos foram comparados ao longo do tempo durante e após a solução para a estabilização do aterro com registros das condições da evolução da estabilidade geotécnica. Dessa forma, foram abordados os principais tipos de instrumentos geotécnicos utilizados, durante o processo da estabilização do aterro, sua evolução e entendimento.

A Figura 59 mostra as áreas e seções instrumentadas durante e após a obra de estabilização. A fim de facilitar a compreensão do leitor em relação a localização das áreas, seções e instrumentos, foi padronizado para todos os resultados a cor e a numeração. Assim, as áreas e seções foram representadas nas seguintes cores:

- Área A: amarelo;
- Área B: verde;
- Área C: azul;
- Área C': vermelho;
- Área D: marrom.

Os instrumentos estão indicados com a respectiva inicial, seguida da letra correspondente a área, depois com o número da seção que pertence, e, por fim, da sua posição em relação a localização na seção, que é numerada de cima (crista talude) para baixo (pé do talude). Para exemplificar, tem-se, por exemplo, a MS-A1.1, significando o marco superficial da Área A, Seção 1, na posição 1.

Figura 59 – Localização das áreas e seções instrumentadas durante e após a obra de estabilização.



Fonte: O Autor (2022).

Os instrumentos utilizados estão descritos a seguir, bem como localizados na Figura 60.

a) Pluviômetros

Foi instalado um pluviômetro na região 1 com o objetivo de recolher e medir a quantidade de água chuva (mm), precipitados durante o período de análise.

b) Níveis D'Água (MNA)

Os indicadores de nível d'água (MNA) têm como função identificar a cota na qual o solo se encontra saturado, definindo assim o nível freático naquele ponto. Os MNA foram dispostos da seguinte maneira: quatro na Região do Aterro 1 e um na Região do Aterro 2.

c) Piezômetros (PZ)

A instalação dos piezômetros (PZ) foi definida de maneira que os mesmos ficassem distribuídos nas duas regiões do estudo, dispostos de tal forma com quatro na Região do Aterro 1 e dois na Região do Aterro 2. Os piezômetros foram instalados

com profundidades definidas de acordo com as informações obtidas na sondagem. Pretendeu-se, com esse arranjo, registrar, por meio da altura de coluna de água, pelo Piezômetro de Casagrande, pressões dos fluídos internos (poropressão), a fim de compreender os efeitos da água nas proximidades na zona de contato entre o terreno natural e o aterro.

d) Marcos Superficiais (MS)

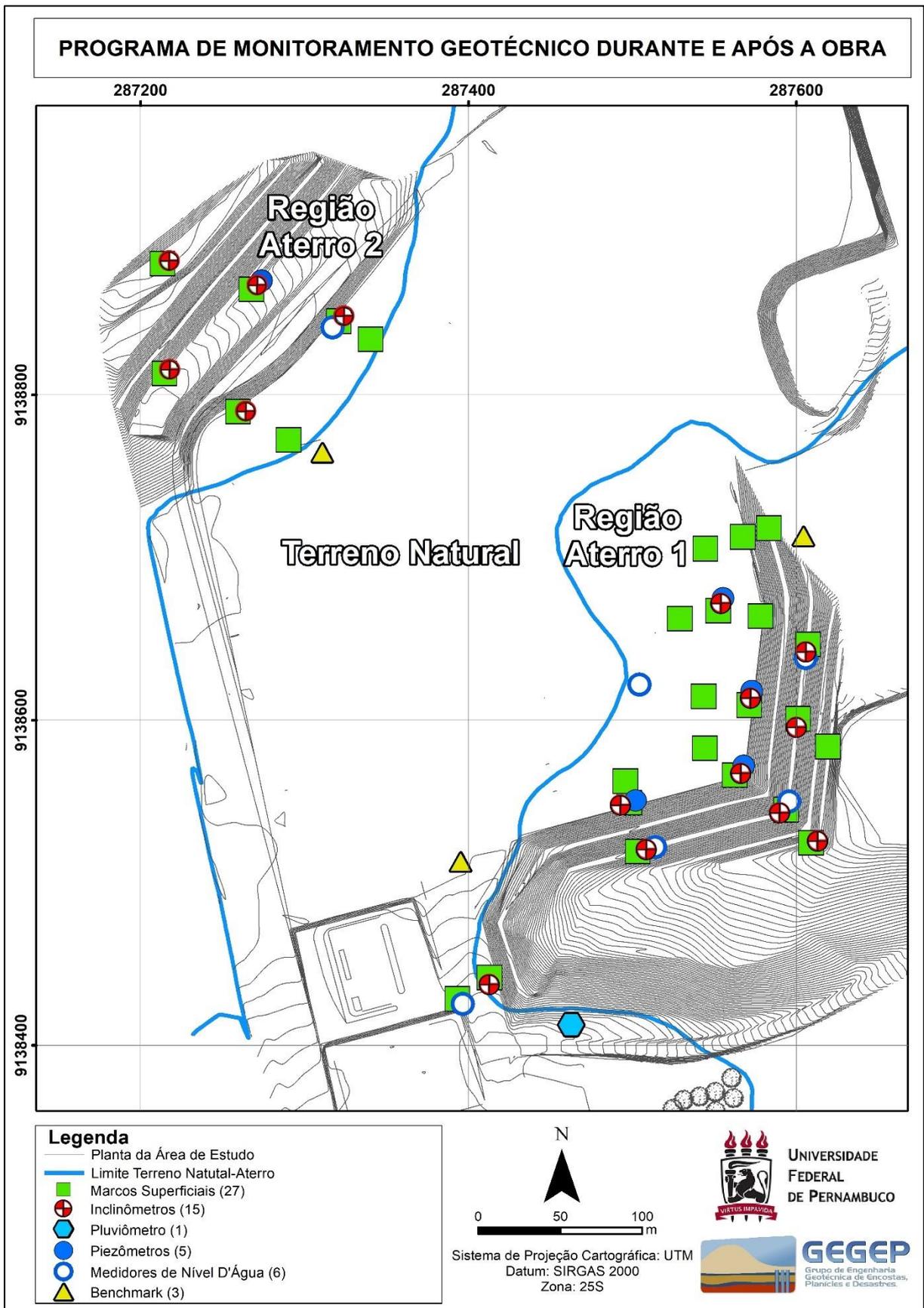
Foram instaladas na superfície do aterro 27 referências posicionais, marcos superficiais (MS), sendo 20 na Região do Aterro 1 e sete na Região do Aterro 2, para serem controlados por pontos fixos com o emprego de estações totais de controle topográfico e processos de triangulação.

e) Inclinômetros (I)

A instalação desses instrumentos foi disposta nas duas regiões do aterro, sendo 10 na Região do Aterro 1 e cinco na Região do Aterro 2. Com esses instrumentos foi possível medir os desvios de inclinações por uma vertical, em duas direções dos eixos A e B, de forma quase contínua ao longo da profundidade do instrumento.

A instrumentação com os inclinômetros visualizados anteriormente permitiu quantificar possíveis movimentos sub-horizontais, que por sua vez possibilitou avaliar aspectos relativos à tendência de movimentação horizontal dos aterros. Os equipamentos foram engastados em um horizonte inferior, relativamente indeformável.

Figura 60 – Instrumentos utilizados durante e após a obra de estabilização.



Fonte: O Autor (2022), adaptado de DO VAL Engenharia Consultiva (2016).

8.1.2 Monitoramento

Dentre os métodos e técnicas de instrumentação geotécnica podem-se destacar os métodos de medição de deslocamentos, tais como métodos de inclinometria e topográficos como o marco superficial, e os métodos que medem a ação da água, os quais podem ser exemplificados por pluviômetros, medidores de pressão e nível d'água (COSTA, 2017). Apesar de não gerarem dados sobre a movimentação, o segundo grupo de métodos fornece elementos sobre as condições de estabilidade de um talude. Conforme Franklin e Denton (1973), gráficos de pluviometria, piezometria ou variação do nível d'água podem alertar quanto a uma possível condição de instabilidade antes dos métodos de medição de movimentos, uma vez que estes parâmetros representam causas de instabilidade.

Para o monitorar como o aterro e a estabilização se comportou antes e após a solução realizada, foi analisado simultaneamente os gráficos de deslocamento e de velocidade. Dessa forma, a metodologia para o monitoramento e processamento de dados, se deu com as seguintes abordagens:

- análise e interpretação dos resultados, com abordagem comparativa dos resultados pelos diversos monitoramentos efetuados no processo de medição durante e depois, bem como algumas considerações relevantes no desenvolvimento do sistema de medição;
- elaboração de gráficos a partir de leituras, bem como construção de mapas com interpolação de dados para compreensão especializada dos dados; e
- cruzamentos dos dados com as informações de execução dos tirantes e da precipitação, buscando entender a interferência de ambos na estabilizada dos aterros.

As frequências das leituras da instrumentação foram adequadas aos desempenhos previstos nas fases de construção da obra, buscando entender a intensidade e mecanismo de movimento de massa. Assim, foi monitorado conjuntamente antes da solução de estabilização, através de dados de inclinômetros e pluviômetros instalados. E para o monitoramento durante e após a solução de estabilização foram analisados dados dos pluviômetros, piezômetros, medidores de níveis d'água marcos superficiais e inclinômetros.

Dessa forma, foi possível realizar uma análise integrada, no qual possibilitou o acompanhamento das velocidades de variação das grandezas medidas, considerando a precisão dos instrumentos e a importância dessas grandezas na avaliação do desempenho da obra.

Através da análise do deslocamento foi verificado a progressão do efeito dos recalques e dos deslocamentos horizontais em profundidade, e o nível de sua evolução na série ao longo do tempo. Para tanto, foram comparados os gráficos do deslocamento, da velocidade e realizada a análise comparativa, no qual compreende a avaliação dos pontos de instrumentados visando ter uma compreensão sobre a interferência da obra de estabilização nos aterros

8.1.2.1 Mapa da interpolação dos dados dos marcos superficiais

Os deslocamentos de marcos superficiais são distribuídos espacialmente e representam fenômenos estocásticos contínuos (aleatórios) e, portanto, podem ser representados por uma variável regionalizada. O nível de dependência entre as variáveis regionalizadas é representado pelo semivariograma. O semivariograma é a ferramenta básica na estimação através da geoestatística, haja vista que expressa o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental e permite a estimativa dos parâmetros com os quais os valores não amostrados são estimados por meio da técnica de interpolação conhecida como krigagem, permitindo a construção de mapas e interpretação da variabilidade espacial (CURRAN & ATKINSON, 1998; WOODCOCK et al., 1988; YAO et al., 2014).

Os métodos de krigagem usam a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com a variância mínima, ou seja, são estimadores ótimos (LANDIM, 2006). Foi escolhida a krigagem ordinária, pois as flutuações locais da média são consideradas, limitando o domínio de sua estacionaridade para a vizinhança do local, sendo a média constante, mas desconhecida (LANDIM, 2006). Já a krigagem universal é o método para os casos em que o processo estocástico não é estacionário, ou seja, o processo apresenta uma tendência (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1997; LANDIM, 2006).

Em ambiente SIG, por meio do *software* ArcGIS foi criada uma camada vetorial, considerando um buffer de 20 metros da localização de cada marco superficial,

utilizada como área limite para interpolação dos dados. O método de interpolação utilizado para obter os rasters dos dados dos deslocamentos Vertical foi o Kriging Ordinário, através da extensão 3D Analyst, que gera campos numéricos a partir de dados pontuais (Interpolação a Raster). Os dados de entrada para o processamento foram constituídos por arquivos em formato vetor (pontos) contendo a posição dos deslocamentos dos marcos superficiais (latitude e longitude), com o valor dos deslocamentos como dado associado (valor z).

Para uma melhor visualização dos dados, optou-se por representar em degradê verde os valores com menores deslocamentos, e em degradê variando para o vermelho os valores com maiores deslocamentos, estabelecendo assim um maior contraste entre os valores.

8.1.2.1.1 Avaliação da acurácia das interpolações

Para a avaliação da acurácia das interpolações foram calculados o erro médio quadrático (RMSE – Root Mean Square Error), o erro médio (ME – Mean Error) e o coeficiente de correlação de Pearson (r).

a) Erro Médio Quadrático (RMSE)

O RMSE é a medida da magnitude média dos erros estimados, tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados, calculado pela Equação 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (1)$$

Em que: E_i e O_i são os valores estimados e observados (medidos), respectivamente, e n é o número de observações. A desvantagem é que bastam alguns poucos valores discrepantes para que ocorra aumento significativo em sua magnitude (STONE, 1993).

b) Erro Médio (ME)

O ME indica o quanto o modelo está sendo subestimado (valor negativo) ou superestimado (valor positivo). O ideal é valor de MBE tendendo a zero. Uma

desvantagem apresentada é no cancelamento de um valor positivo por um negativo (WEBSTER e OLIVER, 2007). Conforme Equação 2.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (E_i - O_i) \quad (2)$$

c) Coeficiente de correlação de Pearson (r)

O coeficiente de correlação de Pearson (r) de duas variáveis aleatórias é uma medida de sua dependência linear, mede o grau da correlação e a direção dessa correlação. Este coeficiente assume valores entre -1 e 1. Quando 1 significa correlação perfeita positiva entre as duas variáveis, quando -1 significa correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui e quando 0 significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra (KENDALL, 1979; FISHER, 1992; WEBSTER e OLIVER, 2007). O coeficiente de correlação de Pearson é definido conforme a Equação 3:

$$\rho(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (3)$$

Onde μ_A e σ_A são a média e o desvio padrão de A , respectivamente, e μ_B e σ_B são a média e o desvio padrão de B .

A matriz de coeficientes de correlação de duas variáveis aleatórias é a matriz de coeficientes de correlação para cada combinação de variáveis pareadas. Como A e B estão sempre correlacionados diretamente entre si, as entradas diagonais são apenas 1, ou seja, conforme a Equação 4.

$$r = \begin{pmatrix} 1 & \rho(B, A) \\ \rho(A, B) & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

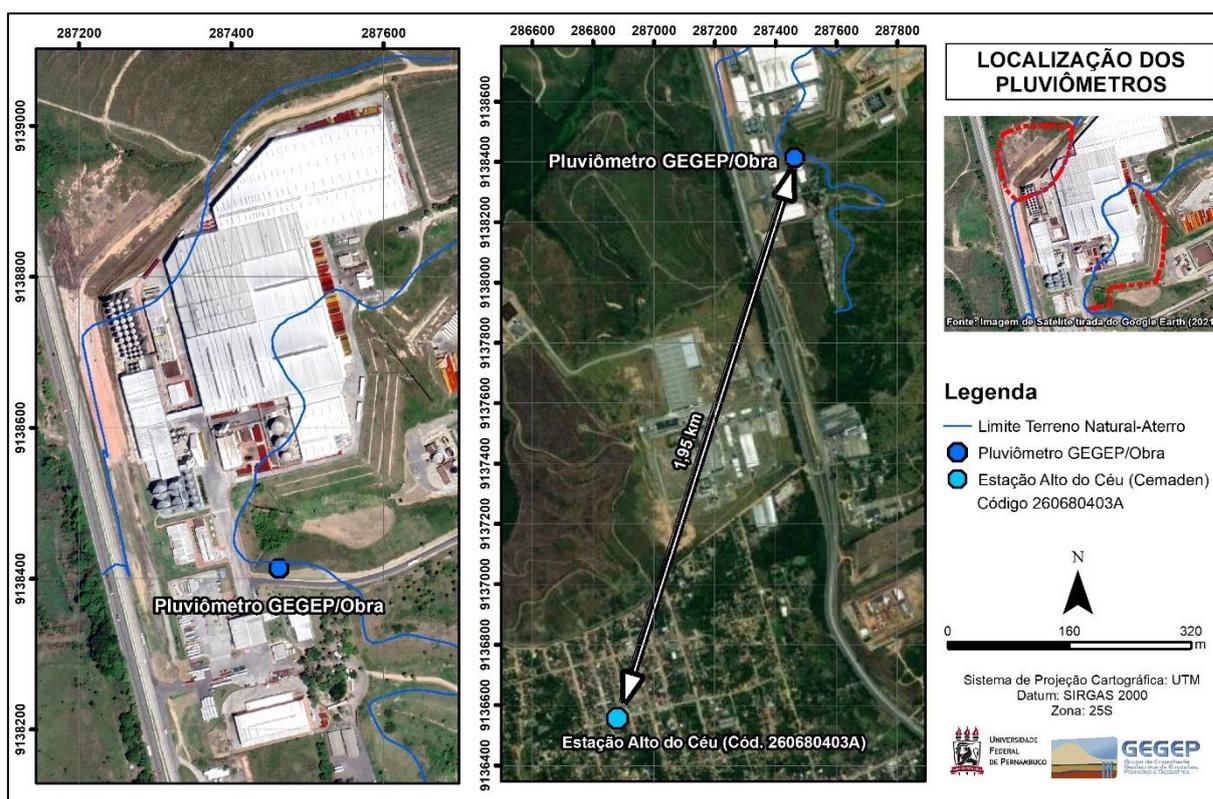
8.2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A seguir estão apresentados os resultados e as discussões dos dados obtidos pela rede de monitoramento instalado para acompanhamento da obra durante e após a estabilização dos aterros.

8.2.1 Dados dos pluviômetros

Neste item estão apresentados os resultados da precipitação provenientes do pluviômetro da Estação Alto do Céu (Código 260680403A), situado no município de Igarassu – PE, pertencente ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), selecionado por ser o mais próximo ao local em monitoramento (Figura 61). Buscando validar a representatividade das leituras da Estação Alto do Céu para área de estudo, foi realizado um comparativo das leituras do pluviômetro instalado na área de estudo, cujo resultado consta na Seção 5.3.

Figura 61 – Localização dos pluviômetros.

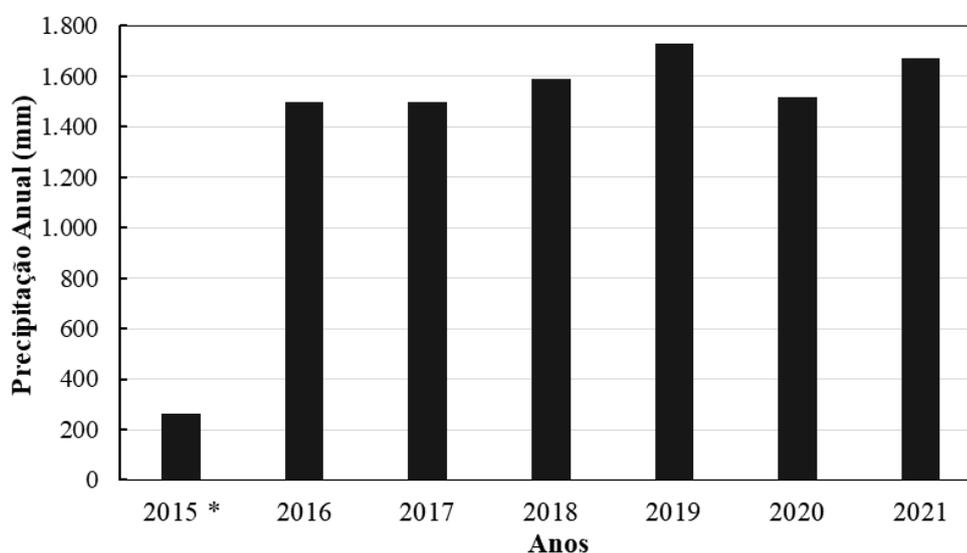


Fonte: O Autor (2022).

Foram analisados os valores de precipitação entre os anos de 2015 a 2021, salienta-se que os dados de 2015 iniciam a partir do mês de agosto, sendo essa a série história disponível no banco de dados do CEMADEN. Verificou-se também a interação entre os dados de chuva e de deslocamento medidos pelos instrumentos, a serem apresentados mais adiante.

Inicialmente, foram gerados gráficos do acumulado anual para uma melhor visualização do comportamento do regime pluviométrico ao longo dos anos (Figura 62). O ano de 2019 destacou-se como o mais chuvoso (1.729,3 mm anual), em seguida vem o ano de 2021 (1.672,6 mm anual).

Figura 62 – Precipitação acumulada anual em mm.

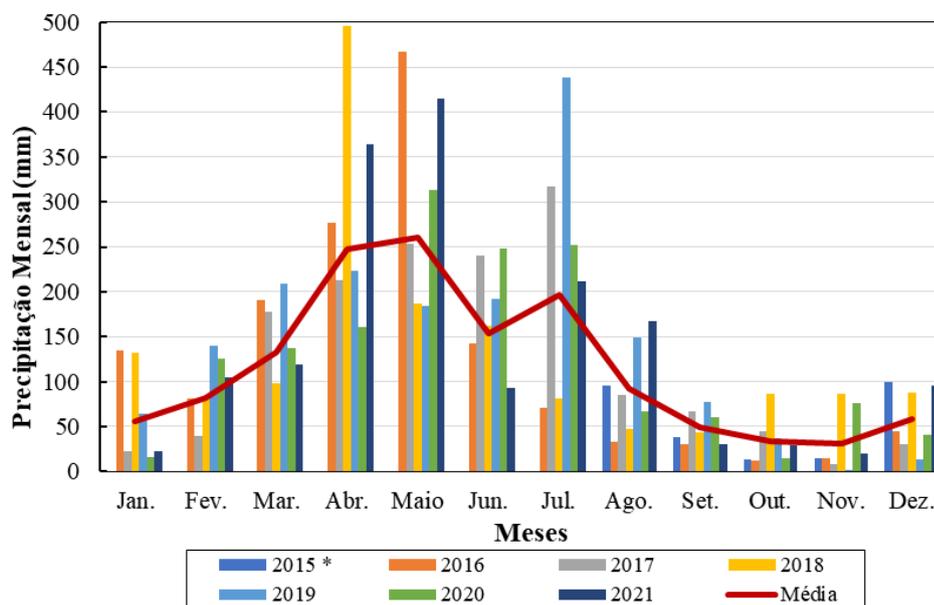


*Os dados de 2015 são a partir do mês de Agosto

Fonte: O Autor (2022).

Na sequência, foram obtidos os acumulados mensais, possibilitando entender a dinâmica de chuva ao longo dos meses (Figura 63). O período de chuvas mais intensas é observado, em geral, entre os meses de abril a julho, já o período seco fica, em geral, entre os meses de setembro a novembro. Conforme os dados, nos últimos sete anos as máximas precipitações ocorreram no mês de maio, com pico de 466 mm em 2016; 313 mm em 2020 e 415 mm em 2021. Observa-se ainda que o mês de abril de 2018 atingiu o maior índice de precipitação, com 496 mm de chuva, de acordo com os dados pluviométricos coletados.

Figura 63 – Dados de precipitação mensal de 2015 a 2021 e respectiva média mensal representativas dos anos analisados.

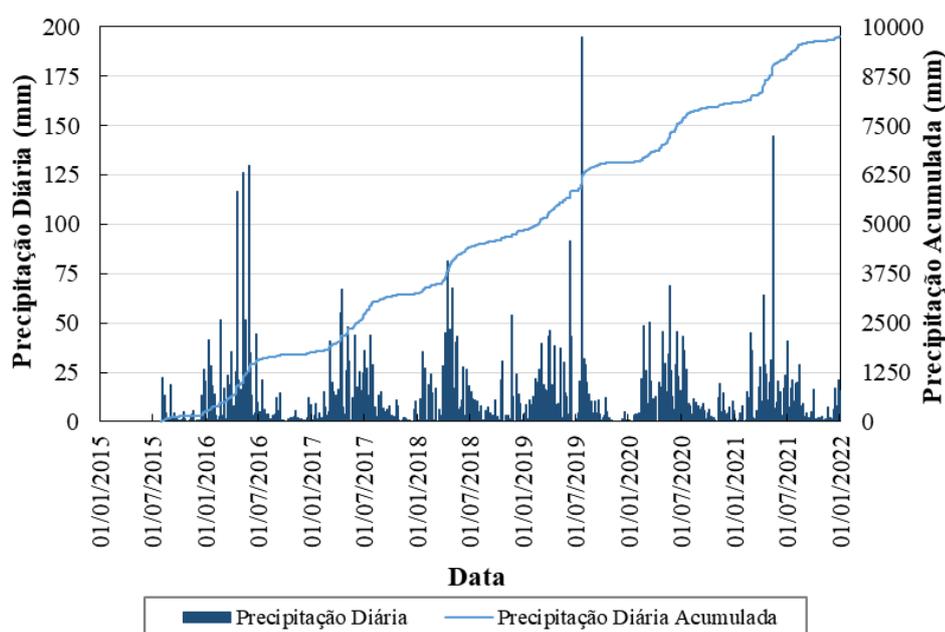


*Os dados de 2015 são a partir do mês de Agosto

Fonte: O Autor (2022).

Os valores diários da precipitação e acumulado ao longo do tempo está apresentado na Figura 64, com valores chuva sempre representam índice pluviômetro do dia. Pode-se observar que ocorreu um pico de precipitação em 24/07/2019 que correspondeu a 195 mm e em maio de 2021 nota-se um pico em torno de 144 mm, que correspondem aos meses mais chuvosos para o pluviômetro analisado.

Figura 64 – Precipitação diária e acumulada (mm) vs tempo.

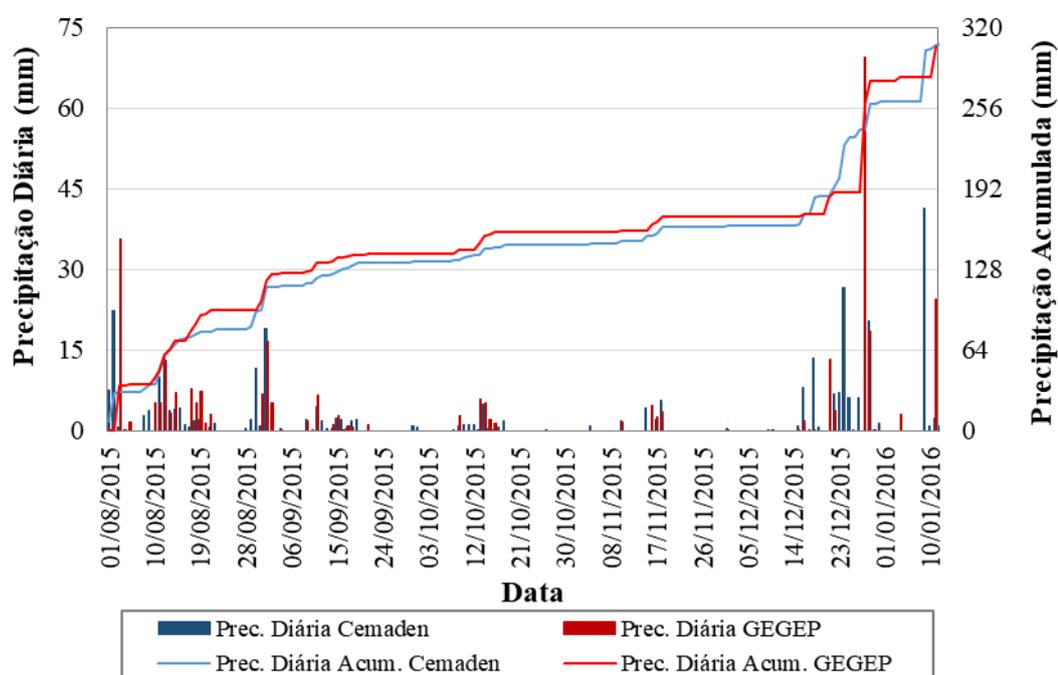


Fonte: O Autor (2022).

Com o intuito de estudar a chuva no local da obra, foi instalado um pluviômetro, o qual fez leituras a partir de 01/08/2015 até 10/01/2016. As leituras para este pluviômetro foram realizadas para os dados de chuva no período de 08h às 08h do dia seguinte. Além disso, aos finais de semana não eram realizadas leituras no equipamento, ou seja, o dado da segunda-feira retratava o acumulado do final de semana. Também nos feriados não eram realizadas leituras no pluviômetro, sendo registrado o acumulado de chuva no dia útil posterior.

Comparando as informações entre o pluviômetro da Estação Alto do Céu e o instalado no local da obra, percebe-se que há pequenas discrepâncias em valores de precipitação diária para os dois pluviômetros (Figura 65). Essas diferenças são explicadas pelos diferentes intervalos de leitura dos dois equipamentos. Contudo, pode-se observar que os valores de precipitação acumulada retratados pelas curvas são bem similares, de modo que ao fim do período analisado os valores acumulados são próximos.

Figura 65 – Comparativo entre as leituras do do pluviômetro Alto do Céu e o instalado na obra pelo GEGEP.

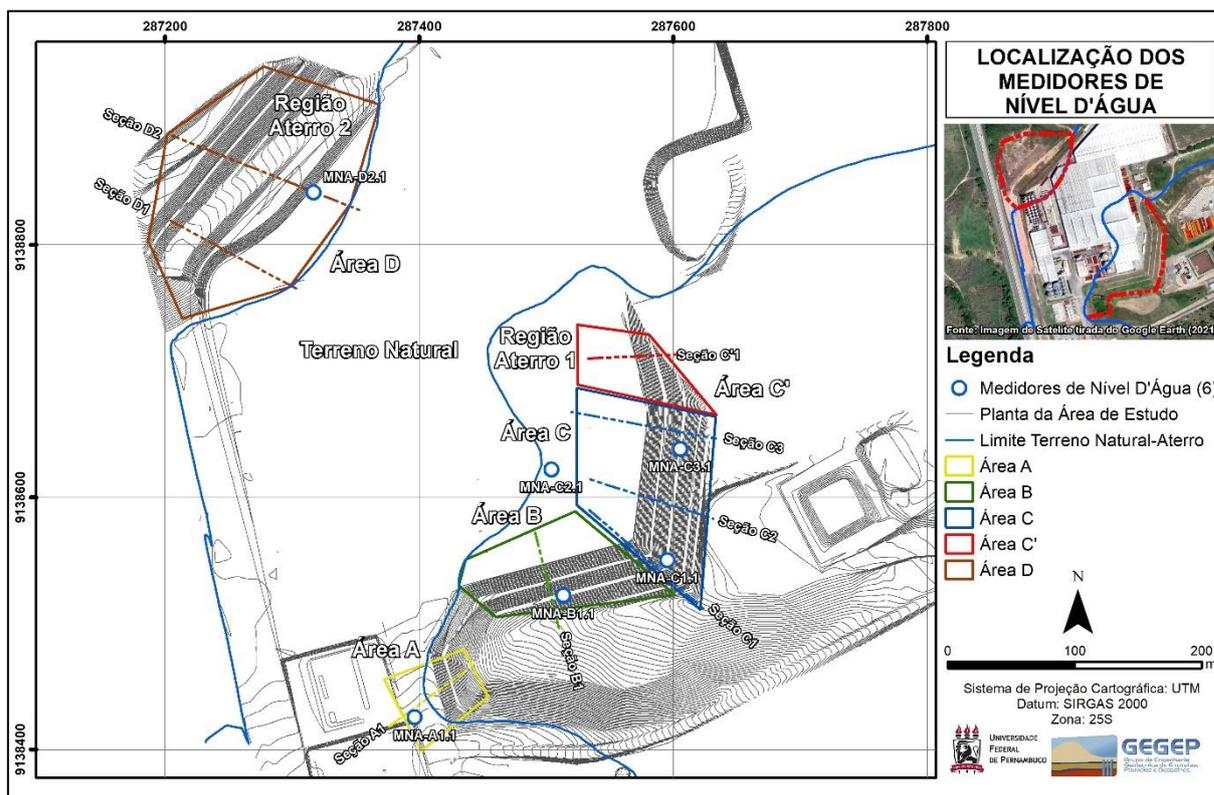


Fonte: O Autor (2022).

8.2.2 Dados dos medidores de nível d'água

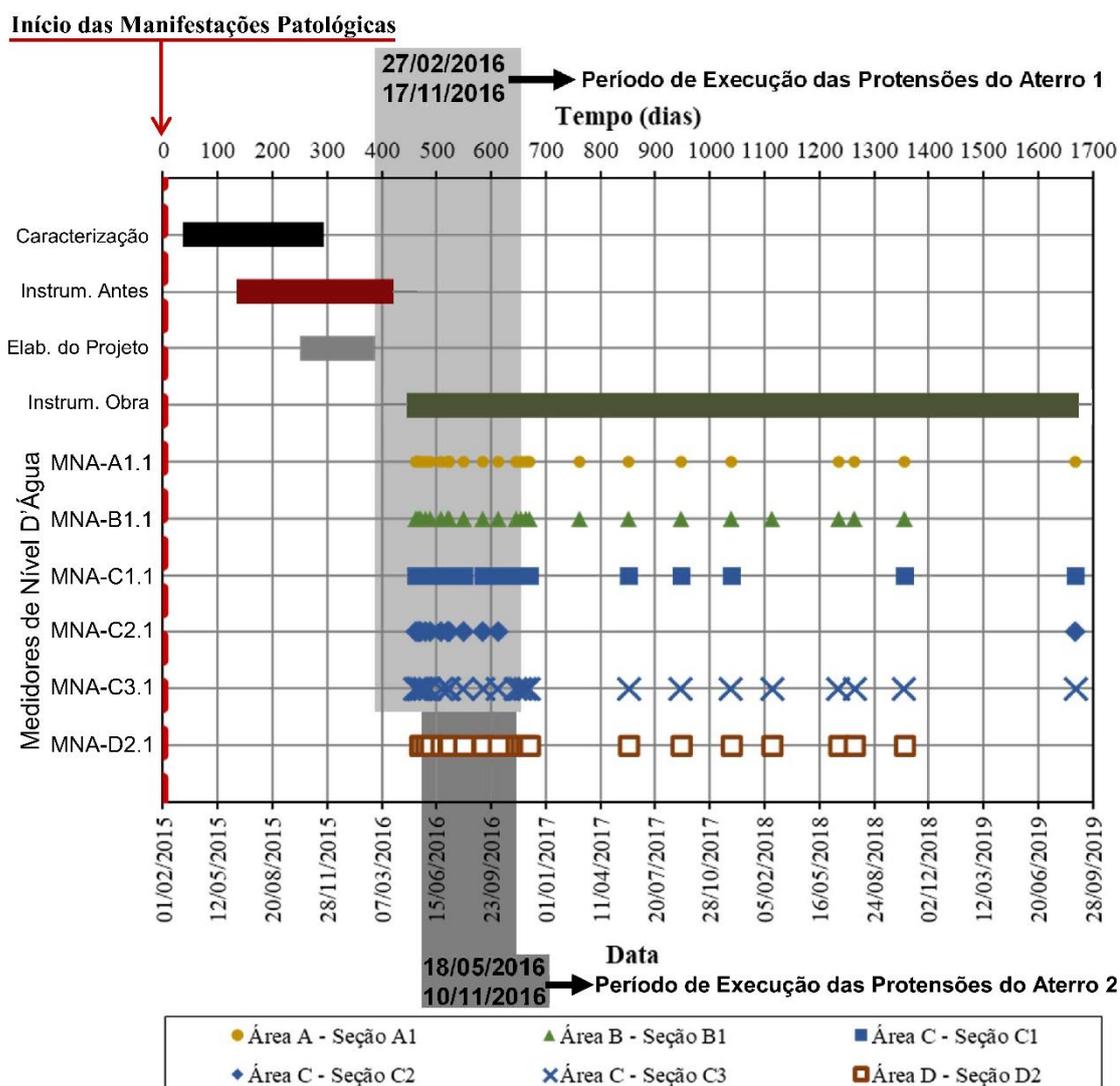
Nesta seção estão apresentados os resultados da variação do nível d'água medidos por meio dos medidores de nível d'água (MNA) instalados na obra (Figura 66). As datas de leituras dos seis MNA instalados na obra estão indicadas na Figura 67 de forma síntese, de modo a permitir melhor entendimento temporal do leitor.

Figura 66 – Localização dos medidores de nível d'água.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 67 – Indicação das leituras realizadas nos medidores de nível d'água.



Fonte: O Autor (2022).

A seção A1 está instrumentada com 1 medidor de nível d'água denominado de MNA-A1.1. Na Figura 68a é apresentada a localização do instrumento na seção A1. A variação do nível d'água ao longo do tempo (Figura 68b) demonstra que a partir de 1400 dias é verificada uma variação crescente do nível d'água, sendo a variação máxima observada de 0,2 m (20 cm). Tal comportamento pode estar relacionado com a precipitação no período conforme apresentado na Figura 68c onde se observa que houve sucessivas precipitações, sendo a precipitação de maior magnitude da ordem 195 mm. É possível que os sucessivos volumes precipitados no período em análise tenham saturado o material após infiltração e percolação e que a precipitação máxima ocorrida no período tenha contribuído diretamente para recarga freática gerando com isso o aumento do nível d'água observado no instrumento.

Na seção B1 consta 1 medidor de nível d'água denominado de MNA-B1.1 e sua localização pode ser observada na Figura 69a. O comportamento da variação do nível d'água ao longo do tempo é apresentado na Figura 69b, ao avaliar o referido gráfico nota-se que a partir do tempo de 700 dias há uma variação crescente chegando ao valor máximo de 0,20 m (20cm) no tempo próximo de 1.100 dias. Posteriormente é observado uma variação crescente da ordem de 3,0 m (300 cm) decrescendo para uma variação da ordem de 0,3 m (30 cm) entre os tempos de 1.200 a 1400 dias. Ao se avaliar a precipitação no período (Figura 69c), observa-se que houve precipitações significativas com precipitações da ordem de 81 mm no tempo de variação crescente observado na Figura 69b.

A seção C1 está instrumentada com 1 medidor de nível d'água denominado de MNA-C1.1. Na Figura 70a é apresentada a localização do instrumento na seção C1. A variação do nível d'água ao longo do tempo (Figura 70b) demonstra que a partir de 1.100 dias é verificada uma variação crescente do nível d'água, sendo a variação máxima observada de 0,3 m (30 cm) e posteriormente decrescendo para ordem uma variação da ordem 0,2 m (20 cm) próximo ao tempo de 1.700 dias. Tal comportamento sugere ter influência da precipitação no período conforme apresentado na Figura 70c onde se observa que houve sucessivas precipitações, sendo a precipitação de maior magnitude da ordem 195 mm. É possível que os sucessivos volumes precipitados no período em análise tenham saturado o material após infiltração e percolação e que a precipitação máxima ocorrida no período tenha contribuído diretamente para recarga freática gerando com isso o aumento do nível d'água observado no instrumento corroborando com o comportamento verificado na seção A1.

Na seção C2 consta 1 medidor de nível d'água denominado de MNA-C2.1 e sua localização pode ser observada na Figura 71a. O comportamento da variação do nível d'água ao longo do tempo é apresentado na Figura 71b, ao avaliar o referido gráfico nota-se que entre o tempo de 1500 e 1700 dias há uma variação crescente chegando ao valor máximo de 1,50 (150 cm). Ao se avaliar a precipitação no período (Figura 71c), observa-se que houve precipitações significativas com precipitações da ordem de 195 mm. Esse comportamento é similar ao ocorrido na seção A1.

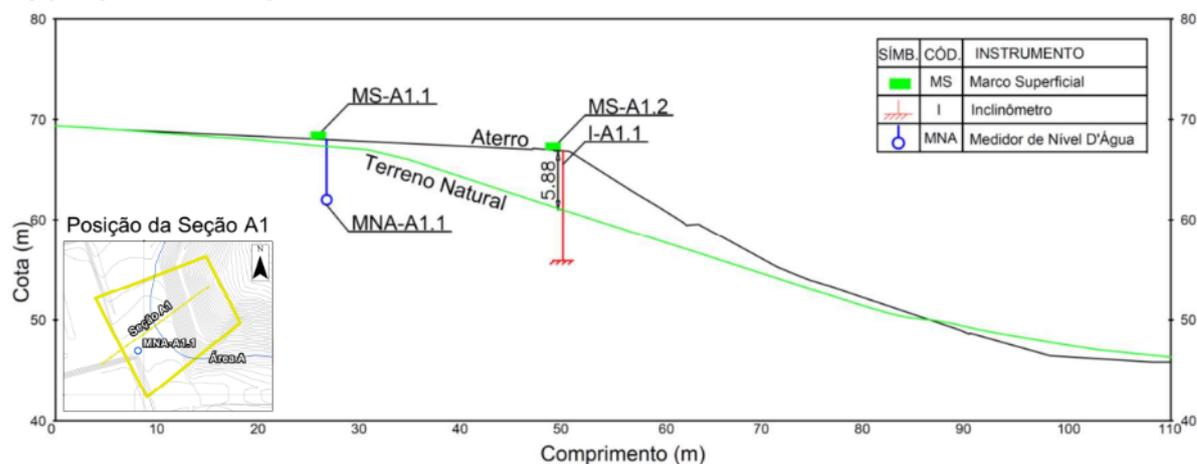
A seção C3 está instrumentada com 1 medidor de nível d'água denominado de MNA-C3.1. Na Figura 72a é apresentada a localização do instrumento na seção C3. A variação do nível d'água ao longo do tempo (Figura 72b) demonstra a existência de

uma variação crescente no tempo de 500 dias com valor máximo de 3,10 m (310 cm), seguido de um decréscimo com estabilização na variação de 0,2 m (20 cm) entre o período de 600 e 800 dias, outra variação crescente seguida de estabilização da ordem de 1,20 m (120 cm) entre o período de 800 a 1.100 dias, logo após houve um decréscimo na variação da ordem de -0,70 m (-70 cm) entre o período de 1.100 a 1.300 dias e por fim uma variação crescente da ordem de 3,30 m (330 cm) entre o período de 1.300 a 1.700 dias. Tal comportamento sugere ter influência direta das precipitações no período conforme apresentado na Figura 72c onde se observa que os sucessivos volumes precipitados nos períodos em análise tenham saturado o material após infiltração e percolação contribuíram para as variações do nível freático.

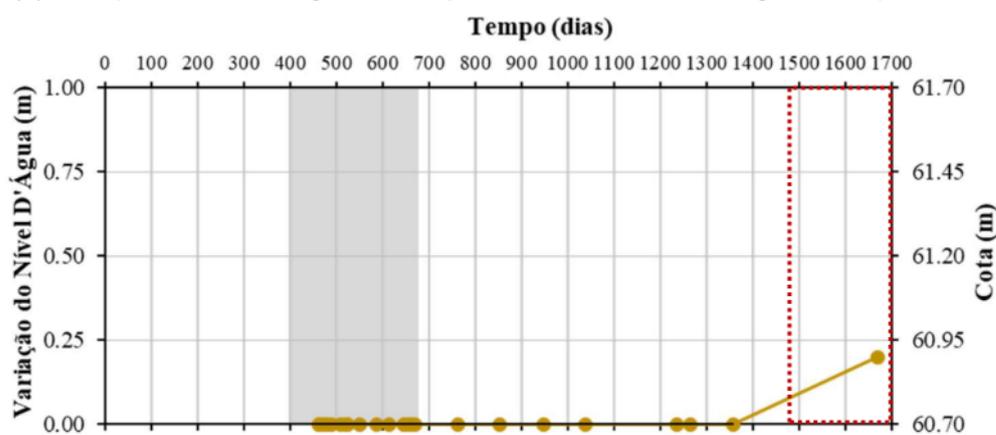
Na seção D2 consta 1 medidor de nível d'água denominado de MNA-D2.1 e sua localização pode ser observada na Figura 73a. O comportamento da variação do nível d'água ao longo do tempo é apresentado na Figura 73b, ao avaliar o referido gráfico nota-se que no início das leituras a variação do nível freático era de 7,7 m (770 cm) e decresceu para 4,70 (470 cm) entre o período de 400 a 600 dias, em seguida observa-se não se observou variação do nível freático no período entre 600 a 800 dias, posteriormente observou-se um crescimento da variação da ordem de 4,90 m (490 cm) entre o período de 800 a 1.100 dias e por fim houveram decréscimos da ordem 4,60 m (460 cm) e 2,80 m (280 cm) entre o período de 1.200 a 1.400 dias. Ao se avaliar a precipitação no período (Figura 73c), não fica claro a influência das precipitações na variação do nível freático, conforme observado nas demais seções monitoradas.

Figura 68 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção A1.

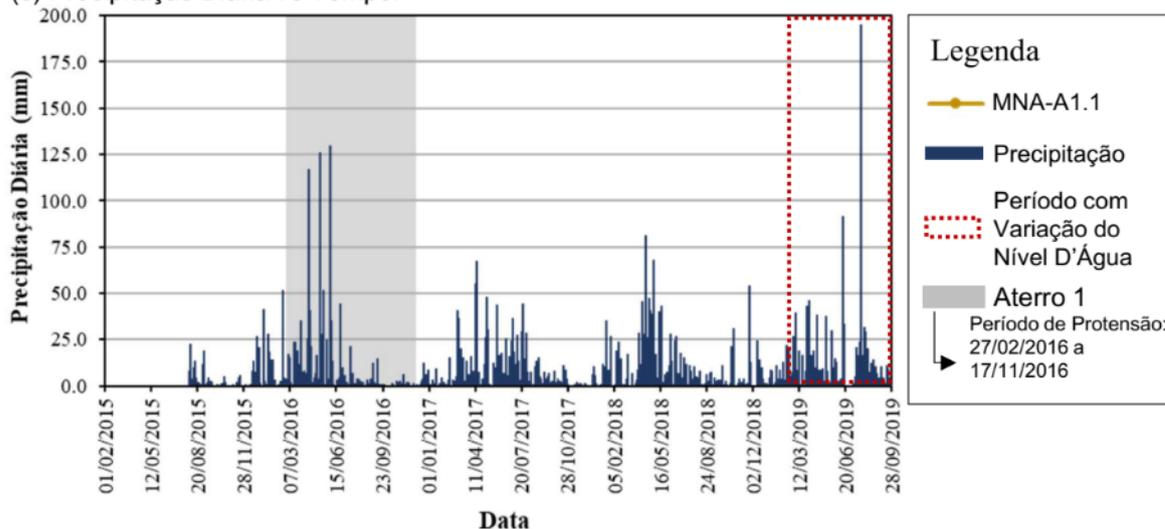
(a) Seção A1, ilustração dos instrumentos instalados.



(b) Variação do Nível D'Água vs Tempo do medidor de nível d'água da Seção A1.



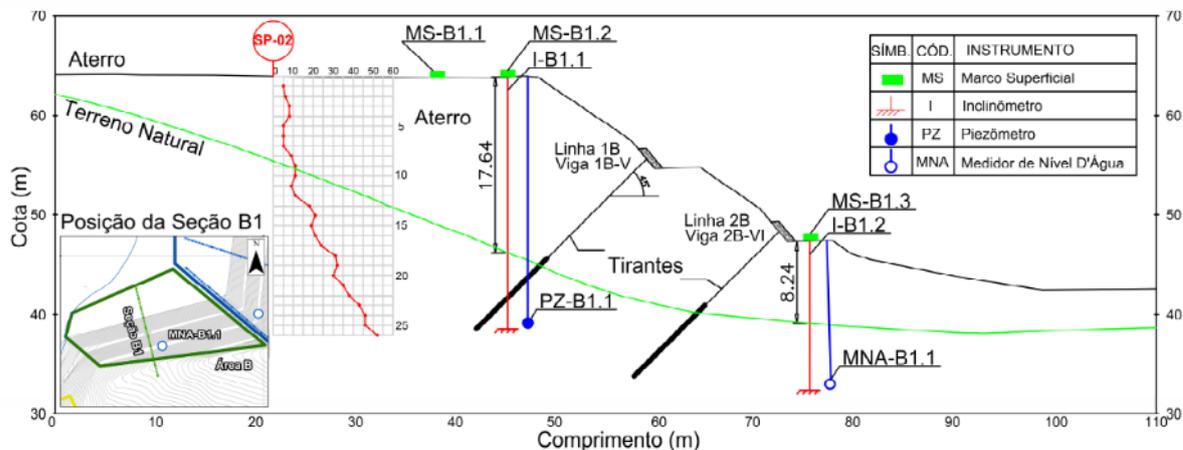
(c) Precipitação Diária vs Tempo.



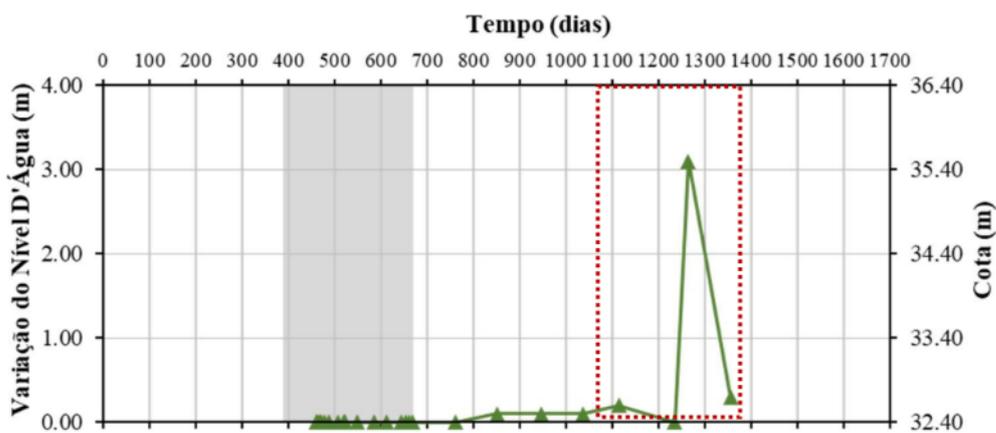
Fonte: O Autor (2022).

Figura 69 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção B1.

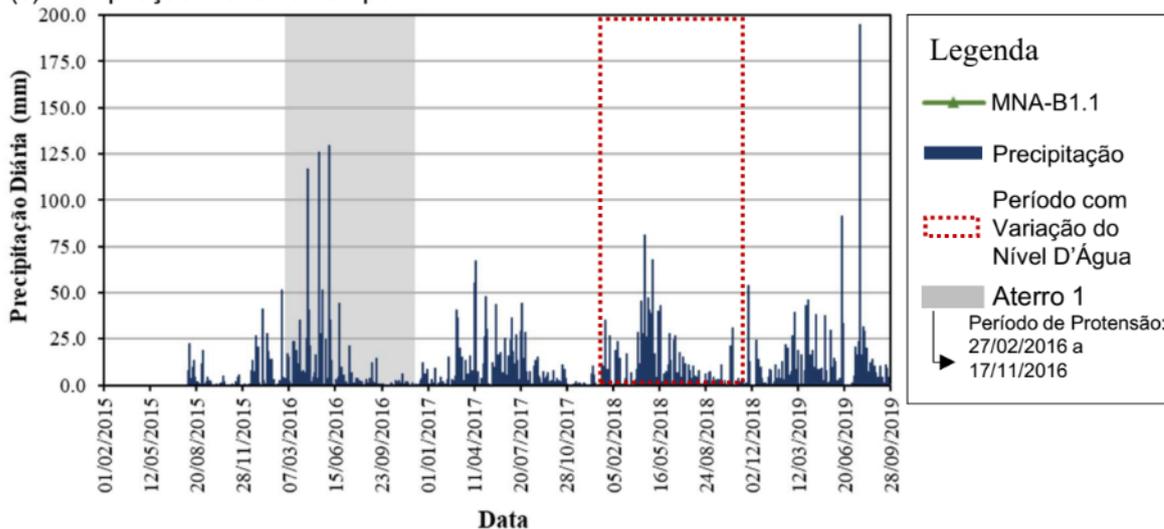
(a) Seção B1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



(b) Variação do Nível D'Água vs Tempo do medidor de nível d'água da Seção B1.



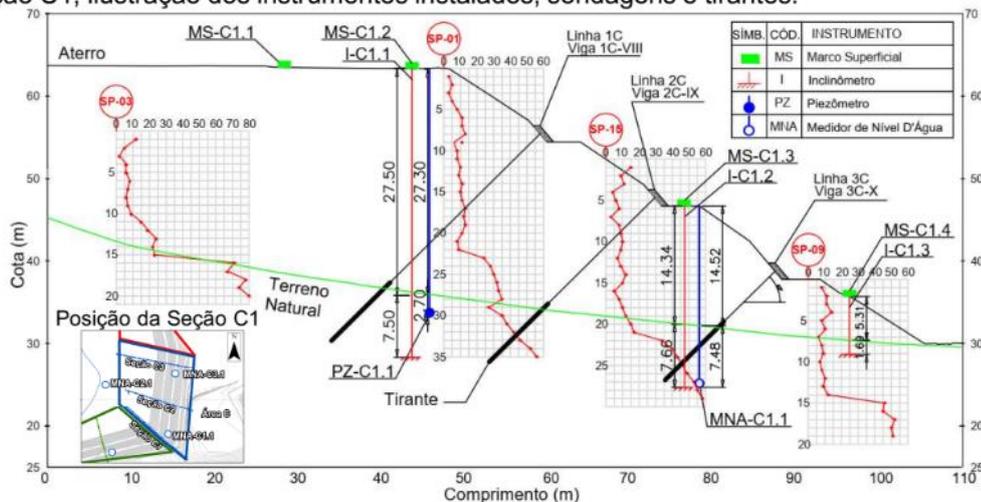
(c) Precipitação Diária vs Tempo.



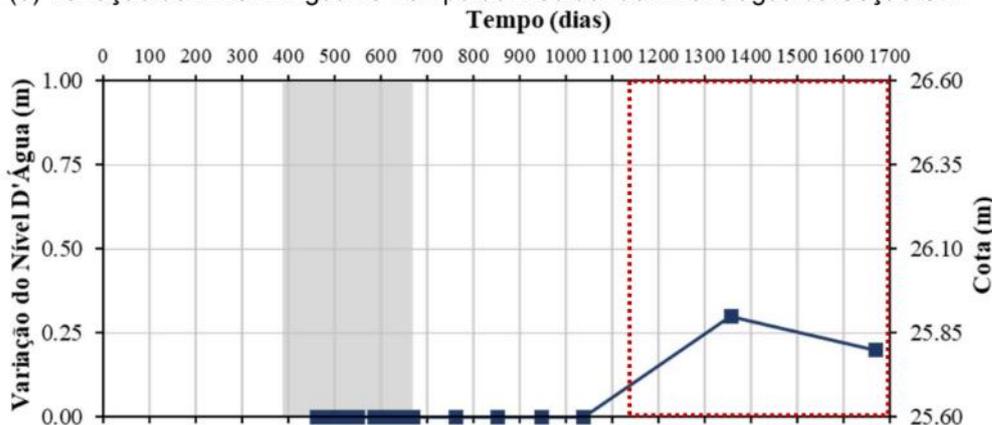
Fonte: O Autor (2022).

Figura 70 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção C1.

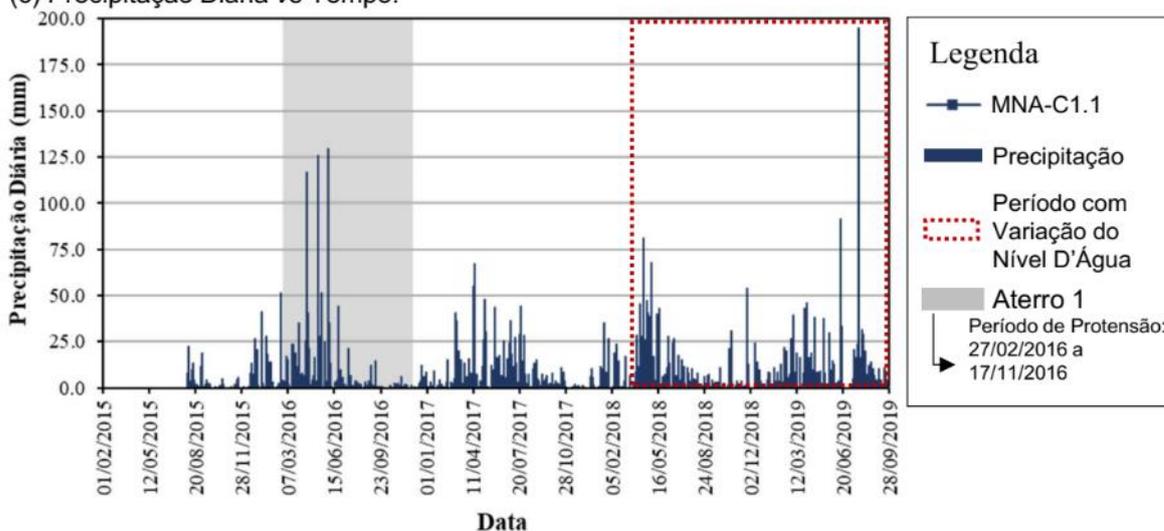
(a) Seção C1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Variação do Nível D'Água vs Tempo do medidor de nível d'água da Seção C1.



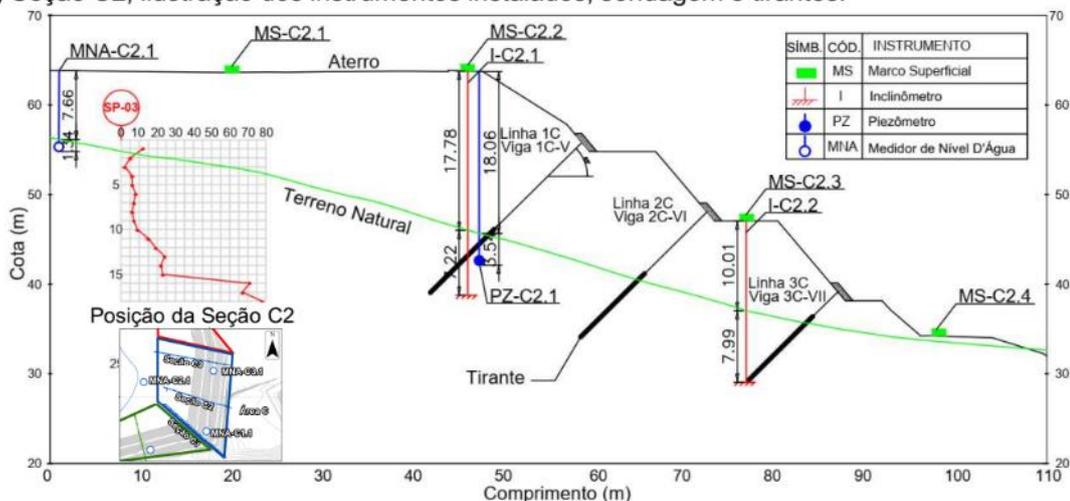
(c) Precipitação Diária vs Tempo.



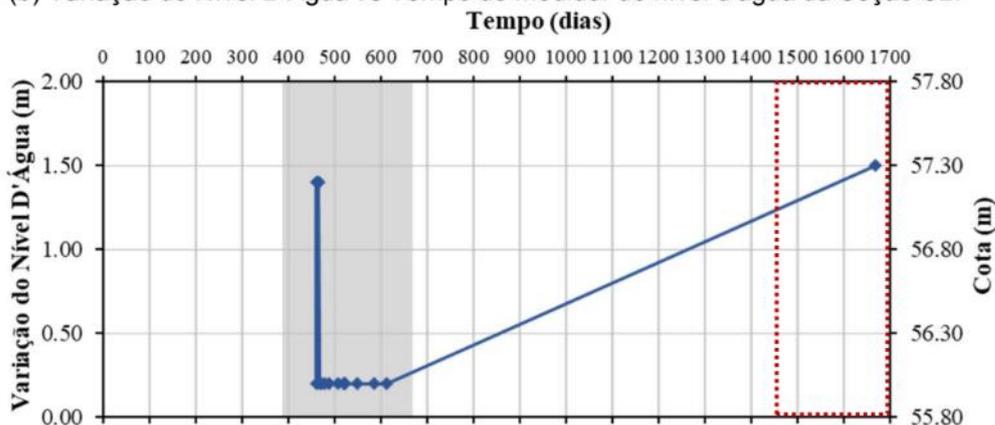
Fonte: O Autor (2022).

Figura 71 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção C2.

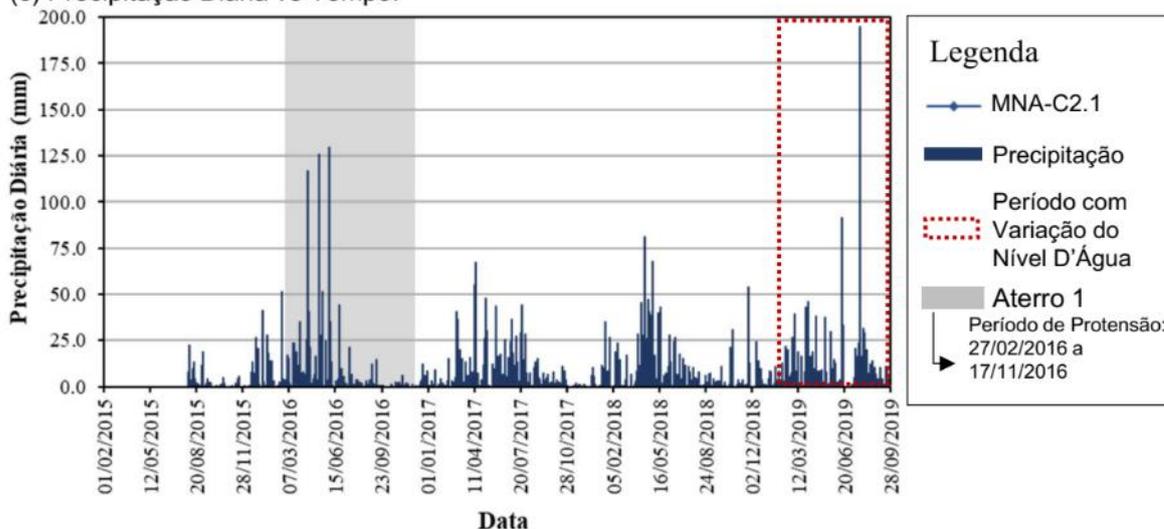
(a) Seção C2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



(b) Variação do Nível D'Água vs Tempo do medidor de nível d'água da Seção C2.



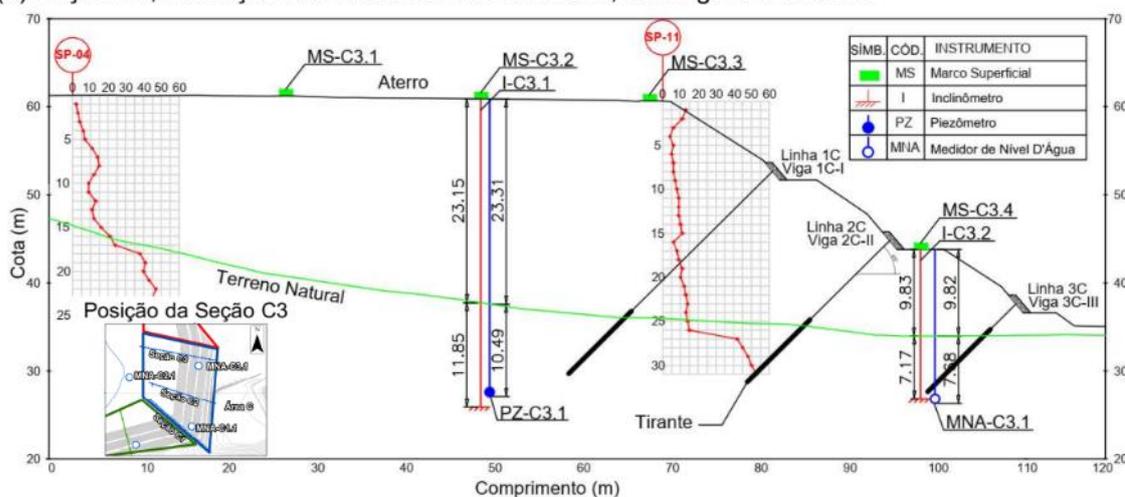
(c) Precipitação Diária vs Tempo.



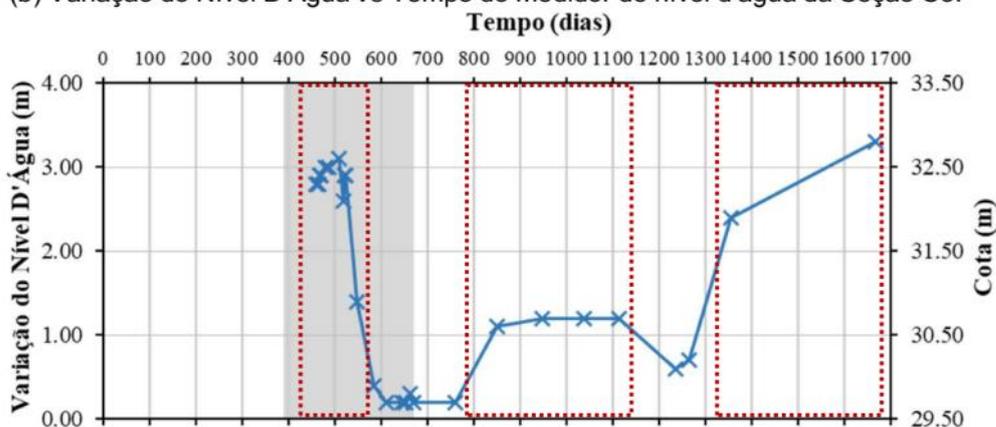
Fonte: O Autor (2022).

Figura 72 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção C3.

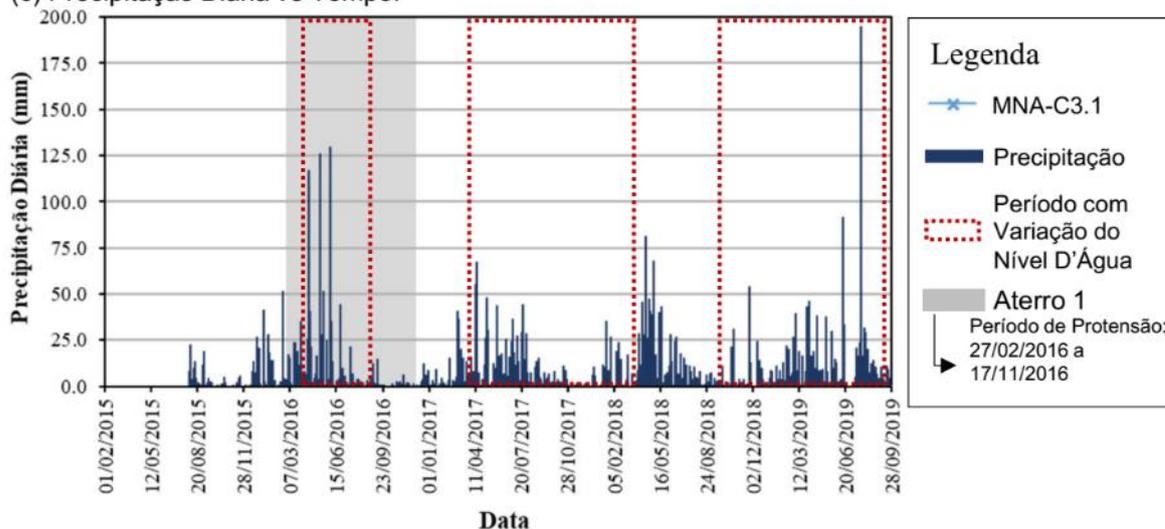
(a) Seção C3, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Variação do Nível D'Água vs Tempo do medidor de nível d'água da Seção C3.



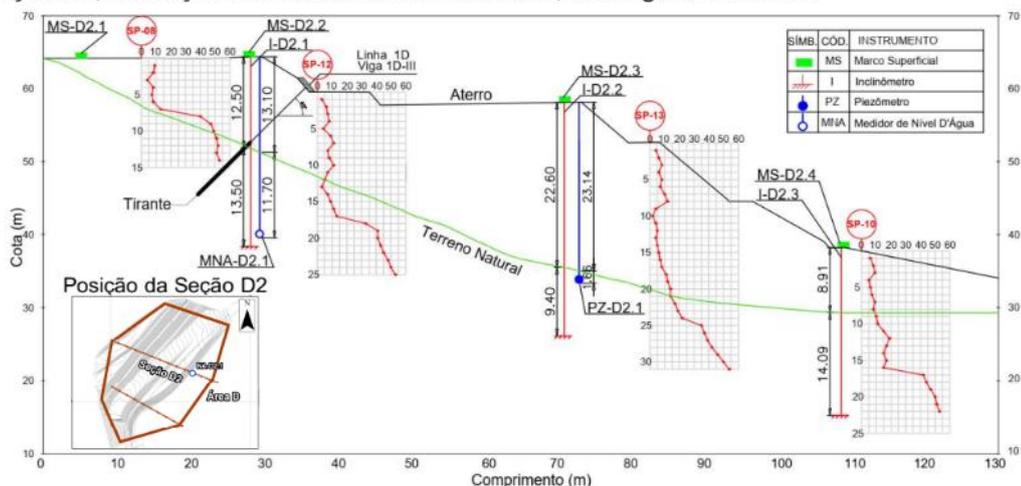
(c) Precipitação Diária vs Tempo.



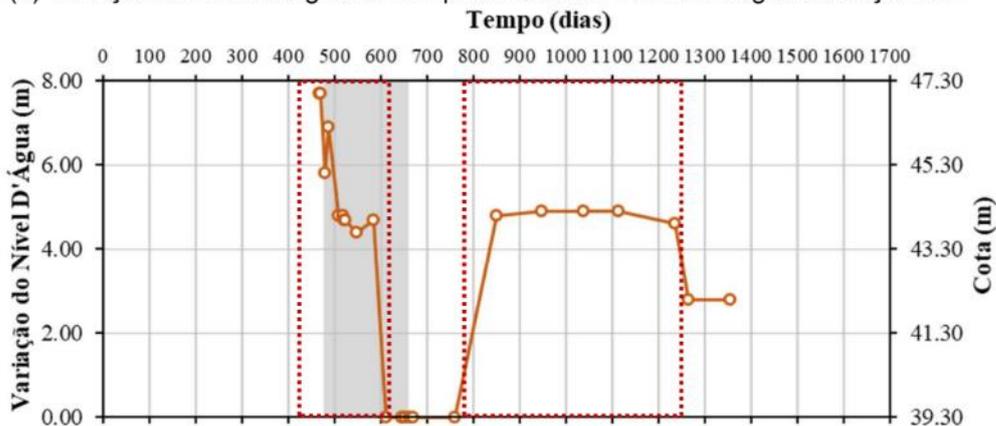
Fonte: O Autor (2022).

Figura 73 – Resultado do medidor de nível d'água da Seção D2.

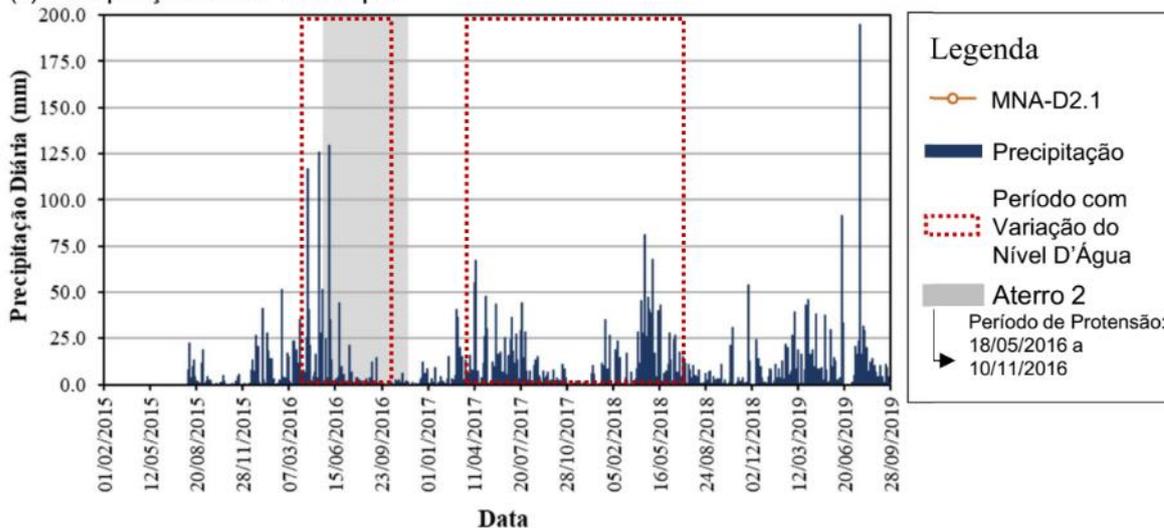
(a) Seção D2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Variação do Nível D'Água vs Tempo do medidor de nível d'água da Seção D2.



(c) Precipitação Diária vs Tempo.

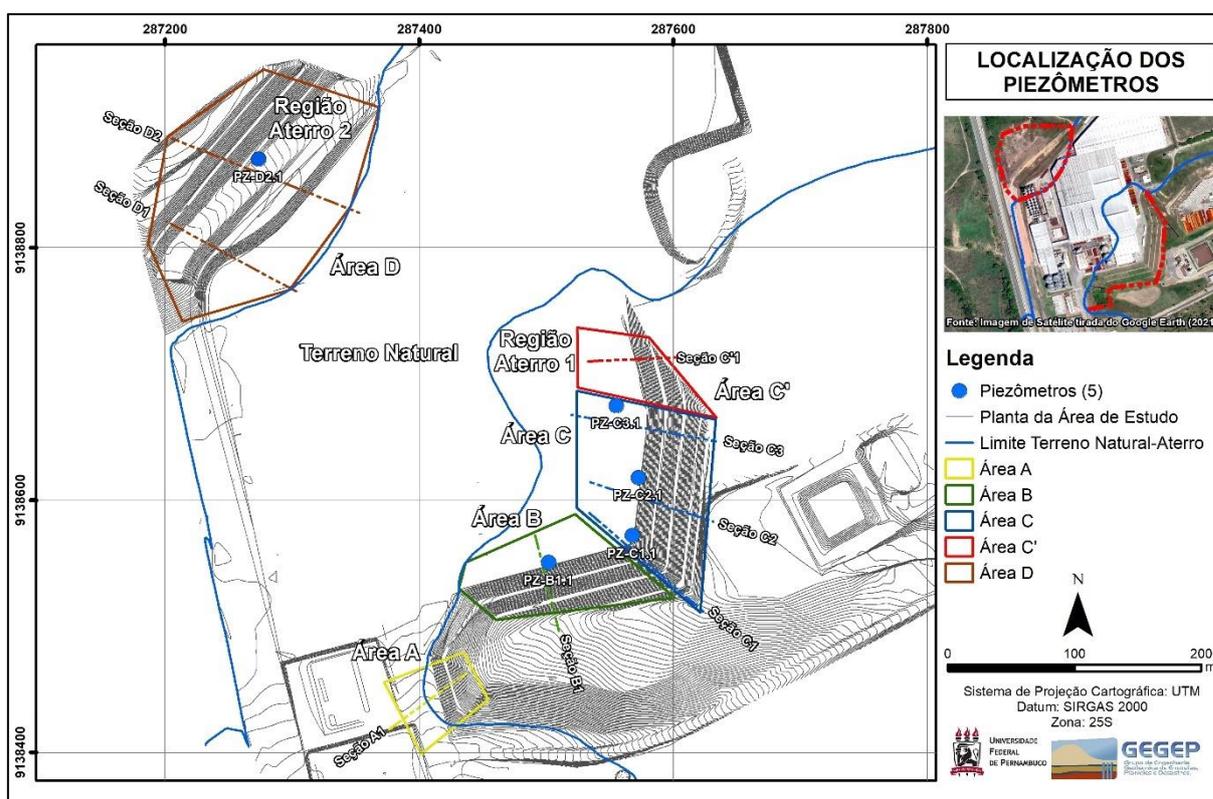


Fonte: O Autor (2022).

8.2.3 Dados dos piezômetros

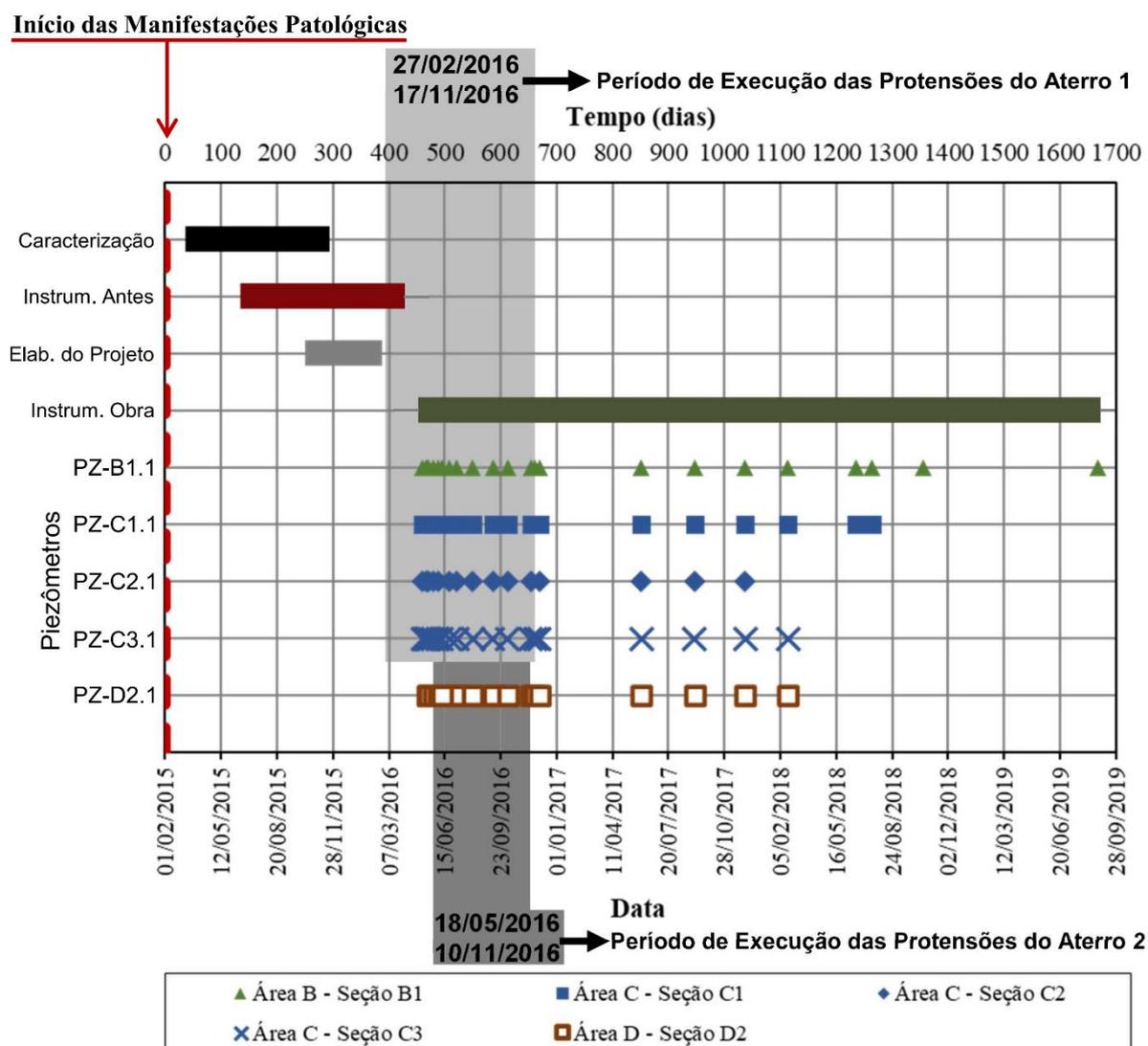
Nesta seção estão apresentados os resultados da coluna de água em pontos específicos medidos por meio dos piezômetros (PZ) de Casagrande instalados na obra (Figura 74). As datas de leituras dos cinco PZ instalados na obra estão indicadas na Figura 75 de forma síntese, de modo a permitir melhor entendimento temporal do leitor.

Figura 74 – Localização dos piezômetros de Casagrande.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 75 – Indicação das leituras realizadas nos piezômetros.



Fonte: O Autor (2022).

A seção B1 está instrumentada com 1 Piezômetro do tipo Casagrande denominado PZ-B1.1. Na Figura 76a é ilustrada a localização do instrumento na seção B1. A variação da coluna de água ao longo do tempo (Figura 76b) apresenta inicialmente uma tendência de estabilização dos valores até o tempo de 1100 dias, quando a variação de coluna de água cresce e atinge em torno de 1,80 m (180 cm). Percebe-se também que de maneira geral a precipitação (Figura 76c) não influenciou de forma significativa para que tivesse um aumento da coluna de água e consequentemente da carga piezométrica.

A seção C1 consta com 1 Piezômetro do tipo Casagrande denominado PZ-C1.1. Na Figura 77a é ilustrada a localização do instrumento na seção C1. A variação da coluna de água ao longo do tempo (Figura 77b) apresenta inicialmente uma tendência

de estabilização dos valores até o tempo de 1250 dias quando a medição atinge aproximadamente 1,50 m (150 cm). Percebe-se também que no período de 400 até 600 dias (Figura 77c) ocorreu um pequeno aumento da coluna de água e conseqüentemente da carga piezométrica, já que as precipitações chegaram a ordem de 125mm.

Na seção C2 pode-se observar 1 Piezômetro do tipo Casagrande denominado PZ-C2.1. Na Figura 78a é possível verificar a localização do instrumento na seção C2. Mediante a realização das leituras no instrumento pode-se obter a variação da coluna de água ao longo do tempo (Figura 78b), em que a mesma apresenta uma tendência de estabilização dos valores, visto que com exceção do período de 800 até 1000 dias a medição não ultrapassou 0,25 m (25 cm).

A seção C3 consta com 1 Piezômetro do tipo Casagrande denominado PZ-C3.1. Na Figura 79a é possível verificar a localização do instrumento na seção C3. O comportamento da variação da coluna de água ao longo do tempo é ilustrado na Figura 79b, onde os valores apresentam uma tendência de estabilização dos valores, com exceção das três primeiras leituras em que a coluna de água chegou a 3,90 m (390 cm). Vale ressaltar que nas primeiras leituras ocorreram precipitações significativas (Figura 79c), gerando assim um maior escoamento e preenchimento dos vazios do solo contribuindo para o aumento da carga piezométrica no maciço.

A seção D2 está instrumentada com 1 Piezômetro do tipo Casagrande denominado PZ-D2.1. Na Figura 80a encontra-se a localização do instrumento na seção C1. É possível verificar a variação da coluna de água ao longo do tempo na Figura 80b e nota-se que a mesma não apresenta uma variação significativa, já que no período da medição a lâmina de água não ultrapassou 0,3 m. É possível notar que a precipitação (Figura 80c) não influenciou de forma significativa para que houve-se um aumento da coluna de água e por conseqüência da carga piezométrica.

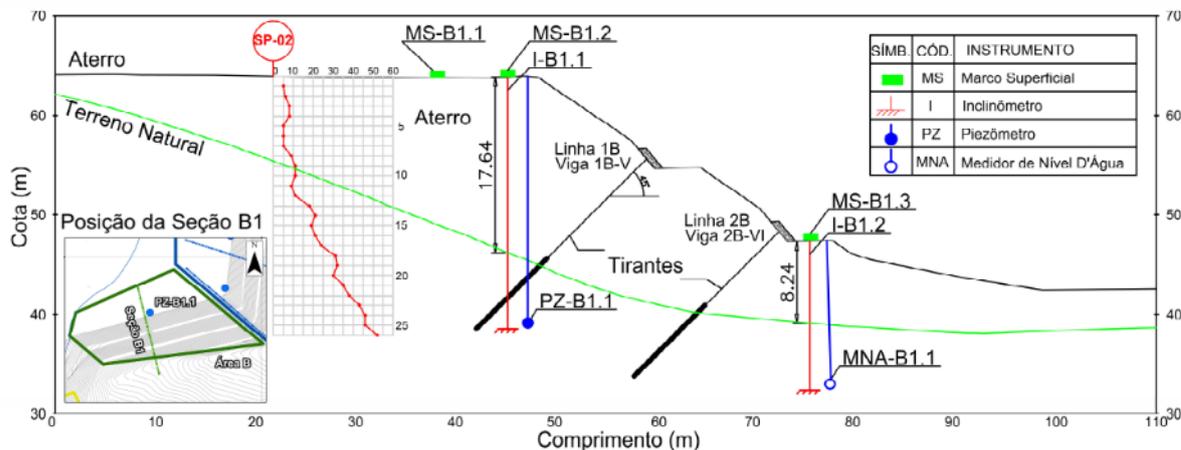
Ao longo tempo de resposta uma das desvantagens do piezômetro Casagrande, pois há a necessidade de um volume de água fluir adentro do furo de sondagem para se registrar uma mudança em níveis de água. Isto cria um tempo de resposta entre a pressão piezométrica da camada e o poço de monitoramento. Em camadas de baixa condutividade hidráulica, a taxa de equilíbrio pode ser devagar demais para propiciar uma informação útil dentro de um intervalo de tempo razoável. Com isso, o Autor afirma que quando se realizam as análises das poropressões devem ser tomadas em

conta não as precipitações do dia ou do dia anterior, mas sim, de pelo menos 5 dias, devido a estas variações serem produzidas pelos acúmulos. Cabe salientar que estas variações podem apresentar picos em dias que não há ocorrência de chuvas (ACEVEDO, 2013).

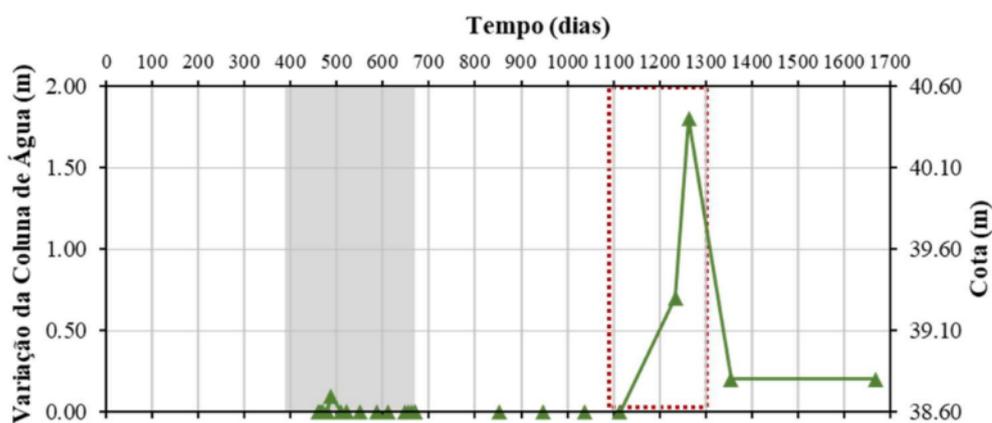
Além disso, de acordo com Cerqueira (2017) medidas via qualquer método ou equipamento necessitam de certo grau de cuidado, julgamento, habilidade ou destreza do observador. Erros pessoais são frequentemente a causa de variação difícil de ser reconhecida. Leituras manuais por meio de medidores de nível d'água são, em muitas ocasiões, equivocadas pelo fato de o sensor deste equipamento emitir o sinal sonoro quando em contato com a umidade excessiva do interior do tubo (condensação), ao invés de somente sinalizar a altura d'água dentro do tubo geomecânico. Mesmo em instrumentos automatizados, a dificuldade em se controlar a profundidade de instalação do sensor no momento de sua descida junto à perfuratriz, faz com que esta profundidade seja registrada de forma equivocada ou com pouca acurácia, ocasionando assim medições pouco acuradas de carga hidrostática.

Figura 76 – Resultado do piezômetro da Seção B1.

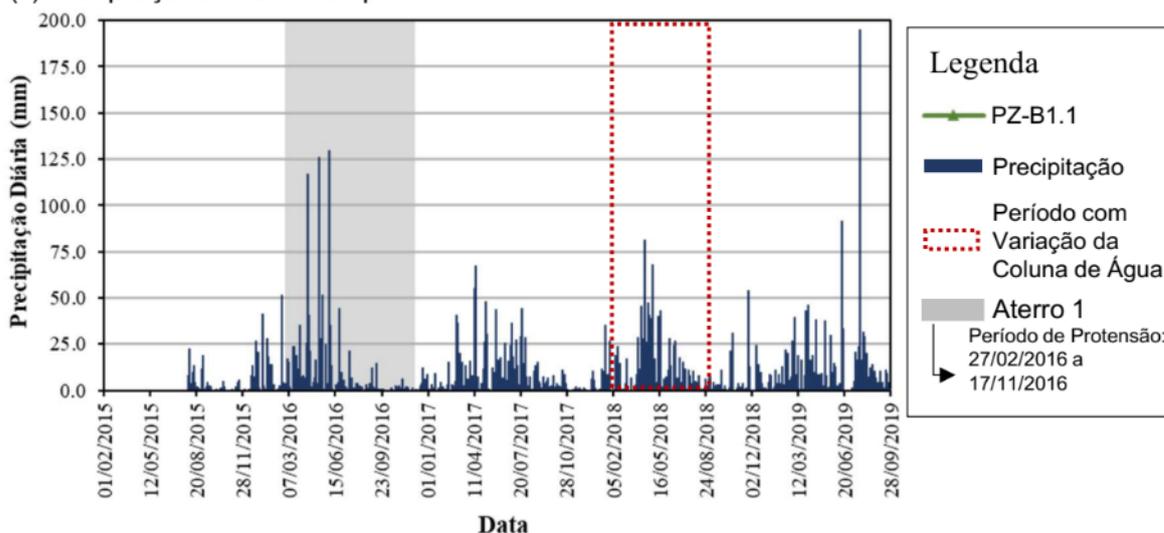
(a) Seção B1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



(b) Variação da Coluna de Água vs Tempo do piezômetro da Seção B1.



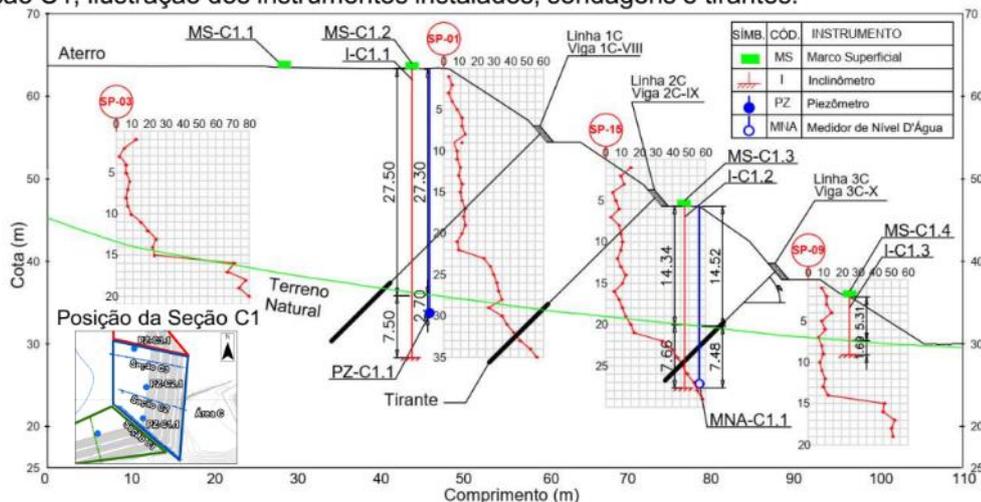
(c) Precipitação Diária vs Tempo.



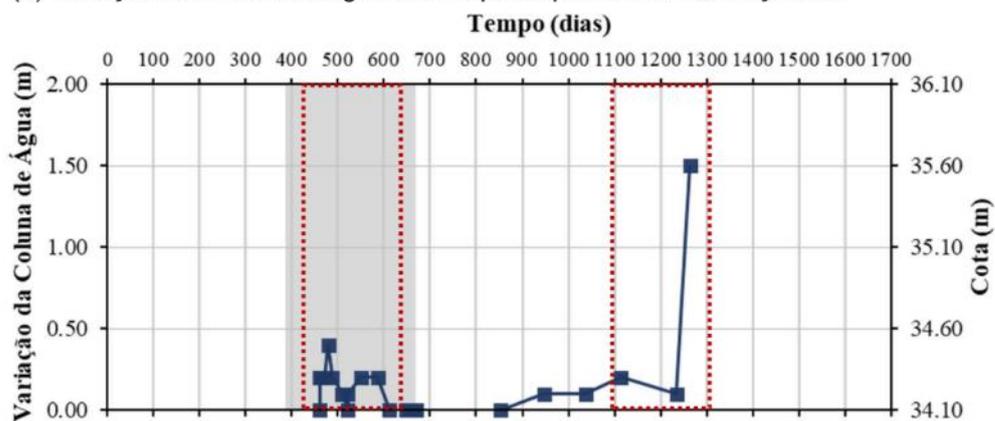
Fonte: O Autor (2022).

Figura 77 – Resultado do piezômetro da Seção C1.

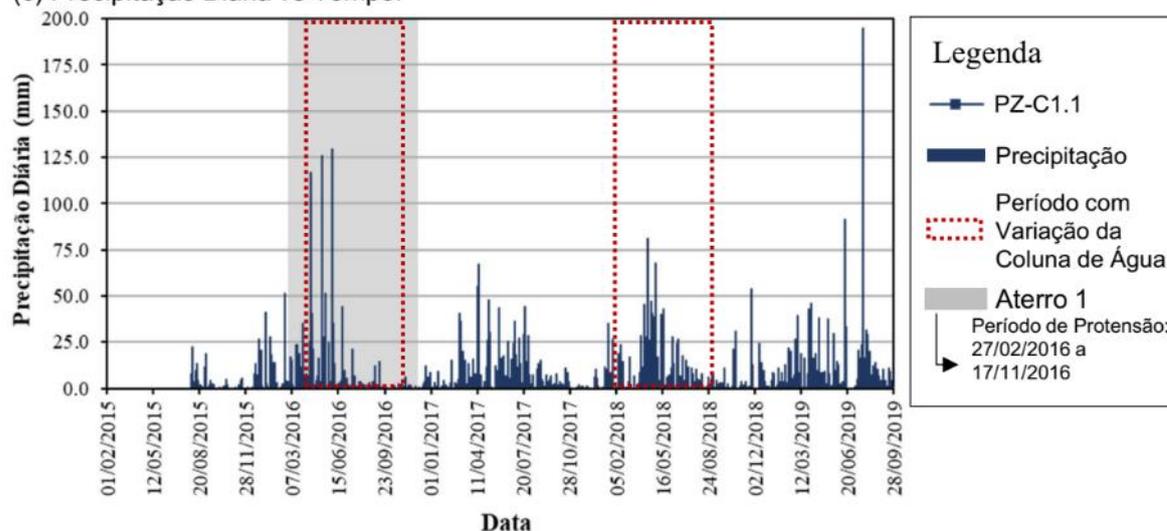
(a) Seção C1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Variação da Coluna de Água vs Tempo do piezômetro da Seção C1.



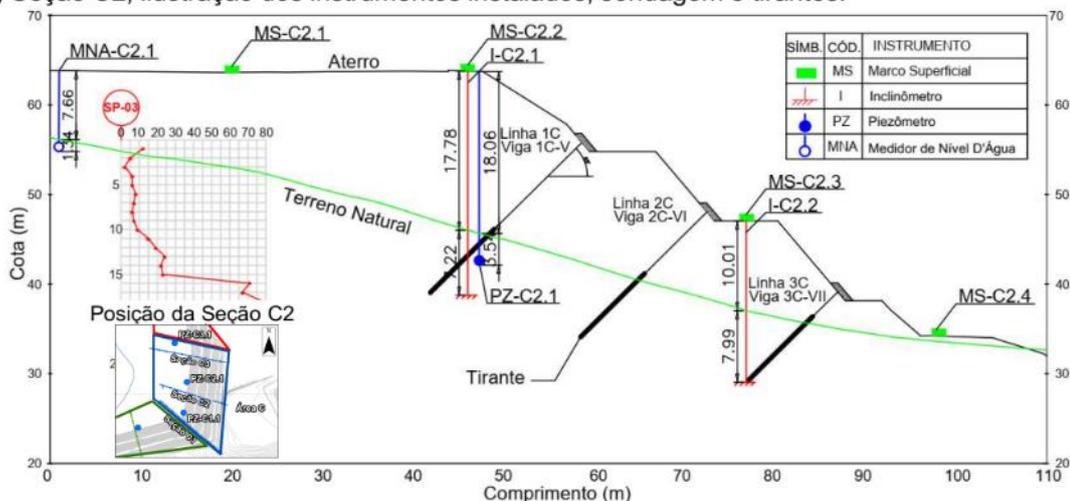
(c) Precipitação Diária vs Tempo.



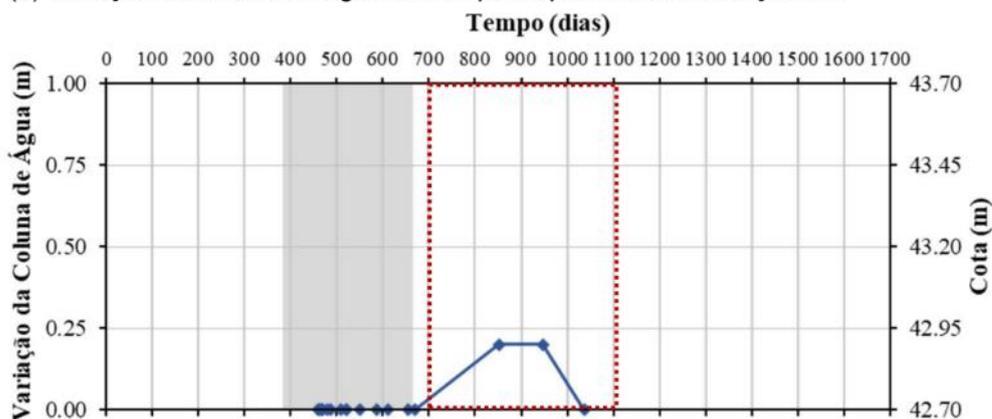
Fonte: O Autor (2022).

Figura 78 – Resultado do piezômetro da Seção C2.

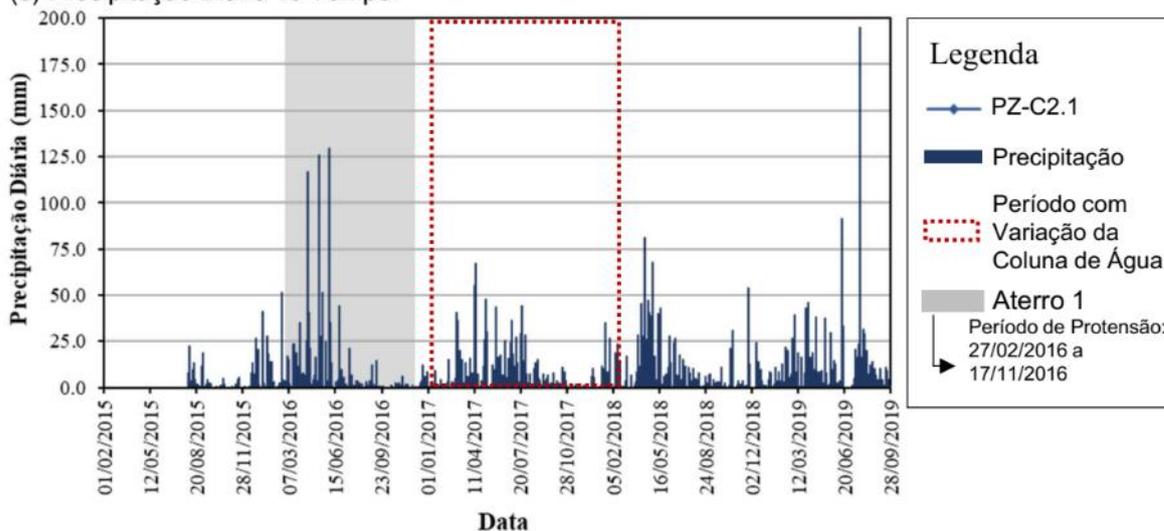
(a) Seção C2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



(b) Variação da Coluna de Água vs Tempo do piezômetro da Seção C2.



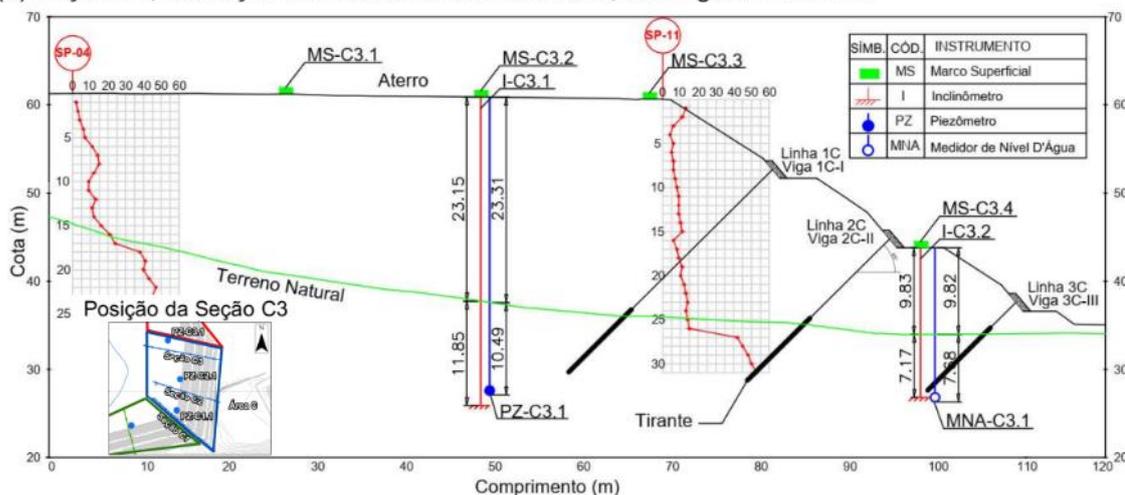
(c) Precipitação Diária vs Tempo.



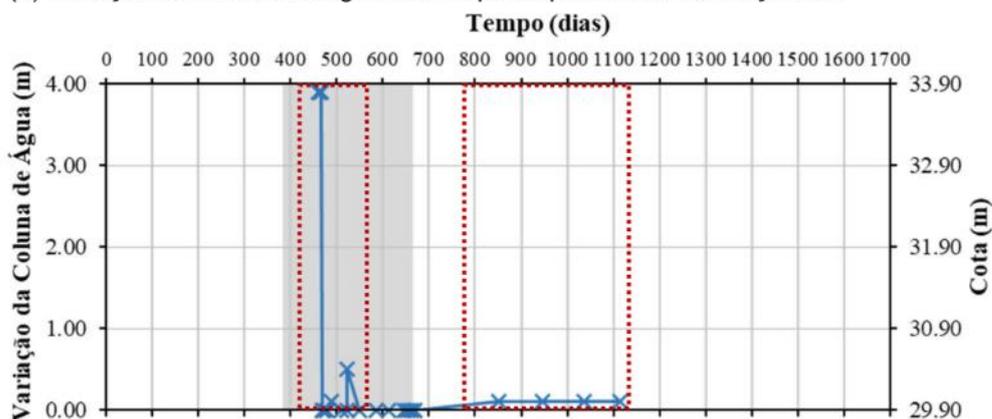
Fonte: O Autor (2022).

Figura 79 – Resultado do piezômetro da Seção C3.

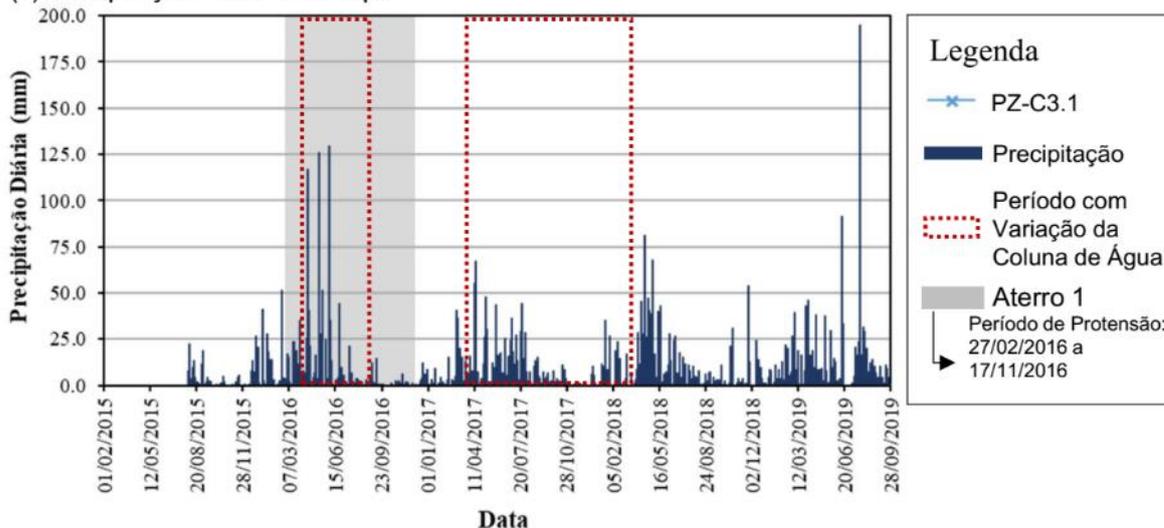
(a) Seção C3, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Variação da Coluna de Água vs Tempo do piezômetro da Seção C3.



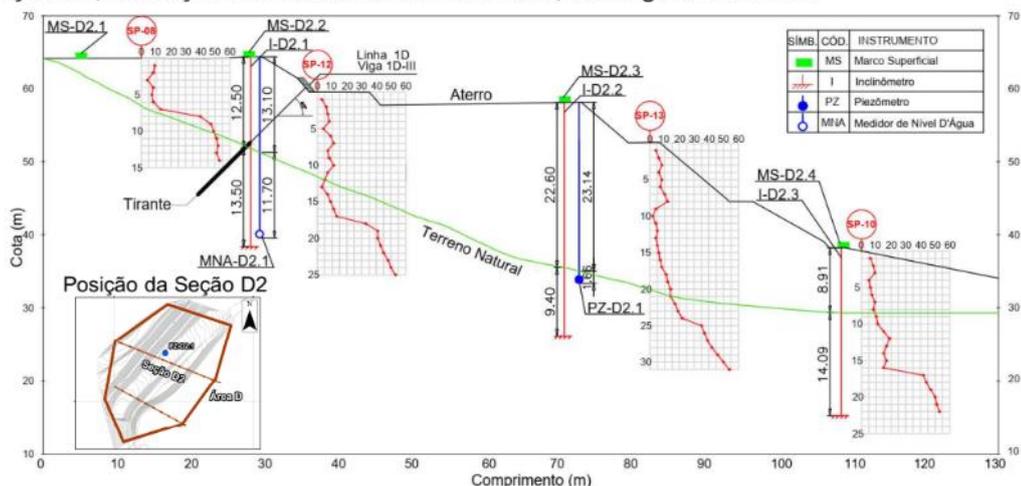
(c) Precipitação Diária vs Tempo.



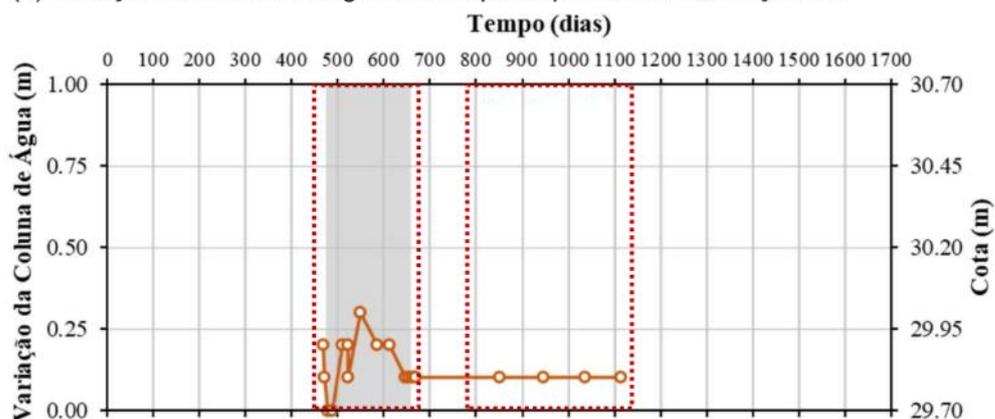
Fonte: O Autor (2022).

Figura 80 – Resultado do piezômetro da Seção D2.

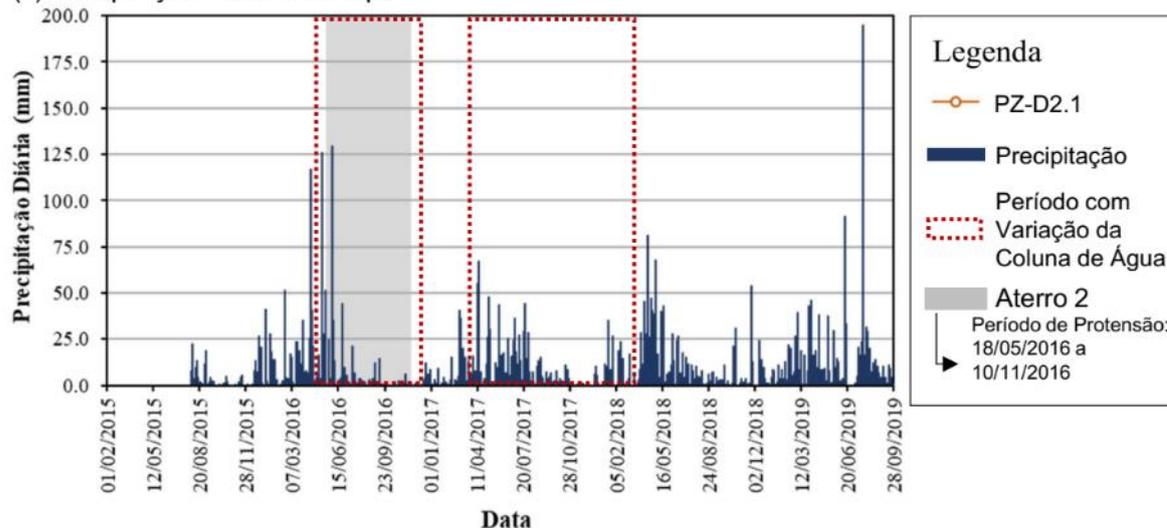
(a) Seção D2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Variação da Coluna de Água vs Tempo do piezômetro da Seção D2.



(c) Precipitação Diária vs Tempo.

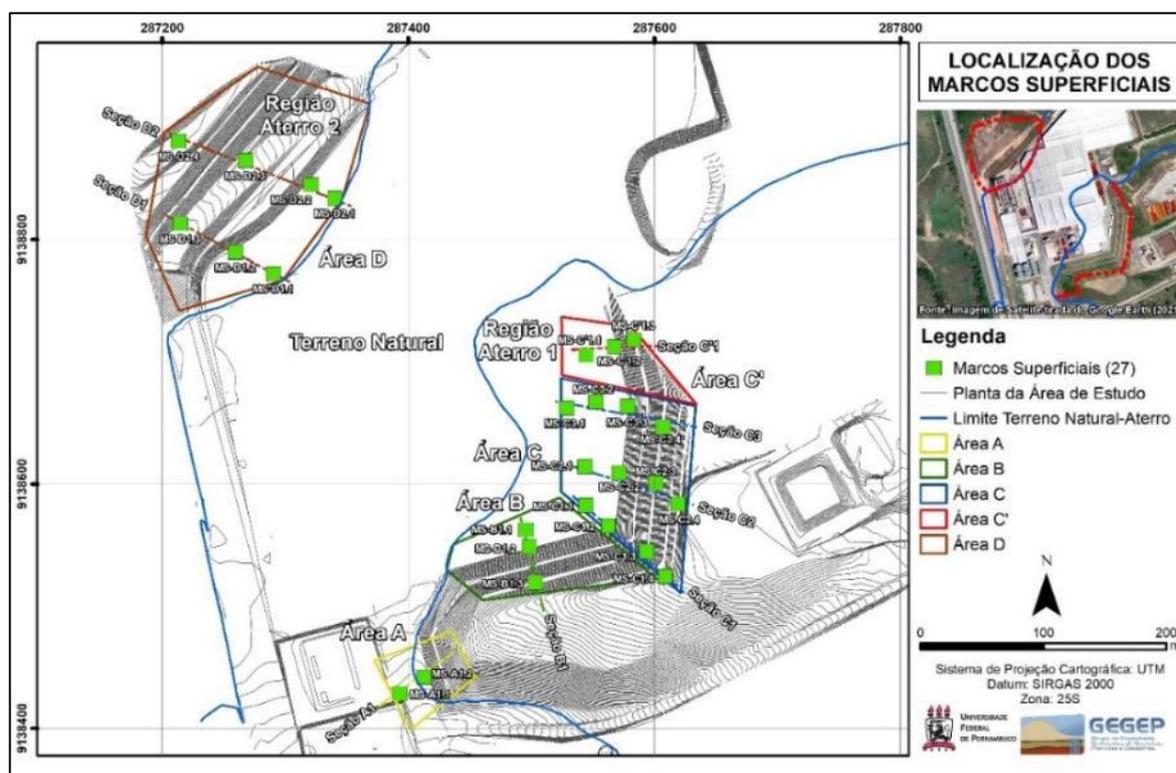


Fonte: O Autor (2022).

8.2.4 Dados dos marcos superficiais

Nesta seção estão apresentados os resultados dos deslocamentos verticais medidos por meio dos marcos superficiais instalados na obra. As seções de análise escolhidas (Figura 81) estão posicionadas na Região do Aterro 01 (Áreas A, B, C, C') e na Região do Aterro 02 (Área D).

Figura 81 – Localização dos Marcos Superficiais e posição das seções de estudo.



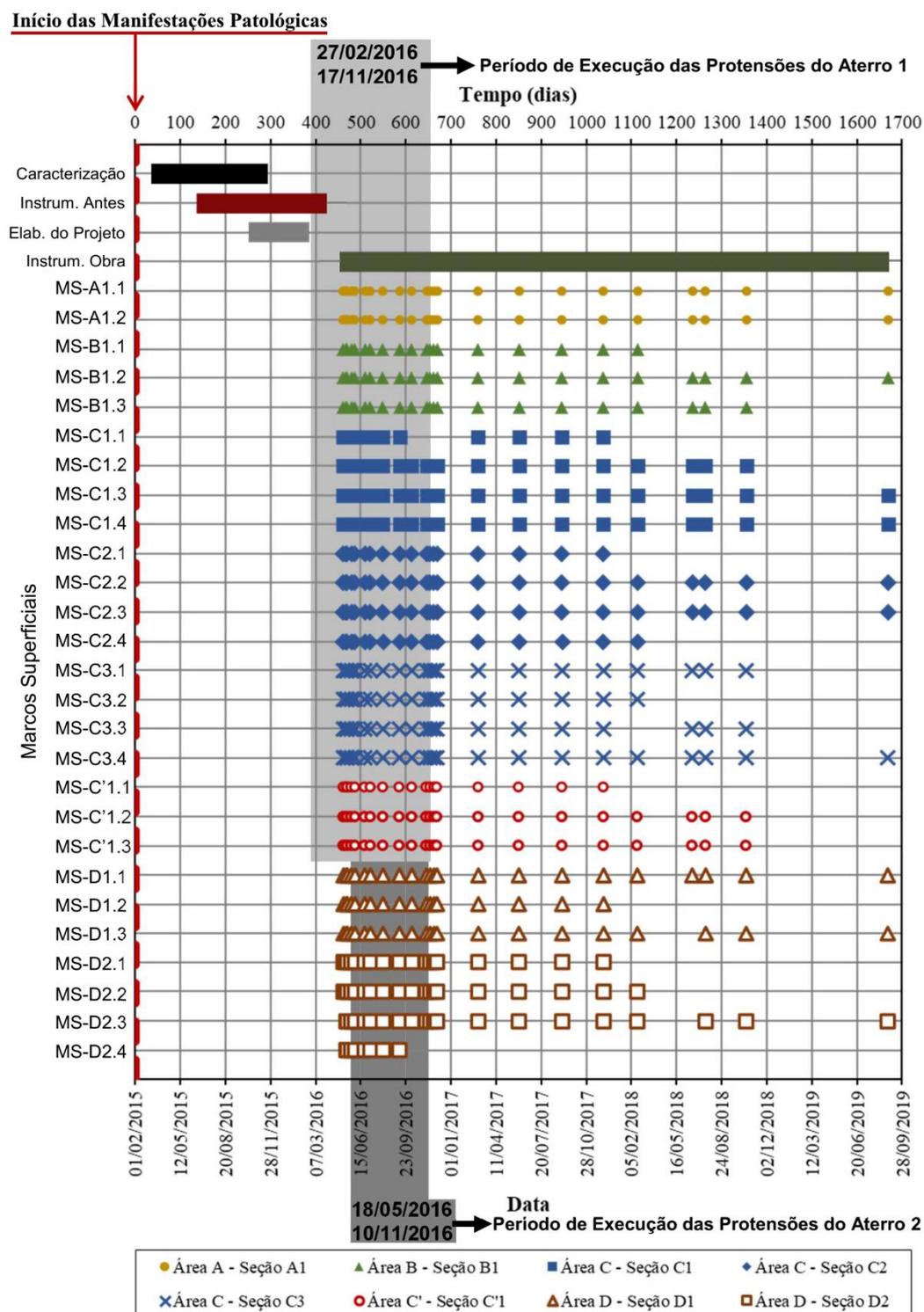
Fonte: O Autor (2022).

As datas de leituras dos 27 marcos superficiais instalados na obra estão indicadas na Figura 82 de forma síntese, de modo a permitir melhor entendimento temporal do leitor. O início do período de execução da protensão do Aterro 1 (27/02/2016 a 17/11/2016) antecede a data inicial das leituras dos equipamentos (07/05/2016). Entretanto, para o Aterro 2 a execução das protensões dos tirantes (18/05/2016 a 10/11/2016) só foram iniciadas 11 dias após o início das leituras de deslocamento pelos marcos superficiais.

Na sequência serão abordados os resultados dos deslocamentos verticais registrados pelos marcos superficiais em cada uma das seções de estudo. A abordagem destaca o período completo das leituras, analisando o comportamento do deslocamento e da velocidade. Além disso, são analisados dados pluviométricos a fim

de observar possíveis influências no comportamento dos deslocamentos. Serão apresentados dois destaques, um relativo à fase inicial do monitoramento, durante a fase de execução das protensões, e outro relativo ao período de reativação dos deslocamentos identificados nas análises das seções de estudo.

Figura 82 – Indicação das leituras realizadas nos marcos superficiais.



Fonte: O Autor (2022).

8.2.4.1 Análise dos deslocamentos verticais

A seguir estão apresentados os resultados e as discussões para as regiões dos Aterros 1 e 2 quanto aos deslocamentos verticais.

8.2.4.1.1 Região Aterro 1

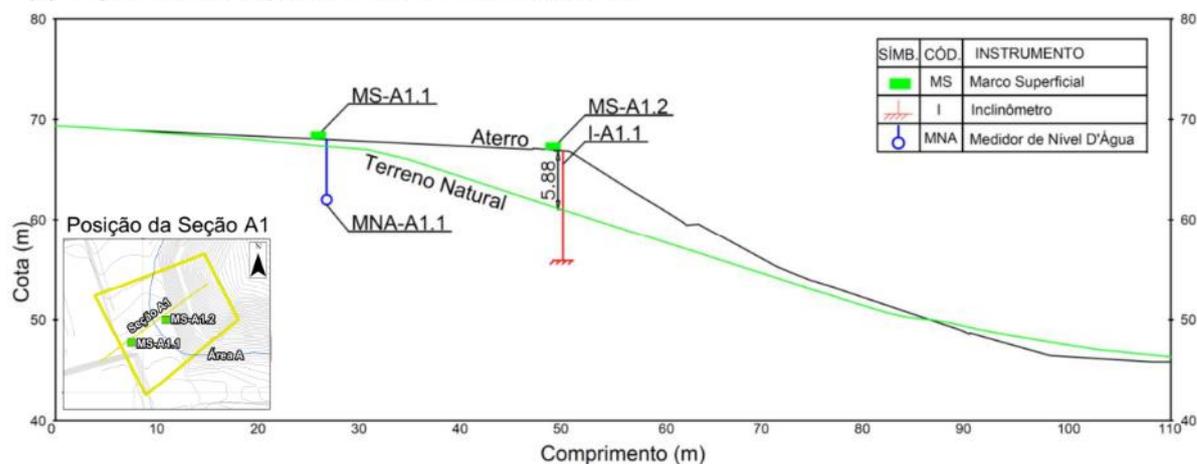
A seção A1 está posicionada na área A, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 83a. Para esta seção não foram executadas as linhas de tirantes previstas inicialmente no projeto executivo, por essa razão a legenda da Figura 83 não indica as marcações gráficas dos períodos de execução desses elementos, como será visto nas demais figuras.

A análise dos deslocamentos (Figura 83b) evidenciam um comportamento progressivo das leituras para ambos os marcos superficiais até o registro de 05/12/2017, após esse período ocorre uma redução dos valores, seguidos por uma reativação do movimento para o MS-A1.2. Cabe destacar que a magnitude dos deslocamentos para esta seção é consideravelmente menor que as demais analisadas, com o último valor máximo de deslocamentos da ordem de -9,2 mm (MS-A1.1).

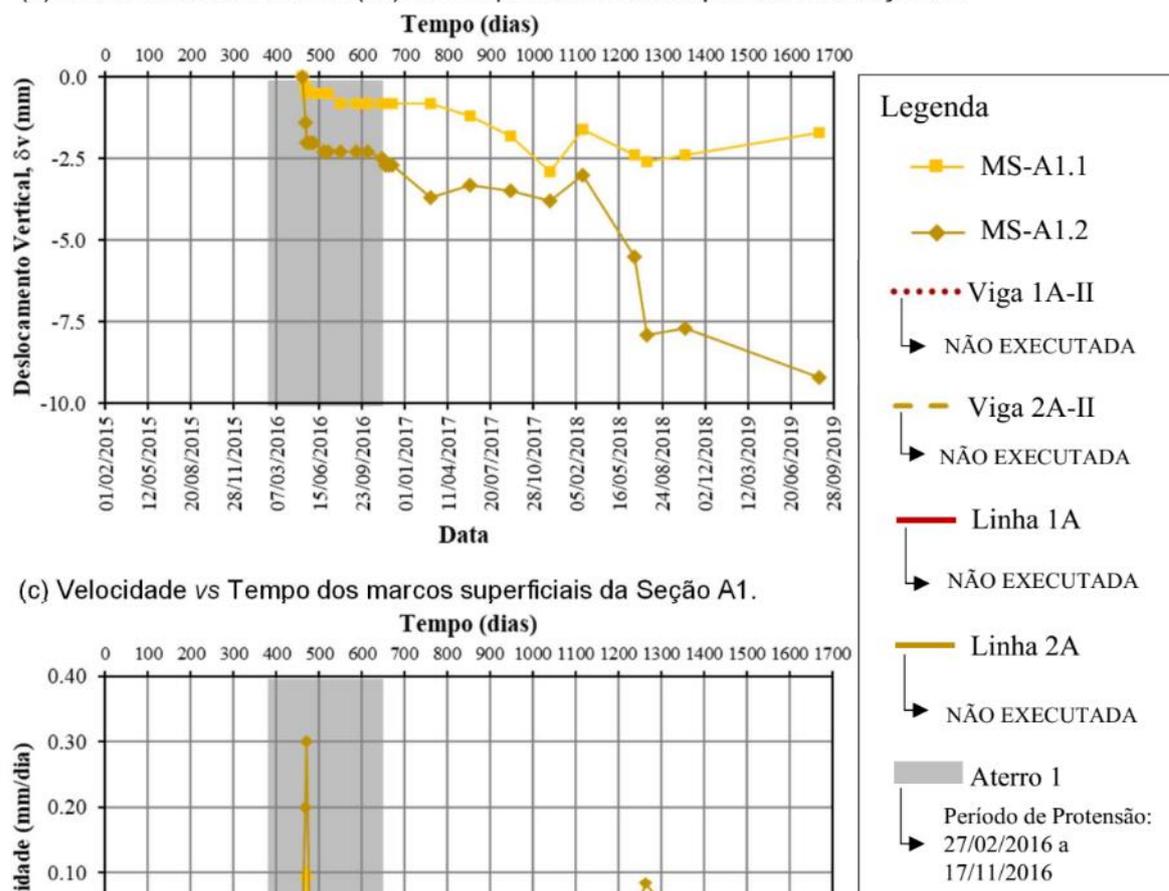
A velocidade (Figura 83c), demonstrou um padrão de comportamento com poucas oscilações, com valores da ordem de 0,02 mm/dia, registrando para o MS-A1.1 um pico (0,08 mm/dia em 19/07/2018) durante período de reativação da movimentação.

Figura 83 – Resultados dos deslocamentos verticais e da velocidade para seção A1.

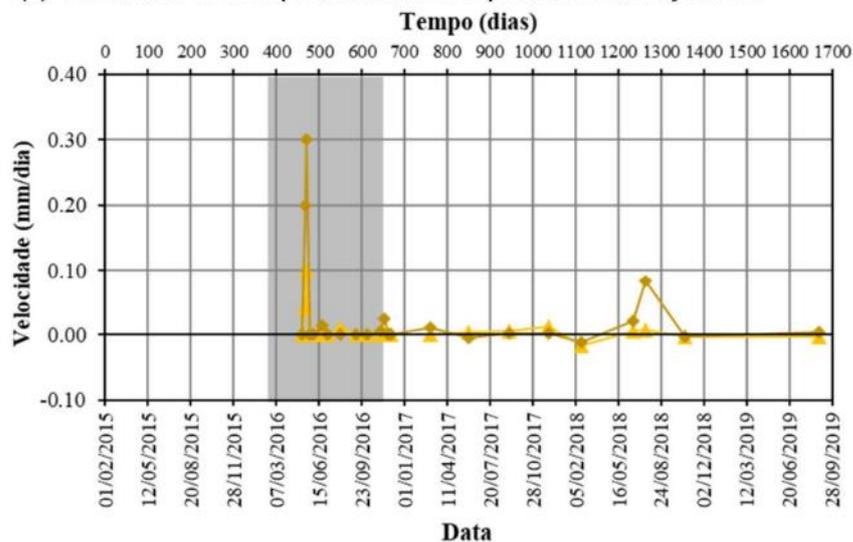
(a) Seção A1, ilustração dos instrumentos instalados.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo dos marcos superficiais da Seção A1.



(c) Velocidade vs Tempo dos marcos superficiais da Seção A1.



Fonte: O Autor (2022).

Como já destacado, também foram consideradas as análises dos deslocamentos durante o período inicial do monitoramento (28/11/2015 a 20/07/2017), relacionando também com dados de chuva. A partir dos registros de precipitações diárias (Figura 84a) percebeu-se um aumento do volume de chuvas (130 mm) para o mesmo período em que também se registrou um aumento dos deslocamentos (Figura 84b).

Da forma semelhante ao destaque do período inicial das leituras, foram analisados (Figura 85) os dados de precipitação e dos deslocamentos no período de 20/07/2017 a 12/03/2019 em que se verificou alterações no comportamento do deslocamento. Assim como verificado no período inicial, o aumento da ocorrência de chuvas (Figura 85a) e a frequência diária de índices que variam entre 25 mm e 75 mm, coincidem com a reativação do deslocamento (Figura 85b) identificada no MS-A1.2 para o período destacado. Nesse intervalo, a velocidade dos deslocamentos para MS-A1.2 sofreu um aumento registrando 0,08 mm/dia, valor acima dos registros médios da série de dados.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 21 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

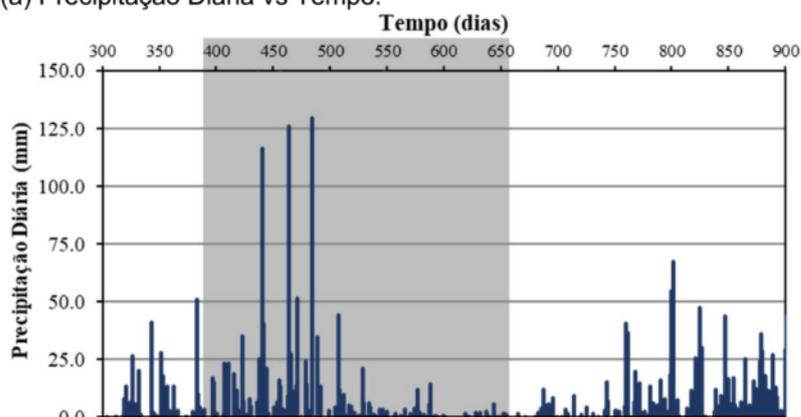
Tabela 21 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção A1.

Seção: A1	Deslocamentos (mm)	
	MS-A1.1	MS-A1.2
Período de análise		
Após a execução da protensão	24/11/2016 -0,80	24/11/2016 -2,70
Início da estabilização	-	02/03/2017 -3,70
Início da reativação do movimento	19/02/2018 -1,60	19/02/2018 -3,00
Fim da reativação do movimento	19/07/2018 -2,60	19/07/2018 -7,90
Leitura final	27/08/2019 -1,70	27/08/2019 -9,20

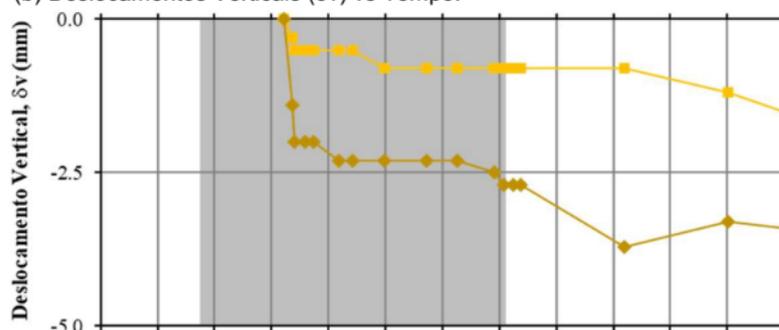
Fonte: O Autor (2022).

Figura 84 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção A1.

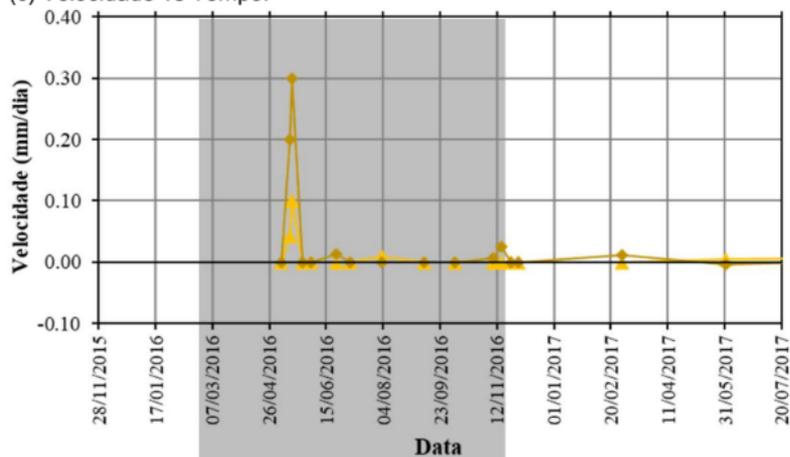
(a) Precipitação Diária vs Tempo.



(b) Deslocamentos Verticais (δ_v) vs Tempo.



(c) Velocidade vs Tempo.



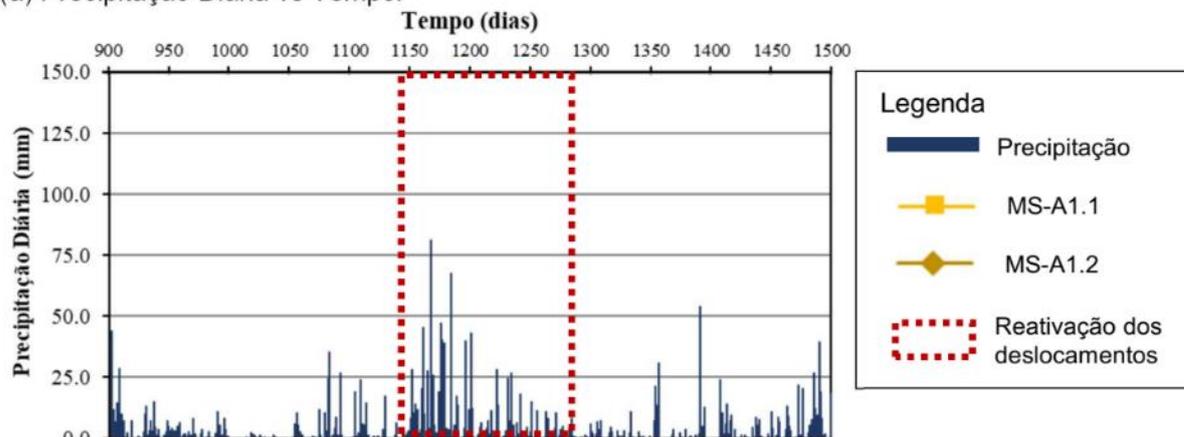
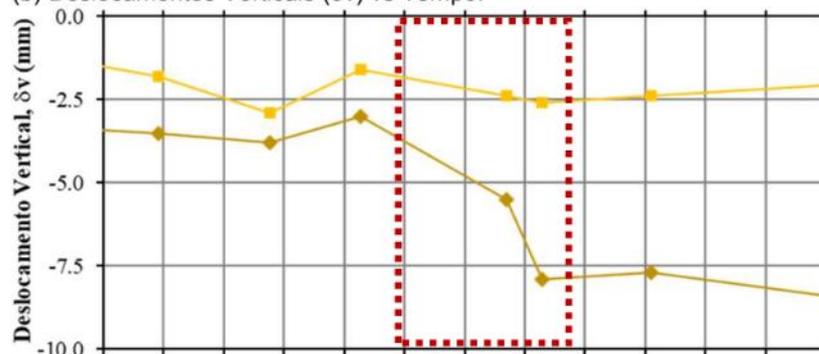
Legenda

- Precipitação
- MS-A1.1
- MS-A1.2
- Viga 1A-II
- Viga 2A-II
- Linha 1A
- Linha 2A
- Aterro 1
- Período de Protensão: 27/02/2016 a 17/11/2016

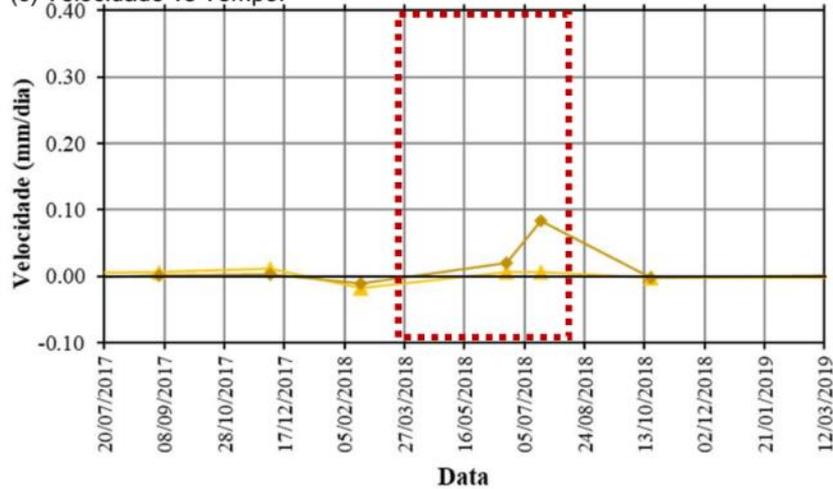
Fonte: O Autor (2022).

Figura 85 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção A1.

(a) Precipitação Diária vs Tempo.

(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.

(c) Velocidade vs Tempo.



Data

Fonte: O Autor (2022).

A seção B1 está posicionada na área B, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 86a. Nesta seção não foi executada a linha 3B, bem como a viga 3B-VII previstas no projeto executivo inicial. As demais linhas e vigas executadas na seção de análise são marcadas a fim de facilitar o entendimento.

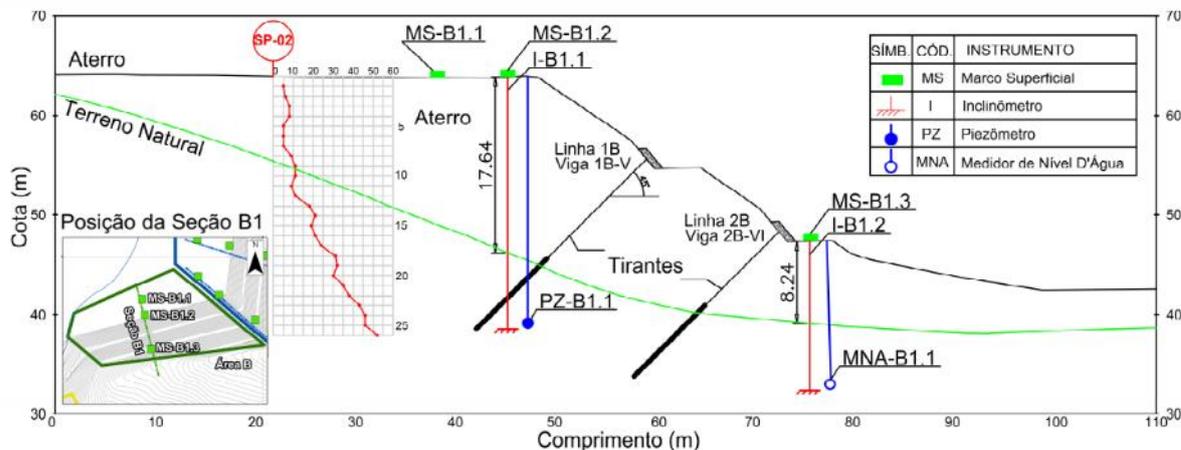
Os resultados evidenciados na Figura 86b mostraram um comportamento similar dos deslocamentos entre os marcos superficiais estudados. Embora haja maior similaridade entre os deslocamentos do MS-B1.1 e MS-B1.2, para o período de 16/11/2016 a 24/11/2016 foi possível perceber uma aparente estabilização da movimentação. Na sequência (02/03/2017 a 19/02/2018) percebeu-se uma redução da evolução dos deslocamentos com a mudança de comportamento dos dados, indicando tendência de estabilização.

Após a leitura de 19/02/2018, constatou-se uma reativação da movimentação (Figura 86b), e a perda de registros do MS-B1.1, impossibilitando a confirmação do comportamento identificado anteriormente. Os registros dos marcos MS-B1.2 e MS-B1.3 indicaram um período curto de estabilização, embora a última leitura do MS-B1.3 demonstre um aumento do deslocamento em relação a leitura anterior.

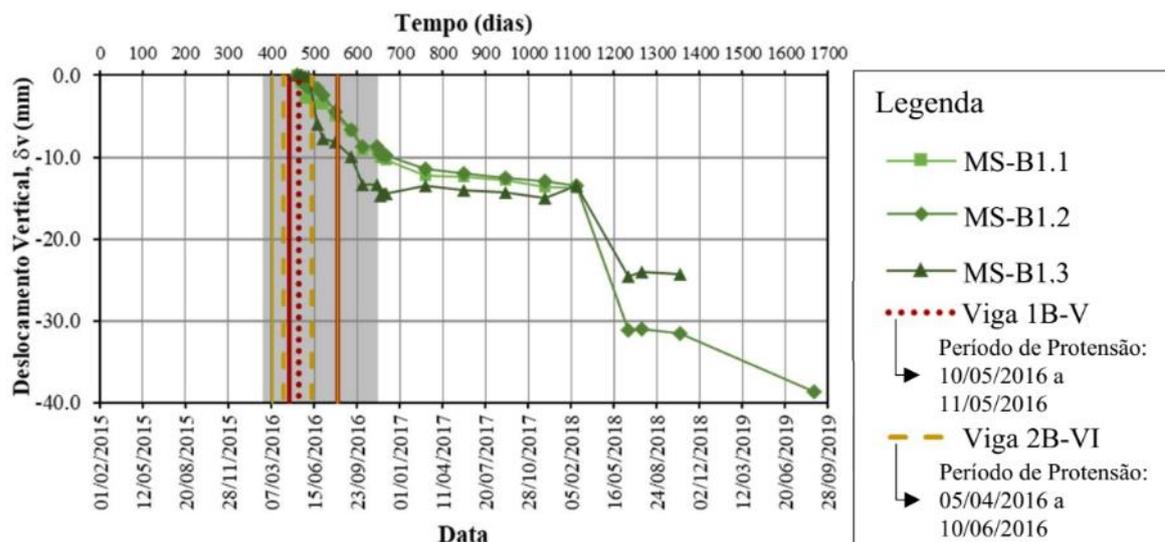
O comportamento da velocidade (Figura 86c), indica a confirmação do período (02/03/2017 a 19/02/2018) de estabilização indicado na análise do deslocamento, cujos valores de velocidade correspondem a 0,01 mm/dia. Dois picos de velocidade dos marcos MS-B1.2 e MS-B1.3, da ordem de 0,15 mm/dia e 0,09 mm/dia, são registrados durante a fase de reativação dos deslocamentos (20/06/2018), mantendo o comportamento semelhante ao identificado nas leituras anteriores.

Figura 86 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção B1.

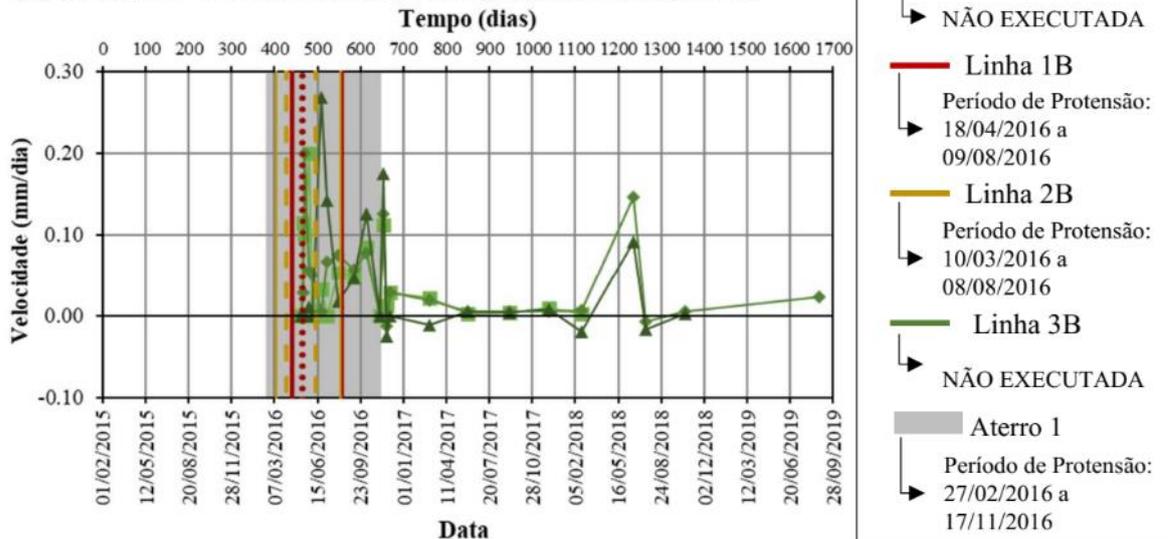
(a) Seção B1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo dos marcos superficiais da Seção B1.



(c) Velocidade vs Tempo dos marcos superficiais da Seção B1.



Fonte: O Autor (2022).

Para auxiliar o entendimento dos deslocamentos durante o período inicial do monitoramento (28/11/2015 a 20/07/2017), analisou-se também os dados de chuva. A partir dos dados de chuva diários (Figura 87a) verificou-se que as leituras de deslocamento iniciaram durante os maiores registros de precipitações, e que após esse período a velocidade do MS-B1.3 apresentou o maior valor da série (0,27 mm/dia). Destaca-se que durante a fase de execução das protensões, o deslocamento apresentou comportamento progressivo e o volume de chuvas diário diminuiu.

Assim como nas análises da seção A1, foram analisados (Figura 88b), em destaque, os dados de deslocamento para o período de 20/07/2017 a 12/03/2019, para o qual observou-se um aumento do deslocamento tanto para o MS-B1.2 quanto para MS-B1.3. Observando também os dados pluviométricos (Figura 88a) percebeu-se que o aumento diário de chuvas coincide com o período de reativação da movimentação. Para esse mesmo período e como esperado a velocidade aumentou (Figura 88c), demonstrando crescimento gradativo dos deslocamentos nesse período.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 22 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

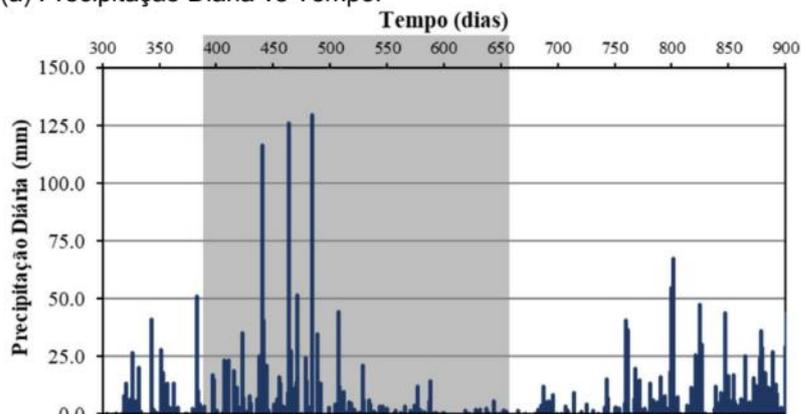
Tabela 22 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção B1.

Seção: B1	Deslocamentos (mm)		
	Período de análise	MS-B1.1	MS-B1.2
Após a execução da protensão	16/11/2016 -10,00	16/11/2016 -9,70	16/11/2016 -14,70
Início da estabilização	02/03/2017 -12,20	02/03/2017 -11,50	02/03/2017 -13,50
Início da reativação do movimento	19/02/2018 -13,80	19/02/2018 -13,50	19/02/2018 -13,50
Fim da reativação do movimento	-	20/06/2018 -31,20	20/06/2018 -24,60
Leitura final	19/02/2018 -13,80	27/08/2019 -38,70	18/10/2018 -24,30

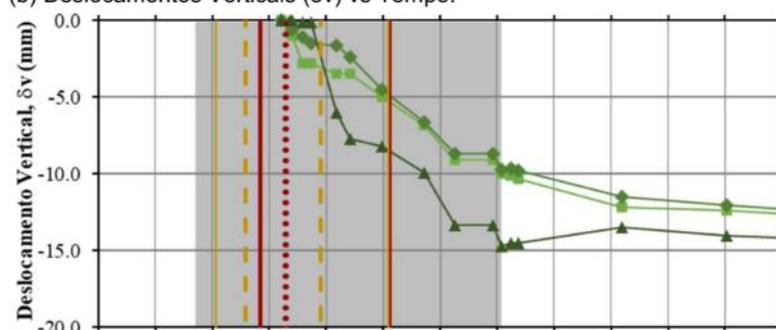
Fonte: O Autor (2022).

Figura 87 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção B1.

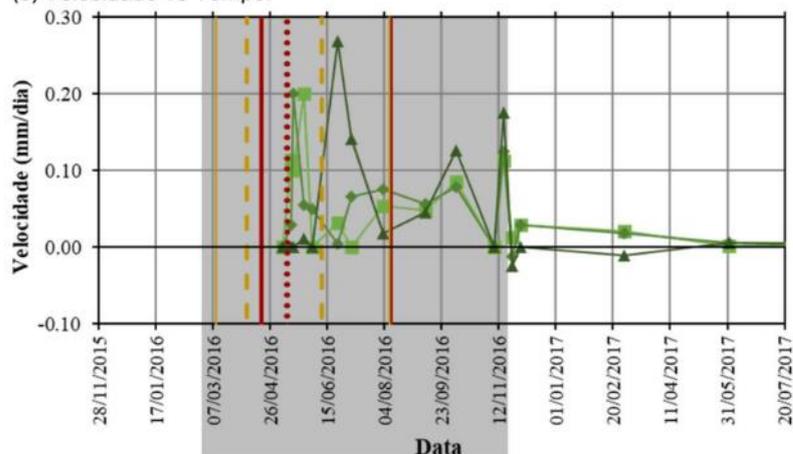
(a) Precipitação Diária vs Tempo.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.



(c) Velocidade vs Tempo.



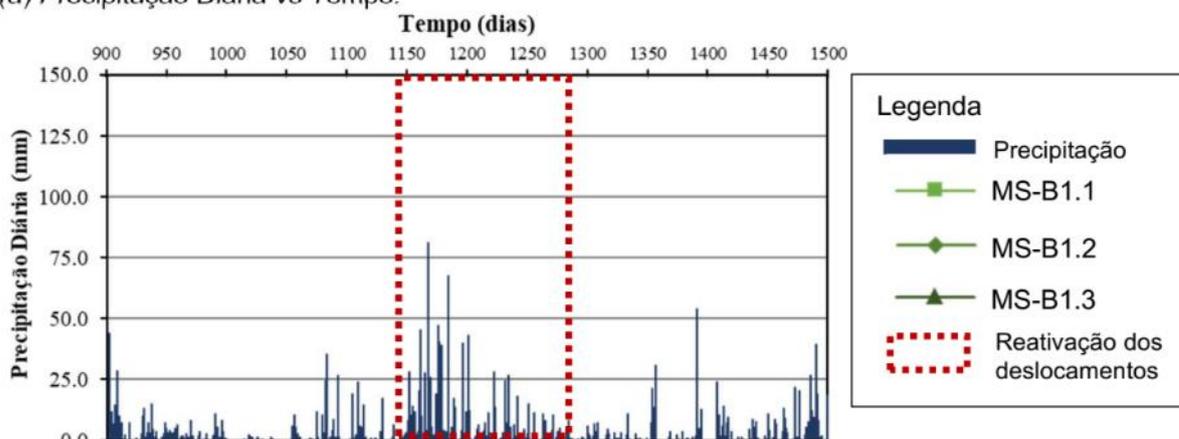
Legenda

- Precipitação
- MS-B1.1
- MS-B1.2
- MS-B1.3
- Viga 1B-V
- ↳ Período de Protensão: 10/05/2016 a 11/05/2016
- Viga 2B-VI
- ↳ Período de Protensão: 05/04/2016 a 10/06/2016
- Viga 3B-VII
- ↳ NÃO EXECUTADA
- Linha 1B
- ↳ Período de Protensão: 18/04/2016 a 09/08/2016
- Linha 2B
- ↳ Período de Protensão: 10/03/2016 a 08/08/2016
- Linha 3B
- ↳ NÃO EXECUTADA
- Aterro 1
- ↳ Período de Protensão: 27/02/2016 a 17/11/2016

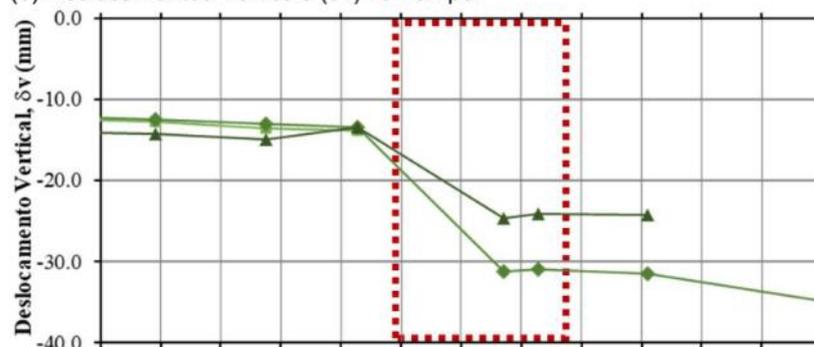
Fonte: O Autor (2022).

Figura 88 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção B1.

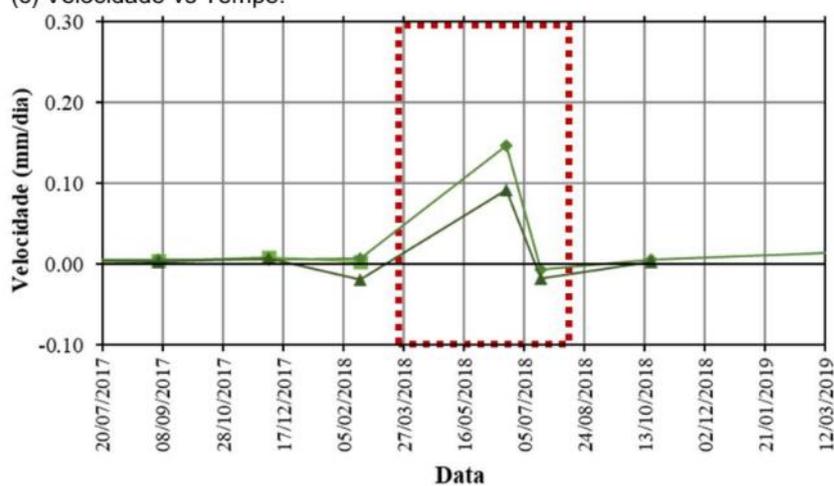
(a) Precipitação Diária vs Tempo.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.



(c) Velocidade vs Tempo.



Fonte: O Autor (2022).

A seção C1 está posicionada na área C cuja representação esquemática é mostrada na Figura 89a. Nesta seção foram executadas todas as linhas de tirantes previstas inicialmente no projeto executivo.

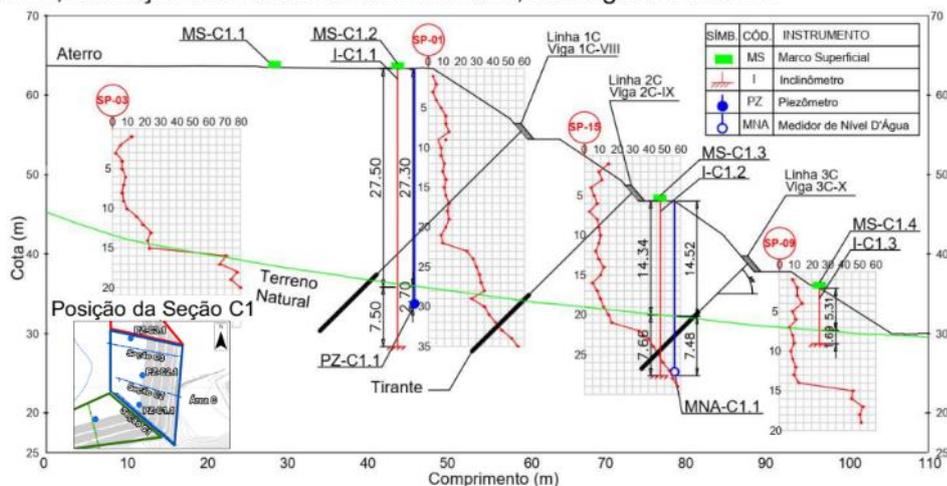
Os resultados de deslocamento apresentados na Figura 89b mostraram que todos os marcos superficiais analisados, embora com magnitudes distintas, apresentaram comportamento similar. Como se verifica, até o registro de 02/03/2017 houve um aumento progressivo dos valores, embora, após o período de execução das protensões (destaque na cor cinza na Figura 89a) constatou-se uma estabilização dos deslocamentos, com variações típicas muito pequenas. Assim como já verificado em outras seções, após o registro de 19/02/2018 ocorreu um aumento do deslocamento, como verificou-se no MS-C1.2, cujo valor aumentou 43 mm, entre as leituras dos dias 19/02/2018 e 20/06/2018 (vide Tabela 23).

Dentre os deslocamentos dos marcos superficiais analisados para a área C, esta seção C1 apresenta os maiores valores registrados com o valor da última leitura do MS-C1.2 indicando um deslocamento acumulado de -70,20 mm (Tabela 23). Destaca-se que houve a interrupção dos registros do MS-C1.1 e o fato dos resultados desse marco ser muito similar com as leituras do MS-C1.4, talvez possa ser explicado pela posição de locação desses instrumentos na crista do talude (Figura 89a).

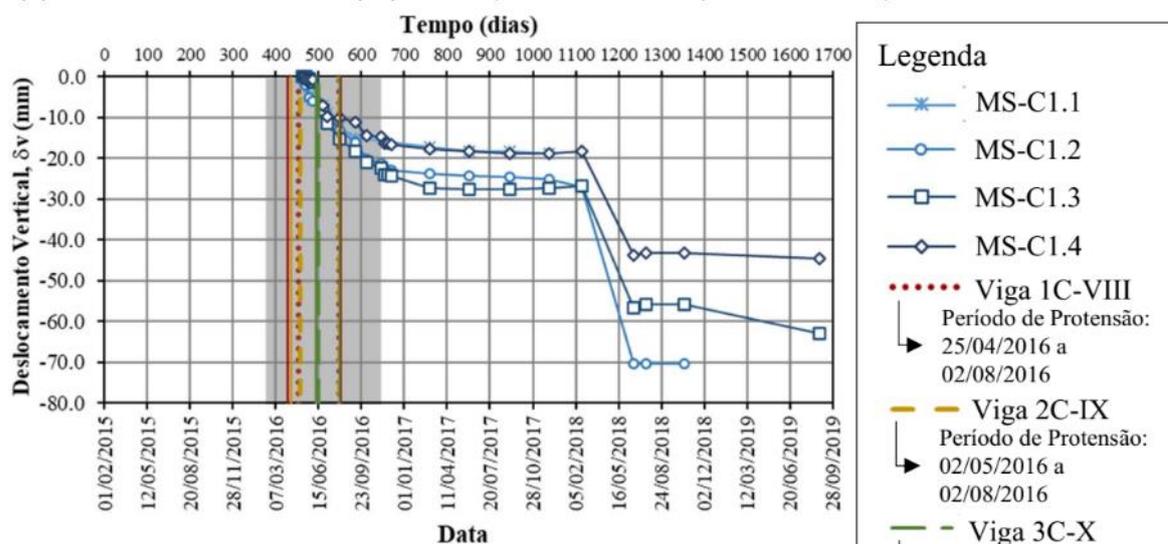
O gráfico da velocidade (Figura 89c), reporta um crescimento durante o período de aumento do deslocamento, com valores da ordem de 0,36 mm/dia (MS-C1.2) registrados em 20/06/2018. Além disso, valores mais altos também são registrados no período inicial das leituras, embora sejam constatadas oscilação nas leituras.

Figura 89 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C1.

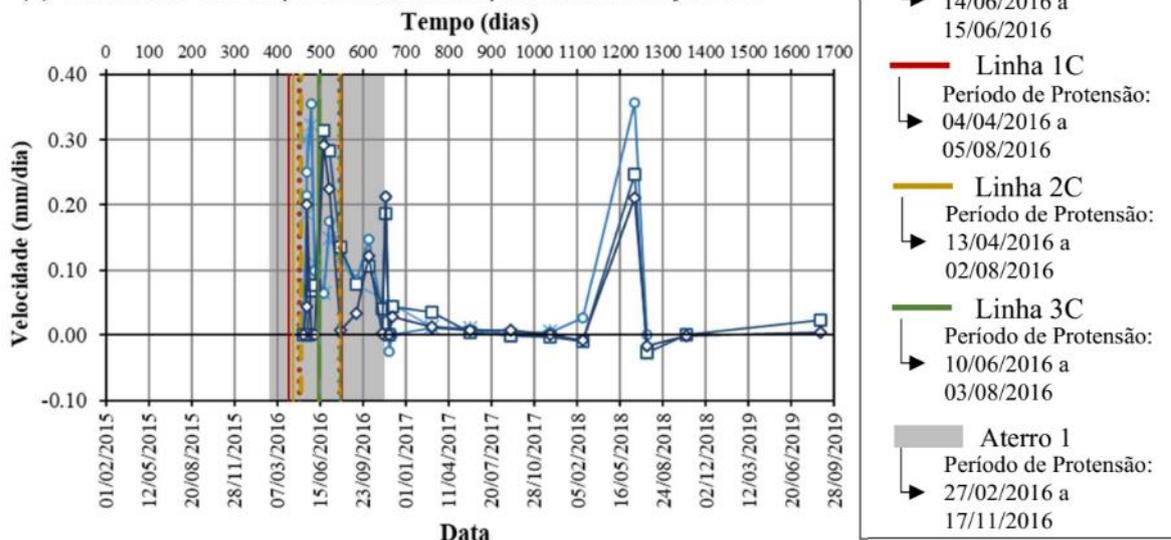
(a) Seção C1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo dos marcos superficiais da Seção C1.



(c) Velocidade vs Tempo dos marcos superficiais da Seção C1.



Fonte: O Autor (2022).

Como já destacado, também foram consideradas as análises dos deslocamentos durante o período inicial do monitoramento (28/11/2015 a 20/07/2017), relacionando também com dados de chuva. O registro de precipitações diárias (Figura 90a), mostrou a frequência de volumes consideráveis de chuva, embora o início das leituras de deslocamento tenha coincido com o período de maiores chuvas, é necessário um período maior de leituras do deslocamento anteriores a esses registros, a fim de assegurar melhores condições de análise.

Da mesma forma que foi feito para as seções anteriores, foram analisados (Figura 91) os dados de precipitação e dos deslocamentos no período de 20/07/2017 a 12/03/2019 em que se verificou alterações no comportamento do deslocamento. Diferentemente das considerações nas análises dos dados no período inicial, para esse período de destaque verificou-se uma concordância entre os aumentos dos registros de precipitação e da reativação do deslocamento. Constatou-se anteriormente ao período destacado (faixa tracejada em vermelho) baixos valores de precipitações e uma estabilidade no deslocamento, com velocidades muito baixas, e a partir da elevação da pluviometria um aumento considerável no deslocamento e na velocidade.

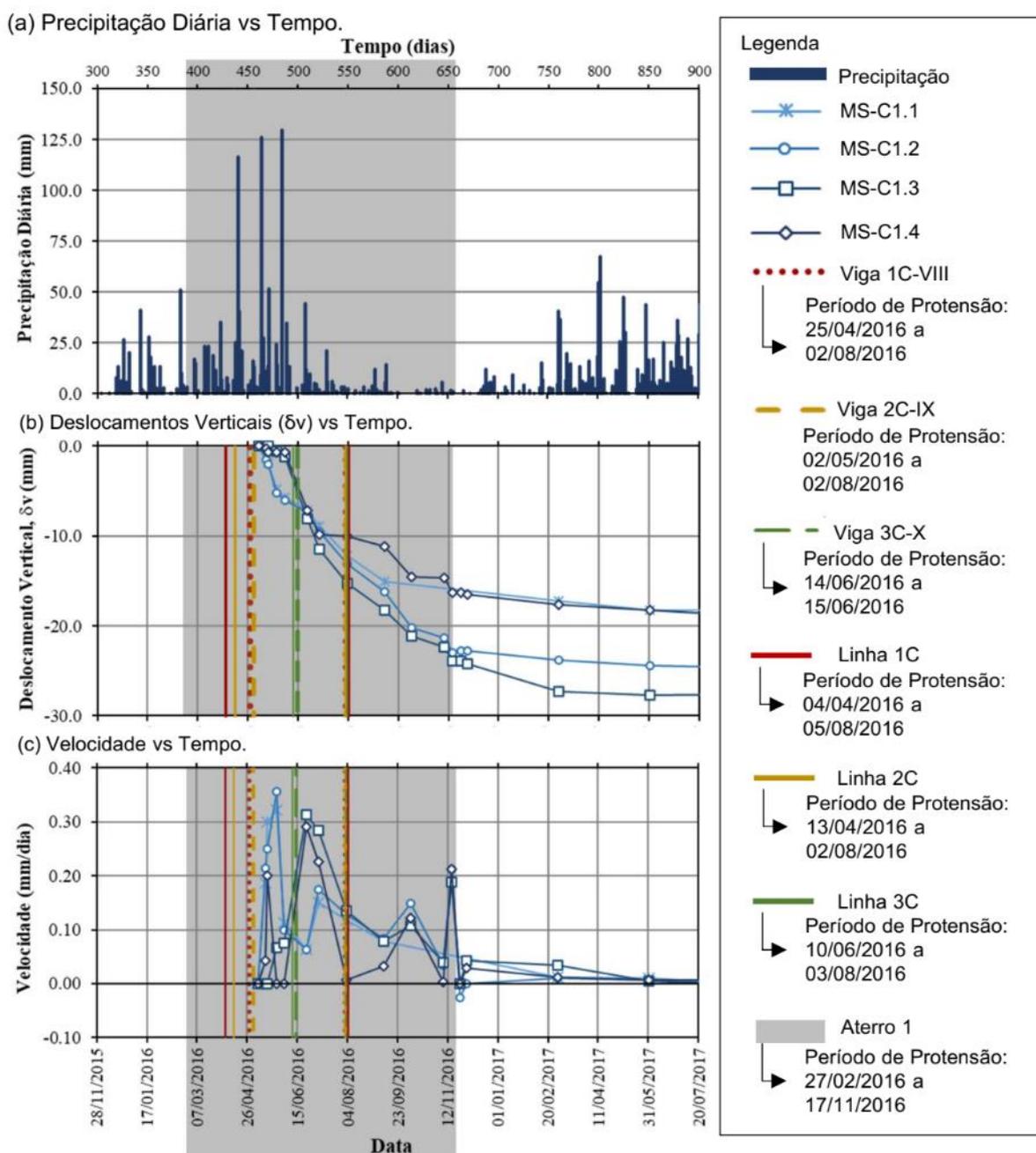
Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 23 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

Tabela 23 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C1.

Seção: C1		Deslocamentos (mm)			
Período de análise	MS-C1.1	MS-C1.2	MS-C1.3	MS-C1.4	
Após a execução da protensão	02/03/2017 -17,20	16/11/2016 -23,00	16/11/2016 -23,90	16/11/2016 -16,30	
Início da estabilização	02/03/2017 -17,20	02/03/2017 -23,80	02/03/2017 -27,30	02/03/2017 -17,60	
Início da reativação do movimento	-	19/02/2018 -27,00	19/02/2018 -26,70	19/02/2018 -18,30	
Fim da reativação do movimento	-	20/06/2018 -70,20	20/06/2018 -56,50	20/06/2018 -43,80	
Leitura final	05/12/2017 -18,70	18/10/2018 -70,20	27/08/2019 -62,90	27/08/2019 -44,60	

Fonte: O Autor (2022).

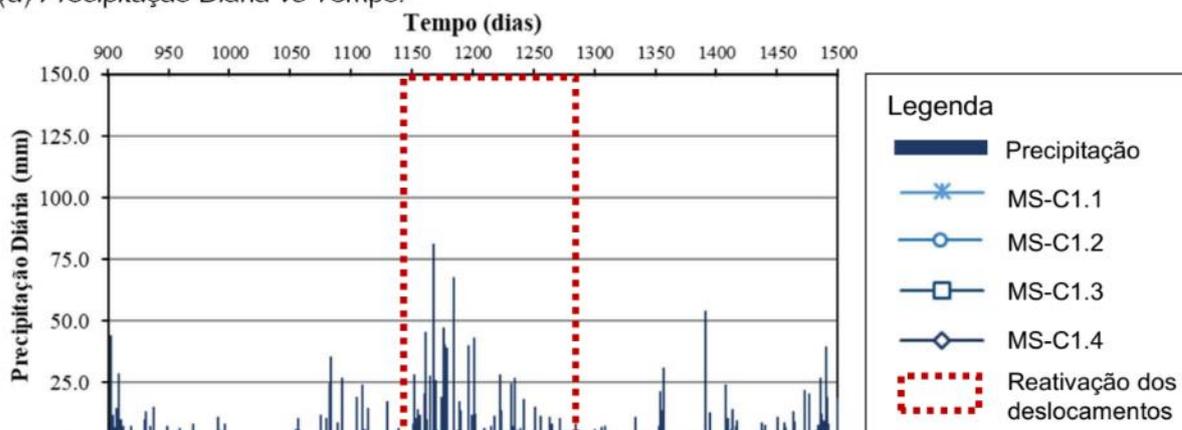
Figura 90 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção C1.



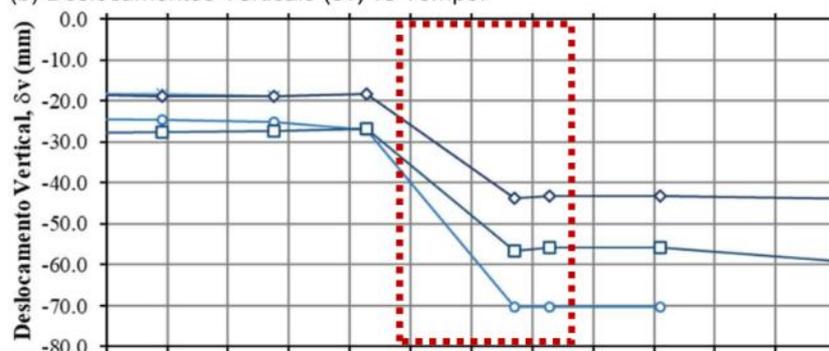
Fonte: O Autor (2022).

Figura 91 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção C1.

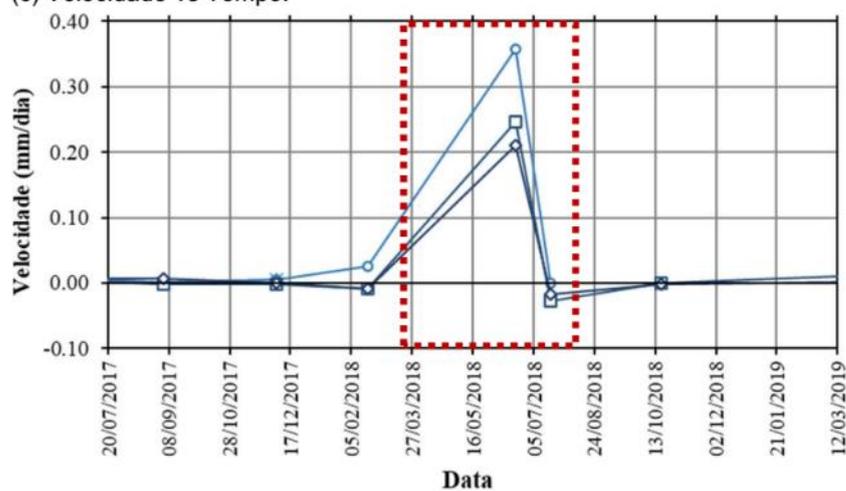
(a) Precipitação Diária vs Tempo.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.



(c) Velocidade vs Tempo.



Fonte: O Autor (2022).

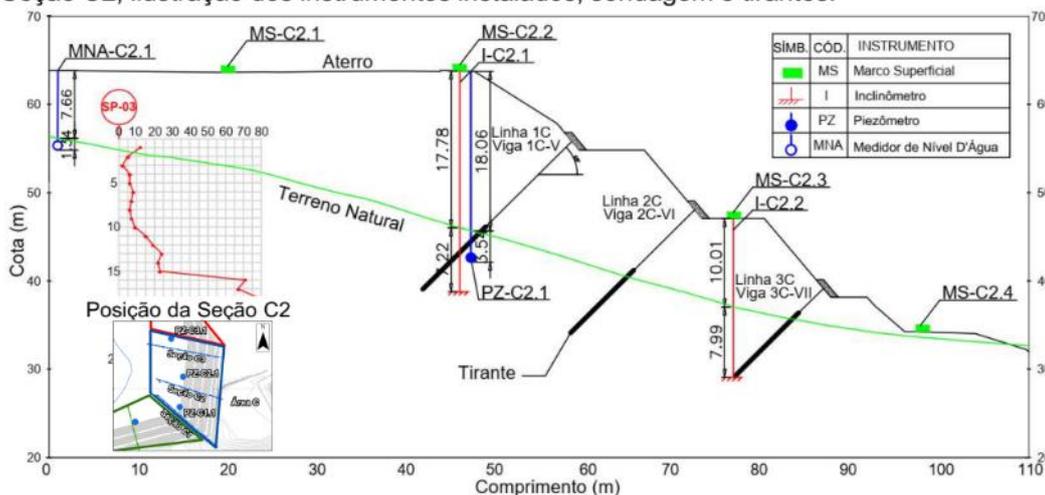
A seção C2 está posicionada na área C cuja representação esquemática é mostrada na Figura 92a. Nesta seção foram executadas todas as linhas de tirantes previstas inicialmente no projeto executivo.

Os resultados gráficos da Figura 92b mostraram um comportamento progressivo das leituras para os marcos superficiais até o registro de 02/03/2017. Após o período de execução das protensões, observou-se uma estabilização dos deslocamentos, seguidos por uma reativação do movimento para os marcos MS-C2.2 e MS-C2.3, cujo aumento dos deslocamentos entre as leituras do dia 19/02/2018 e 20/06/2018 foi de aproximadamente 14 mm e 16 mm, respectivamente.

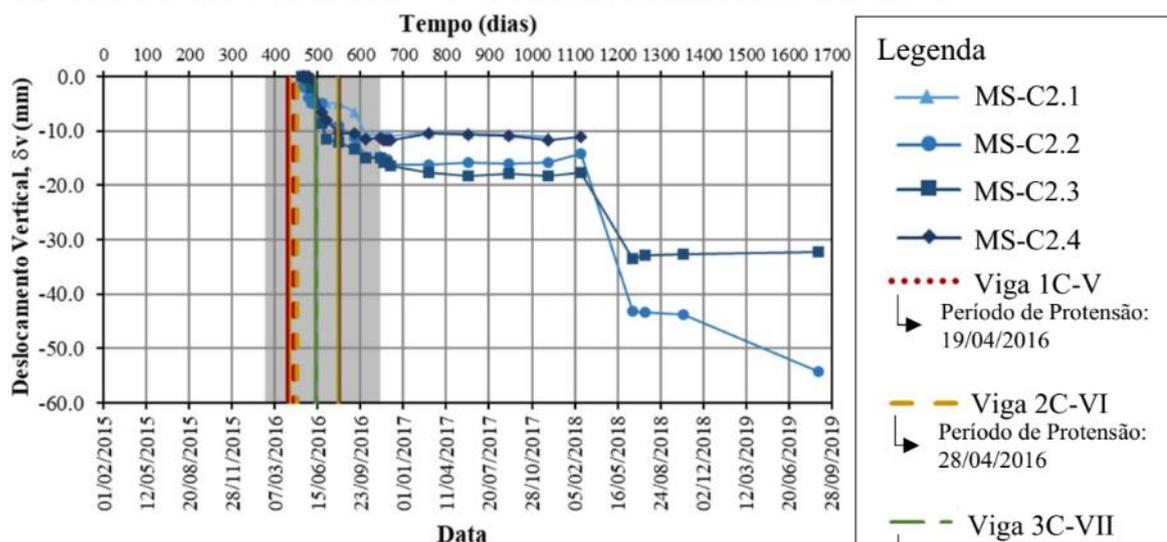
A velocidade (Figura 92c), mostrou um comportamento oscilatório durante o período inicial, que coincidiu com a fase de execução das protensões realizadas. Durante esse período foram registrados valores da ordem de 0,30 mm/dia (MS-C2.3). As velocidades passaram a valores muito reduzidos a partir de 02/03/2017, com crescimento atípico dos marcos MS-C2.2 e MS-C2.3, durante o período de reativação do movimento identificado no deslocamento.

Figura 92 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C2.

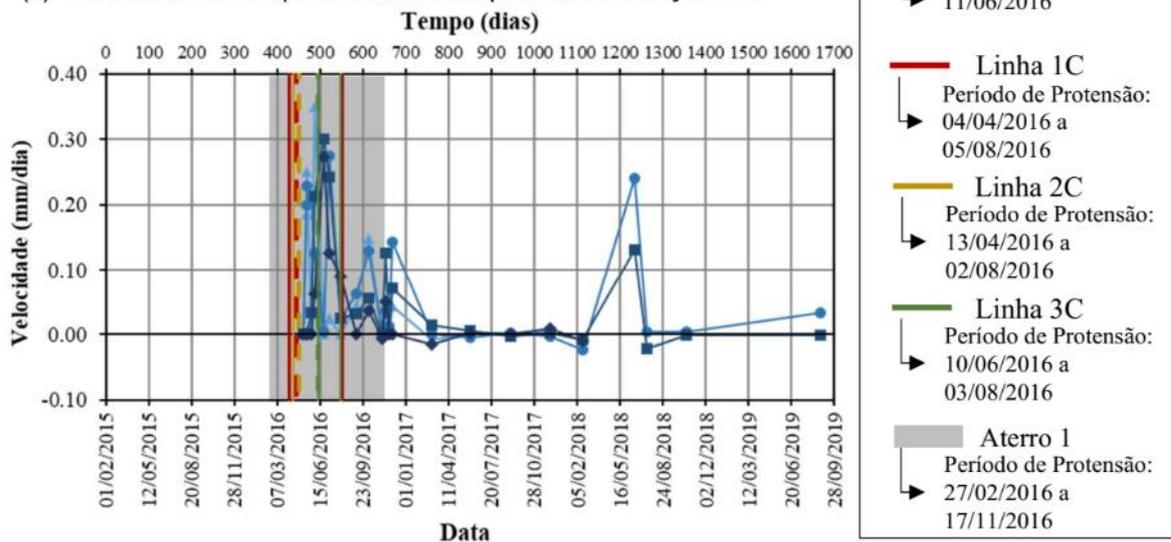
(a) Seção C2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo dos marcos superficiais da Seção C2.



(c) Velocidade vs Tempo dos marcos superficiais da Seção C2.



Fonte: O Autor (2022).

Como comentado anteriormente sobre o deslocamento, na análise de destaque (Figura 93b) para o período inicial das leituras (28/11/2015 a 20/07/2017), verificou-se oscilações nos resultados do MS-C2.1, característica um pouco diferente dos demais instrumentos, cujo comportamento se mostrou progressivo de forma geral. Observou-se também uma tendência de estabilização a partir do término do período de execução das protensões (17/11/2016).

Também foram analisados (Figura 94b), em destaque, os dados de deslocamento para o período de 20/07/2017 a 12/03/2019, para o qual observou-se um aumento do deslocamento entre 19/02/2018 e 20/06/2018, de 29 mm para o MS-C2.2 e 15 mm para o MS-C2.3. Observando também os dados pluviométricos (Figura 94a) percebeu-se que o aumento diário de chuvas coincidiu com o período de reativação da movimentação. Para esse mesmo período e como esperado a velocidade aumentou (Figura 94c), demonstrando aumento gradativo dos deslocamentos nesse período.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 24 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

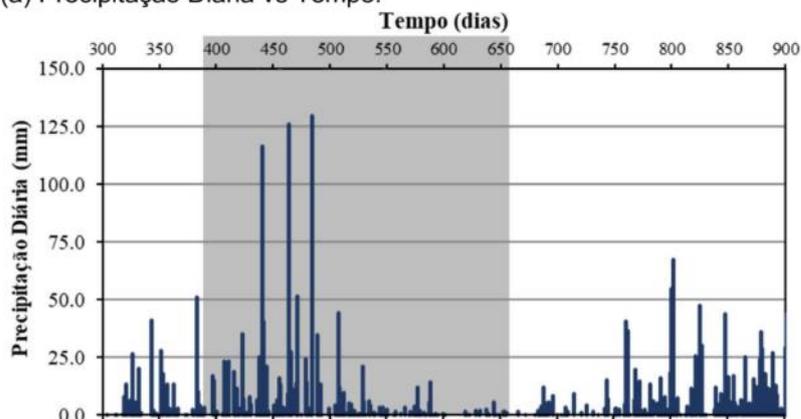
Tabela 24 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C2

Seção: C2	Deslocamentos (mm)			
Período de análise	MS-C2.1	MS-C2.2	MS-C2.3	MS-C2.4
Após a execução da protensão	24/11/2016 -10,60	24/11/2016 -15,20	24/11/2016 -15,90	24/11/2016 -11,70
Início da estabilização	02/03/2017 -10,20	02/03/2017 -16,20	02/03/2017 -17,70	02/03/2017 -10,40
Início da reativação do movimento	-	19/02/2018 -14,10	19/02/2018 -17,60	19/02/2018 -11,00
Fim da reativação do movimento	-	20/06/2018 -43,20	20/06/2018 -33,40	-
Leitura final	05/12/2017 -11,00	18/10/2018 -54,30	27/08/2019 -32,20	19/02/2018 -11,00

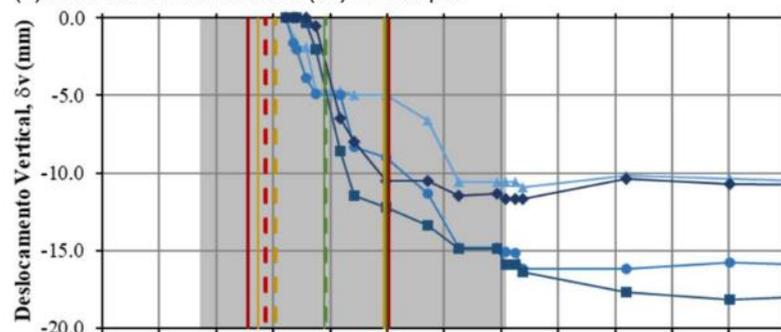
Fonte: O Autor (2022).

Figura 93 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção C2.

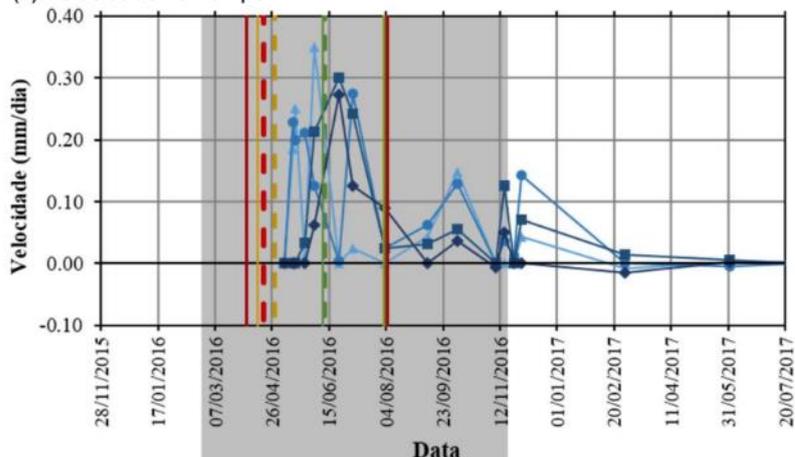
(a) Precipitação Diária vs Tempo.



(b) Deslocamentos Verticais (δ_v) vs Tempo.



(c) Velocidade vs Tempo.



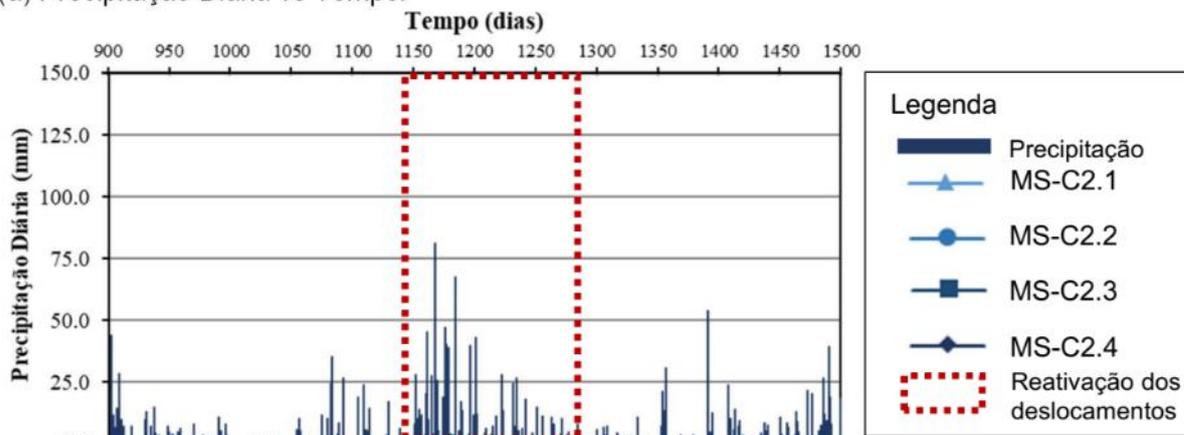
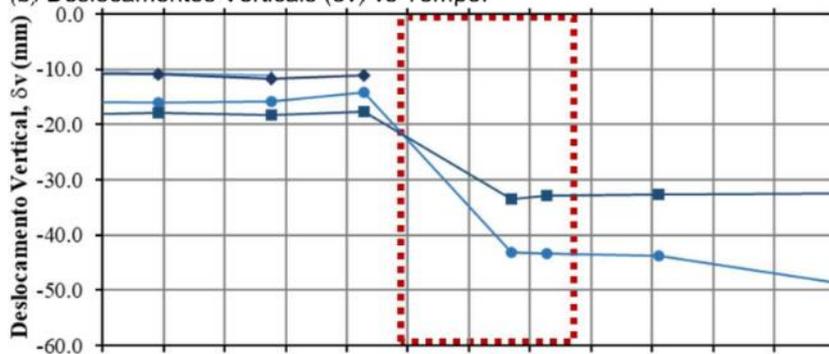
Legenda

- Precipitação
- ▲ MS-C2.1
- MS-C2.2
- MS-C2.3
- ◆ MS-C2.4
- Viga 1C-V
- Período de Protensão: 19/04/2016
- Viga 2C-VI
- Período de Protensão: 28/04/2016
- Viga 3C-VII
- Período de Protensão: 11/06/2016
- Linha 1C
- Período de Protensão: 04/04/2016 a 05/08/2016
- Linha 2C
- Período de Protensão: 13/04/2016 a 02/08/2016
- Linha 3C
- Período de Protensão: 10/06/2016 a 03/08/2016
- Aterro 1
- Período de Protensão: 27/02/2016 a 17/11/2016

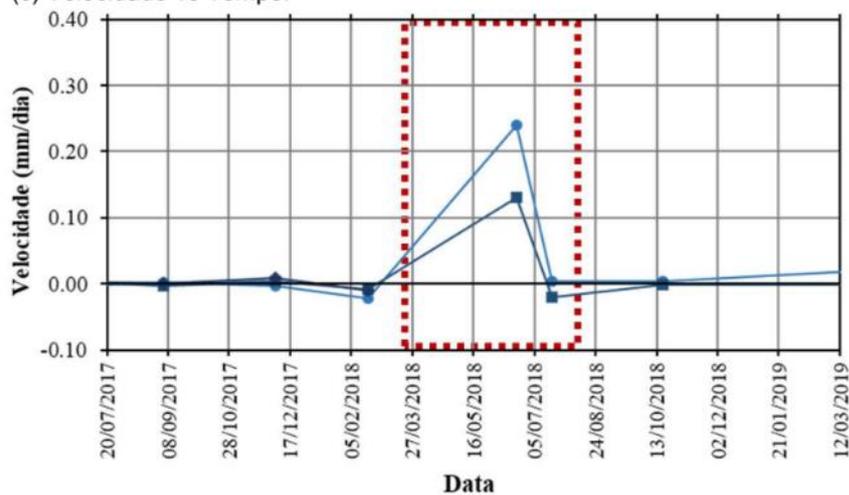
Fonte: O Autor (2022).

Figura 94 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção C2.

(a) Precipitação Diária vs Tempo.

(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.

(c) Velocidade vs Tempo.



Fonte: O Autor (2022).

A seção C3 está posicionada na área C cuja representação esquemática é mostrada na Figura 95a. Nesta seção foram executadas as protensões previstas no projeto executivo inicial.

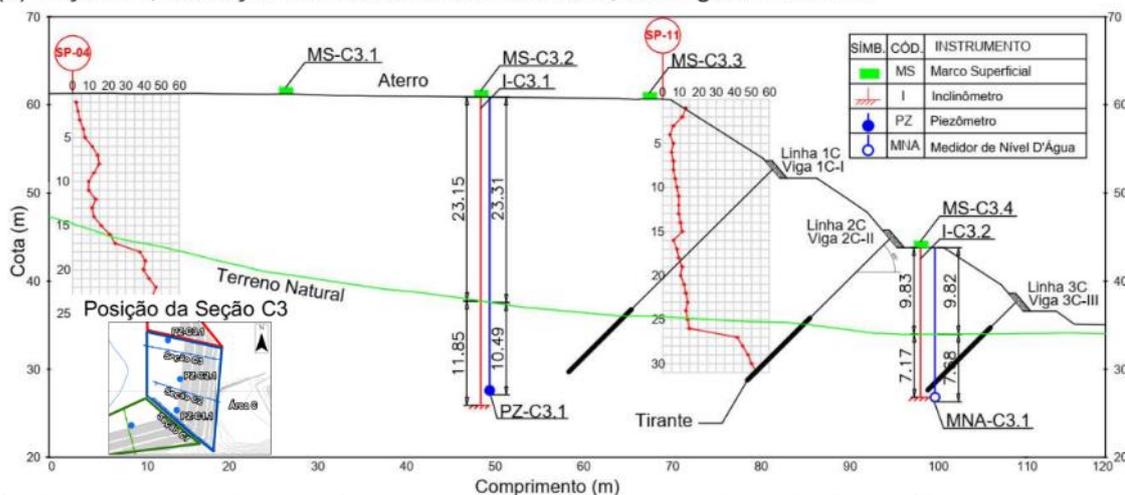
Os resultados evidenciados na Figura 95b mostraram um comportamento similar dos deslocamentos entre os marcos superficiais estudados, até os registros de 19/02/2018. Como observa-se, a partir das leituras de 16/11/2016 ocorreu uma estabilização dos deslocamentos, logo após o período de conclusão das protensões do aterro 1. A partir de 19/02/2018, ocorreu uma reativação da movimentação com aumento dos deslocamentos, seguidos de uma aparente estabilização nas leituras finais.

Após a leitura de 19/02/2018 (Figura 95b), ocorreu a perda de registros do MS-C3.2, impossibilitando a confirmação do comportamento de aumento dos deslocamentos identificadas nas leituras dos outros marcos da seção. Os registros dos marcos MS-C3.1 (posicionado na crista do aterro, Figura 95a) mostraram os maiores deslocamentos dentre os resultados desta seção, com as diferenças entre as leituras finais em relação aos marcos MS-C3.3 e MS-C3.4 da ordem de 14 mm maiores.

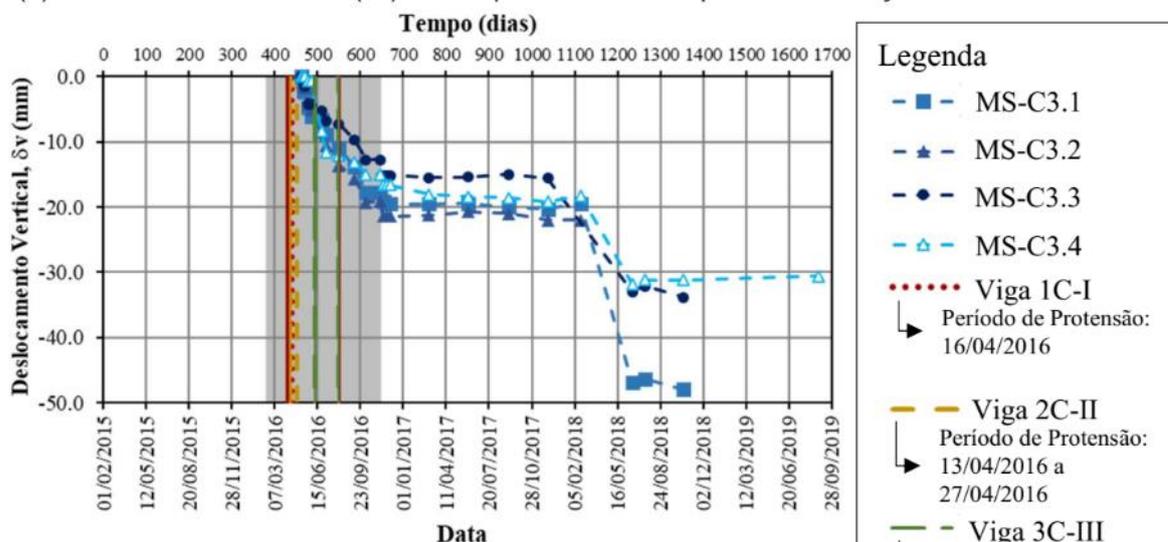
O comportamento da velocidade (Figura 95c), mostrou a confirmação do período (02/03/2017 a 19/02/2018) de estabilização indicado na análise do deslocamento, cujos valores de velocidade correspondem em média a 0,02 mm/dia. Foram registrados picos de velocidade dos marcos MS-C3.1, MS-C3.3 e MS-C3.4, com valores da ordem de 0,23 mm/dia, durante a fase de reativação dos deslocamentos (20/06/2018), não sendo possível confirmar o comportamento de estabilidade nas leituras anteriores, devido à perda de registros.

Figura 95 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C3.

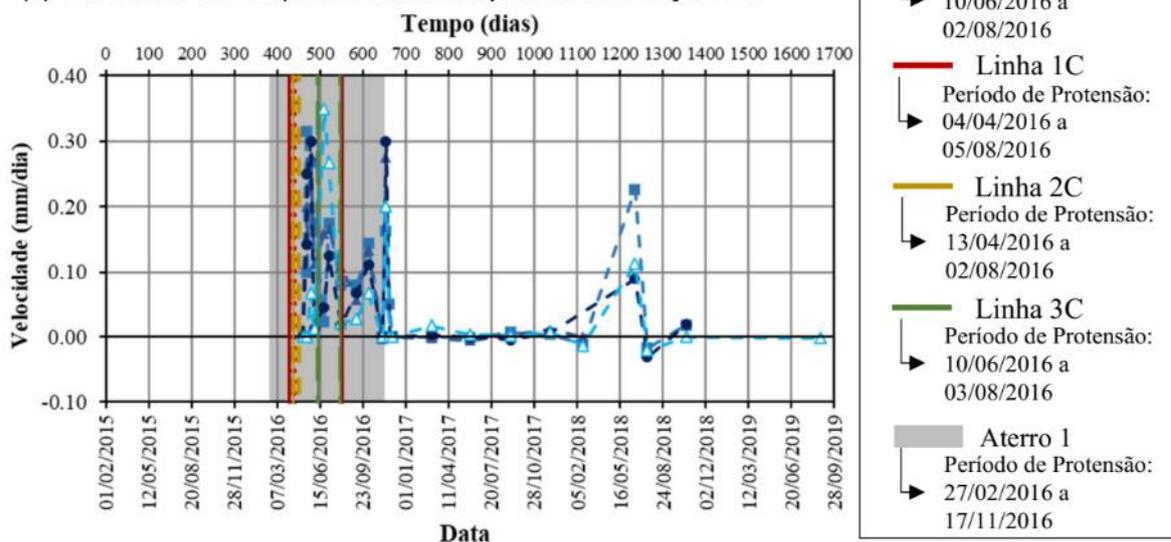
(a) Seção C3, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo dos marcos superficiais da Seção C3.



(c) Velocidade vs Tempo dos marcos superficiais da Seção C3.



Fonte: O Autor (2022).

Para auxiliar o entendimento dos deslocamentos durante o período inicial do monitoramento (28/11/2015 a 20/07/2017), analisou-se também os dados de chuva (Figura 96a). Em uma análise comparativa dos dados de chuva com os resultados do deslocamento (Figura 96b), verificou-se um aumento gradual dos deslocamentos, mesmo a partir da redução dos índices de chuva diários. Embora, fique mais evidente neste período de destaque, que após o período de protensão do aterro 1 (faixa em cinza Figura 96b), os deslocamentos se comportaram de forma estável, com os dados de velocidade também confirmando essa tendência (Figura 96c).

Assim como nas análises das seções anteriores, foram analisados (Figura 97b), em destaque, os dados de deslocamento para o período de 20/07/2017 a 12/03/2019, para o qual observou-se um aumento do deslocamento para os marcos MS-C3.1, MS-C3.3, MS-3.4. Para esse mesmo período percebeu-se um aumento diário de chuvas (Figura 97a), que coincide com o período de reativação da movimentação. A análise comparativa entre o deslocamento e a chuva registrada para esse período, mostrou que antes e após a fase de reativação dos deslocamentos, a pluviometria se manteve em níveis baixos, mas no período de destaque (polígono tracejado em vermelho) ocorre um aumento do deslocamento.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 25 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

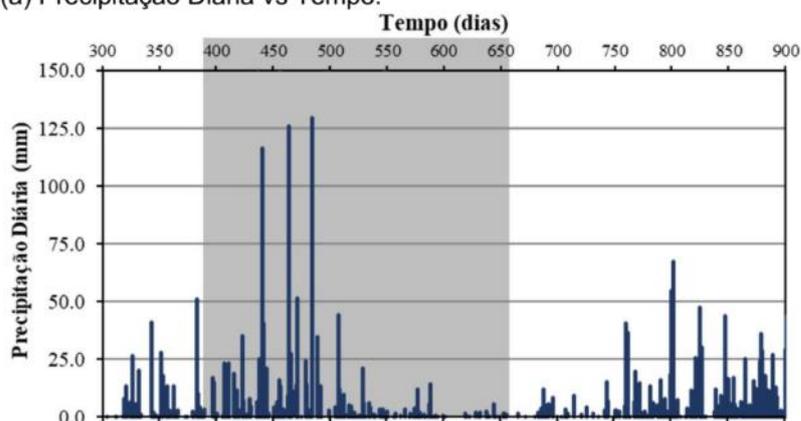
Tabela 25 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C3.

Seção: C3		Deslocamentos (mm)			
Período de análise	MS-C3.1	MS-C3.2	MS-C3.3	MS-C3.4	
Após a execução da protensão	16/11/2016 -19,10	16/11/2016 -21,40	16/11/2016 -15,20	16/11/2016 -16,60	
Início da estabilização	16/11/2016 -19,10	16/11/2016 -21,40	16/11/2016 -15,20	16/11/2016 -16,60	
Início da reativação do movimento	19/02/2018 -19,40	19/02/2018 -22,00	05/12/2017 -15,60	19/02/2018 -18,20	
Fim da reativação do movimento	20/06/2018 -46,80	-	20/06/2018 -33,00	20/06/2018 -31,80	
Leitura final	18/10/2018 -47,90	19/02/2018 -22,00	18/10/2018 -33,80	27/08/2019 -30,60	

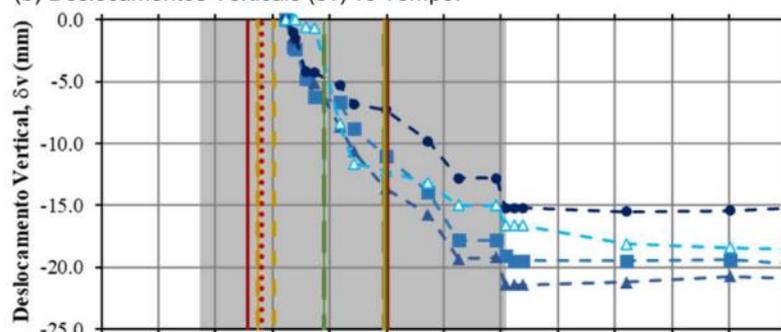
Fonte: O Autor (2022).

Figura 96 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção C3.

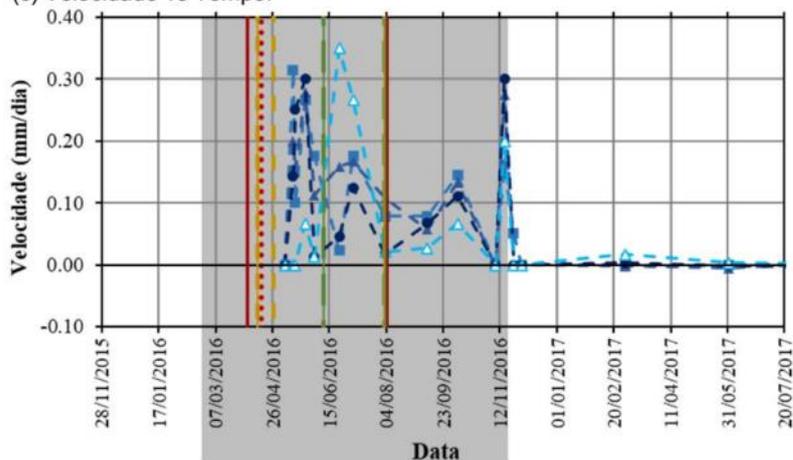
(a) Precipitação Diária vs Tempo.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.



(c) Velocidade vs Tempo.



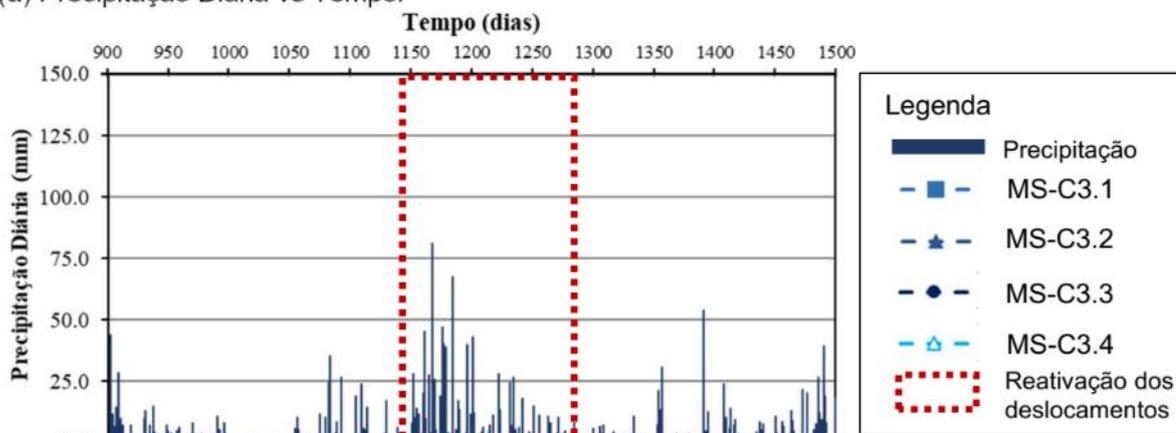
Legenda

- Precipitação
- MS-C3.1
- ▲— MS-C3.2
- MS-C3.3
- △— MS-C3.4
- Viga 1C-I
 ↳ Período de Protensão:
 16/04/2016
- Viga 2C-II
 ↳ Período de Protensão:
 13/04/2016 a
 27/04/2016
- Viga 3C-III
 ↳ Período de Protensão:
 10/06/2016 a
 02/08/2016
- Linha 1C
 ↳ Período de Protensão:
 04/04/2016 a
 05/08/2016
- Linha 2C
 ↳ Período de Protensão:
 13/04/2016 a
 02/08/2016
- Linha 3C
 ↳ Período de Protensão:
 10/06/2016 a
 03/08/2016
- Aterro 1
 ↳ Período de Protensão:
 27/02/2016 a
 17/11/2016

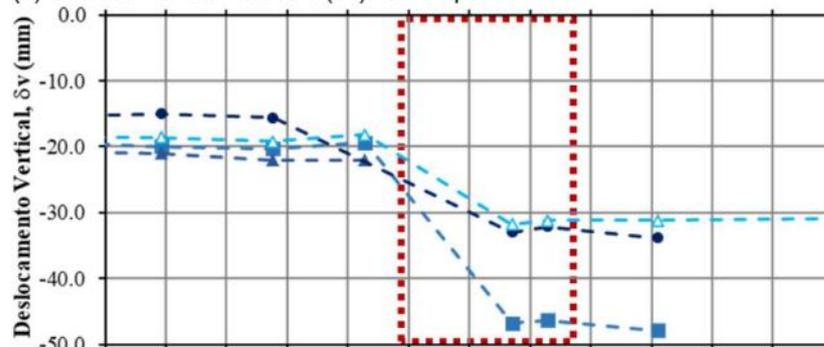
Fonte: O Autor (2022).

Figura 97 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção C3.

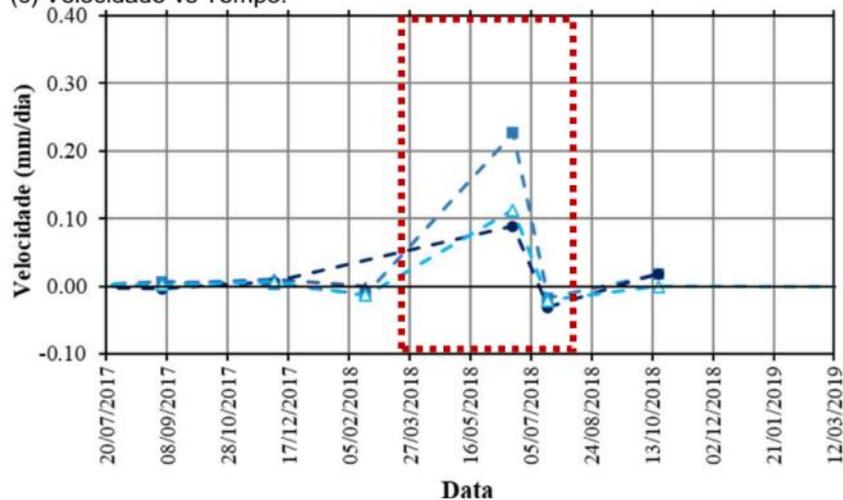
(a) Precipitação Diária vs Tempo.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.



(c) Velocidade vs Tempo.



Fonte: O Autor (2022).

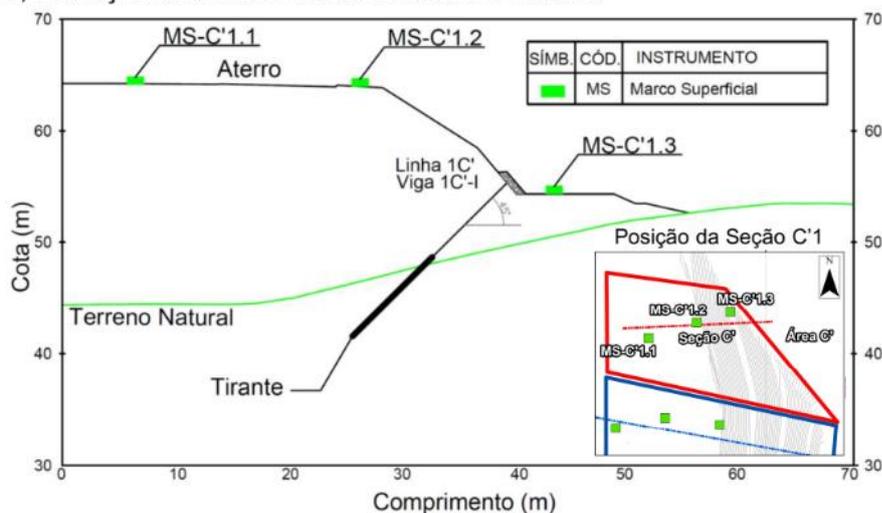
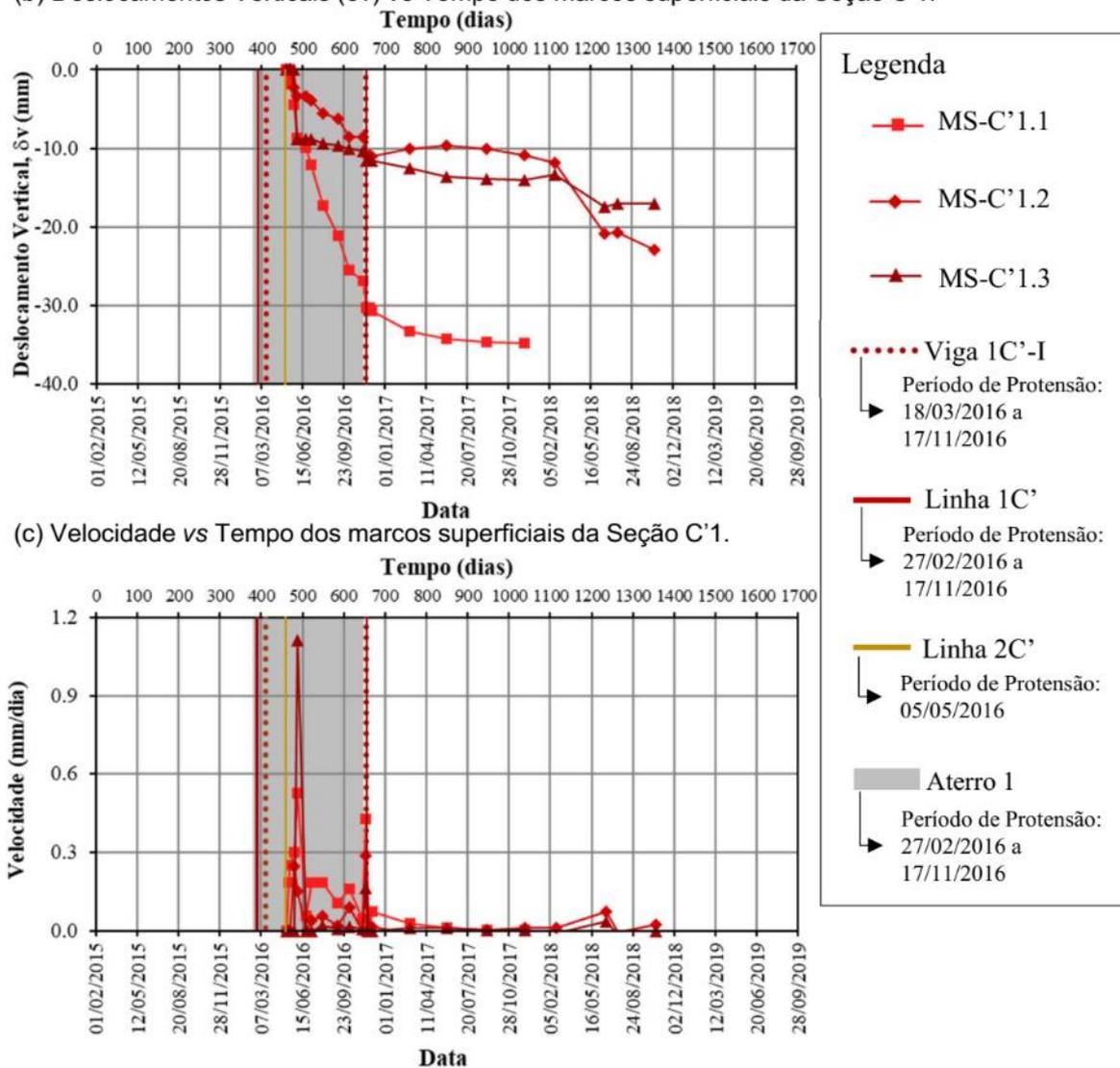
A seção está posicionada na área C'1, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 98a. Nesta seção foram executadas as protensões previstas no projeto executivo inicial.

Os resultados gráficos da Figura 98b, mostraram um comportamento distinto entre os deslocamentos dos marcos superficiais analisados. O marco MS-C'1.1 apresentou uma tendência de crescimento acelerada e superior aos demais marcos desta seção. Para o registro de 05/12/2017, observou-se uma diferença de ≈ 24 mm entre os deslocamentos do MS-C'1.1 (-34,8 mm) e o MS-C'1.3 (-14,0 mm). Assim como as demais seções apresentadas, para o período de 02/03/2017 a 19/02/2018 foi possível perceber uma aparente estabilização da movimentação. Na sequência, registrou-se uma reativação dos deslocamentos entre o período de (19/02/2018 a 20/06/2018), com uma variação de ≈ 9 mm para o marco MS-C'1.2 e ≈ 4 mm para o marco MS-C'1.3.

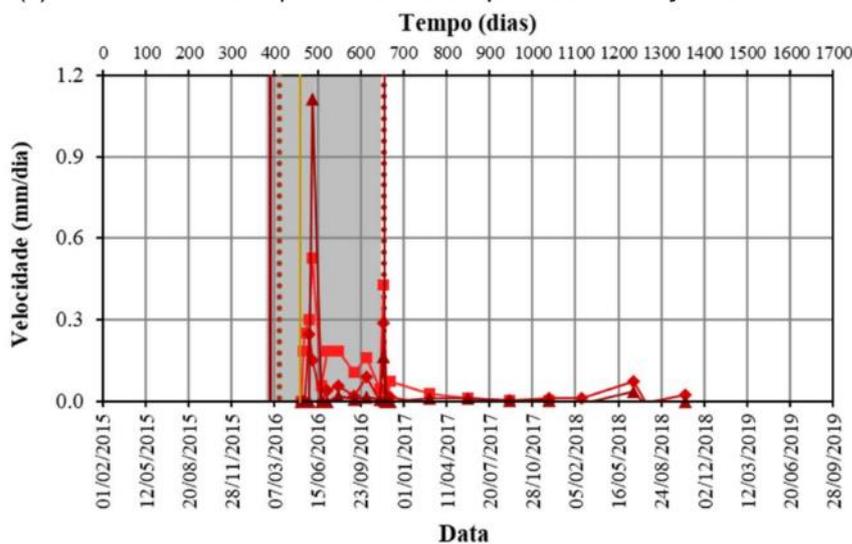
A análise gráfica da velocidade (Figura 98c), mostrou que o marco MS-C'1.1 apresenta velocidades maiores em relação aos demais desta seção, confirmando o comportamento mais acelerado do deslocamento no período inicial. Após o período de execução das protensões (27/02/2016 a 17/11/2016), as velocidades diminuem e assumem valores da ordem de 0,01 mm/dia.

Figura 98 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C'1.

(a) Seção C'1, ilustração dos instrumentos instalados e tirantes.

(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo dos marcos superficiais da Seção C'1.

(c) Velocidade vs Tempo dos marcos superficiais da Seção C'1.



Fonte: O Autor (2022).

Para auxiliar o entendimento dos deslocamentos durante o período inicial do monitoramento (28/11/2015 a 20/07/2017), analisou-se também os dados de chuva. A partir dos dados diários de chuvas (Figura 99a) e em uma análise comparativa com as leituras de deslocamento, não se verificou uma evolução acentuada dos valores tanto para MS-C'1.2 quanto para MS-C'1.3, percebendo uma aparente estabilização. A partir desse destaque nos dados e observando as posições dos instrumentos na seção (Figura 98a), constatou-se que a intersecção entre o volume do aterro e o terreno natural tende a diminuir na direção dos marcos MS-C'1.2 e MS-C'1.3, fato que pode ajudar a compreender a redução dos valores do deslocamento.

Também foram analisados (Figura 100b), em destaque, os dados de deslocamento para o período de 20/07/2017 a 12/03/2019, para o qual observou-se uma alteração no padrão de deslocamentos entre 19/02/2018 e 20/06/2018. Observando também os dados pluviométricos (Figura 100a) percebeu-se que o aumento diário de chuvas coincide com o período de reativação da movimentação. Para esse período a velocidade sofreu um pequeno aumento (Figura 100c), embora com valores muito menores que os registrados em outros marcos da área do aterro 1.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 26 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

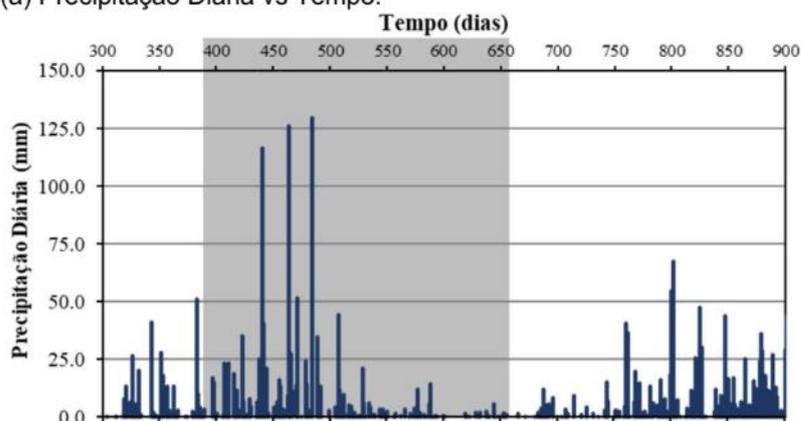
Tabela 26 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C'1.

Seção: C'1	Deslocamentos (mm)		
	Período de análise	MS-C'1.1	MS-C'1.2
Após a execução da protensão	24/11/2016 -30,30	24/11/2016 -10,90	24/11/2016 -11,60
Início da estabilização	01/06/2017 -13,80	-	01/06/2017 -13,60
Início da reativação do movimento	-	19/02/2018 -11,90	19/02/2018 -13,30
Fim da reativação do movimento	-	20/06/2018 -20,90	20/06/2018 -17,50
Leitura final	05/12/2017 -34,80	18/10/2018 -23,00	18/10/2018 -17,10

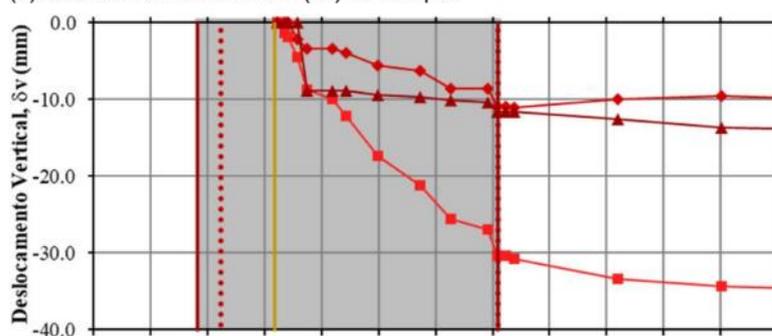
Fonte: O Autor (2022).

Figura 99 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção C'1.

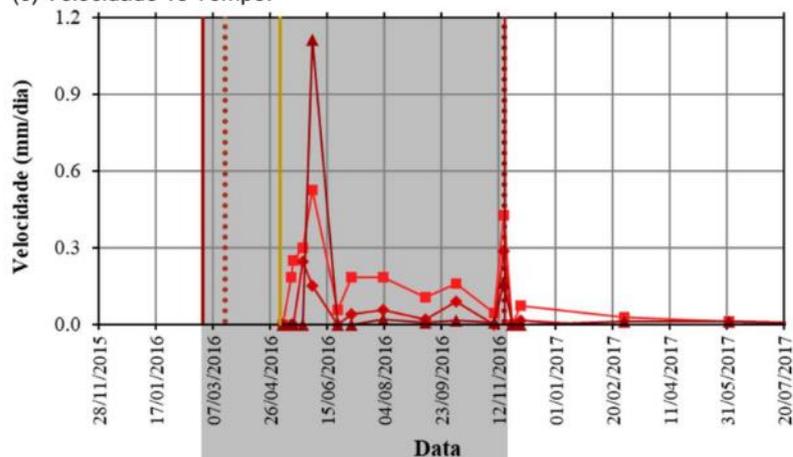
(a) Precipitação Diária vs Tempo.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.



(c) Velocidade vs Tempo.



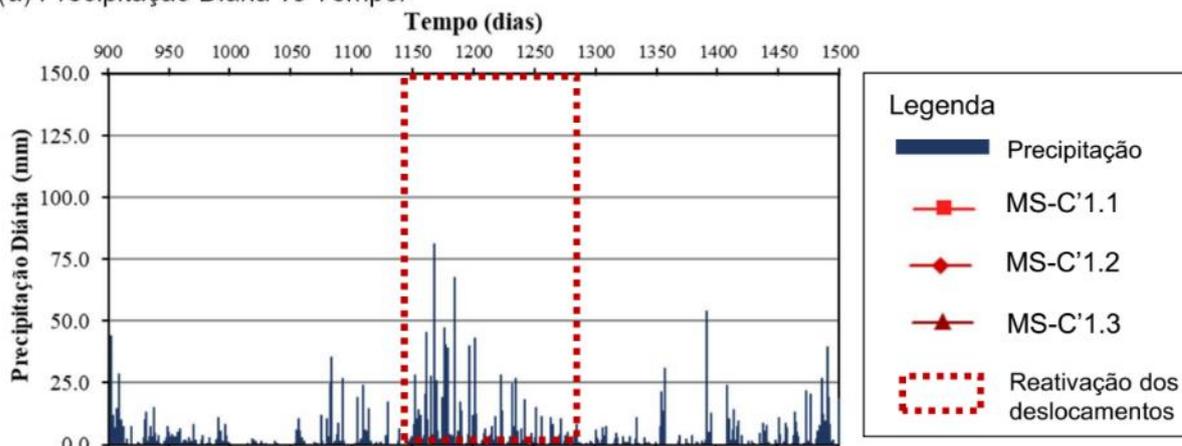
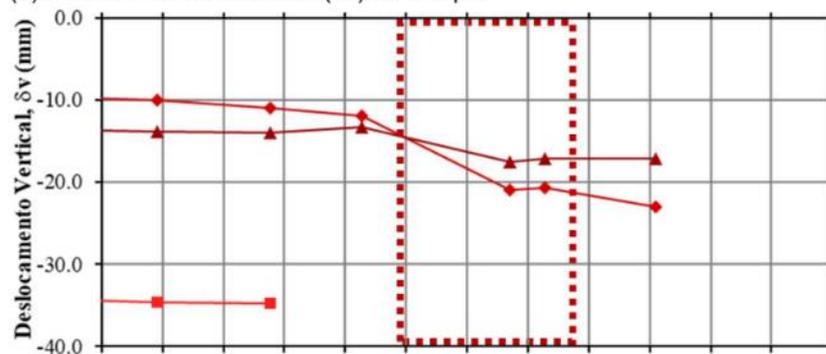
Legenda

- Precipitação
- MS-C'1.1
- ◆ MS-C'1.2
- ▲ MS-C'1.3
- Viga 1C'-I
- Linha 1C'
Período de Protensão:
18/03/2016 a
17/11/2016
- Linha 2C'
Período de Protensão:
27/02/2016 a
17/11/2016
- Linha 2C'
Período de Protensão:
05/05/2016
- Aterro 1
Período de Protensão:
27/02/2016 a
17/11/2016

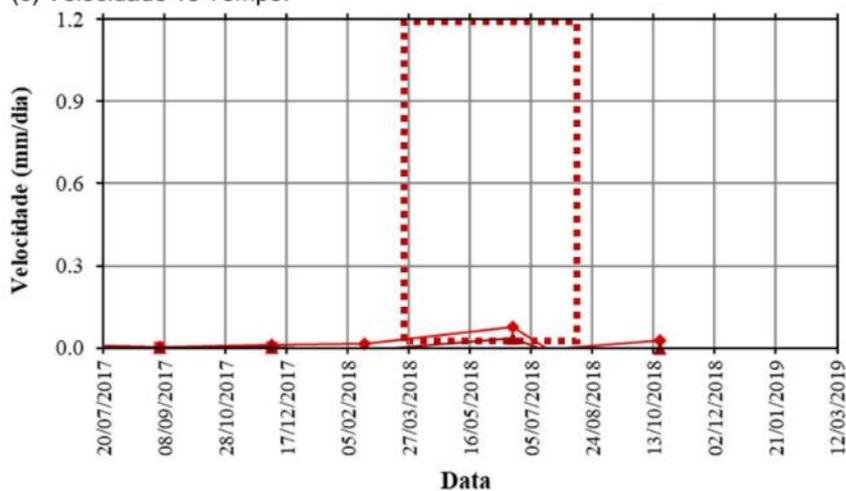
Fonte: O Autor (2022).

Figura 100 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção C'1.

(a) Precipitação Diária vs Tempo.

(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.

(c) Velocidade vs Tempo.



Fonte: O Autor (2022).

8.2.4.1.2 Região Aterro 2

A seção D1 está posicionada na área D, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 101a. Nesta seção não foram executadas as linhas 3D e linha 4D, bem como as vigas 3D-X e 4D-IX, previstas no projeto executivo inicial.

Os resultados indicados na Figura 101b mostraram um comportamento progressivo dos deslocamentos entre os marcos superficiais estudados, com os deslocamentos dos instrumentos MS-D1.2 e até os registros de 16/11/2016. Como observa-se, a partir das leituras de 16/11/2016 ocorre uma estabilização dos deslocamentos, logo após o período de conclusão das protensões do aterro 1. A partir de 19/02/2018, ocorreu uma reativação da movimentação com aumento dos deslocamentos, seguidos de uma aparente estabilização nas leituras finais.

O comportamento da velocidade (Figura 101c), mostrou oscilações e valores mais altos durante o período inicial das leituras (07/05/2016 a 16/11/2016). Foi registrado pico de velocidade no marco MS-D1.3, com valores da ordem de 0,26 mm/dia. Após esse período constatou-se uma redução significativa dos valores de velocidade, com uma leve alteração na fase de reativação dos deslocamentos (19/07/2018), embora na sequencia se verifique o mesmo padrão de antes.

Para auxiliar o entendimento dos deslocamentos durante o período inicial do monitoramento (28/11/2015 a 20/07/2017), analisou-se também os dados de chuva (Figura 102a). Em uma análise comparativa dos dados de chuva com os resultados do deslocamento (Figura 102b), verificou-se um aumento gradual dos deslocamentos, mesmo a partir da redução dos índices de chuva diários. Embora, fique mais evidente neste período de destaque, que após o período de protensão do aterro 1 (faixa em cinza Figura 102b), os deslocamentos se comportaram de forma estável, com os dados de velocidade também confirmando essa tendência (Figura 102c).

Assim como nas análises das seções anteriores, foram analisados (Figura 103b), em destaque, os dados de deslocamento para o período de 20/07/2017 a 12/03/2019, para o qual observou-se um aumento do deslocamento para o marco MS-D1.3 e um leve aumento para o marco MS-D1.1. Para esse mesmo período percebeu-se um aumento diário de chuvas (Figura 103a), que coincide com o período de reativação da movimentação. Em relação a constatação dessas alterações em outras seções,

destaca-se que a variação dos valores registrados nesses resultados foi a menor identificada.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 27 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

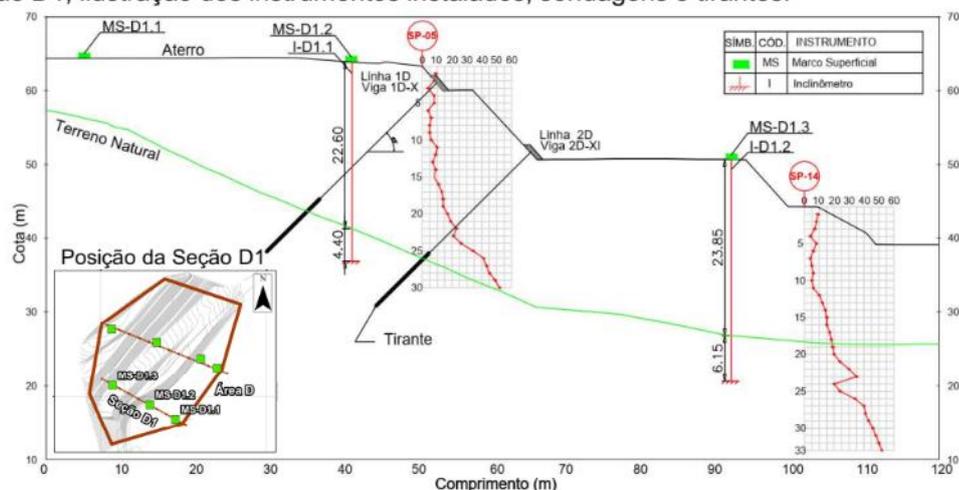
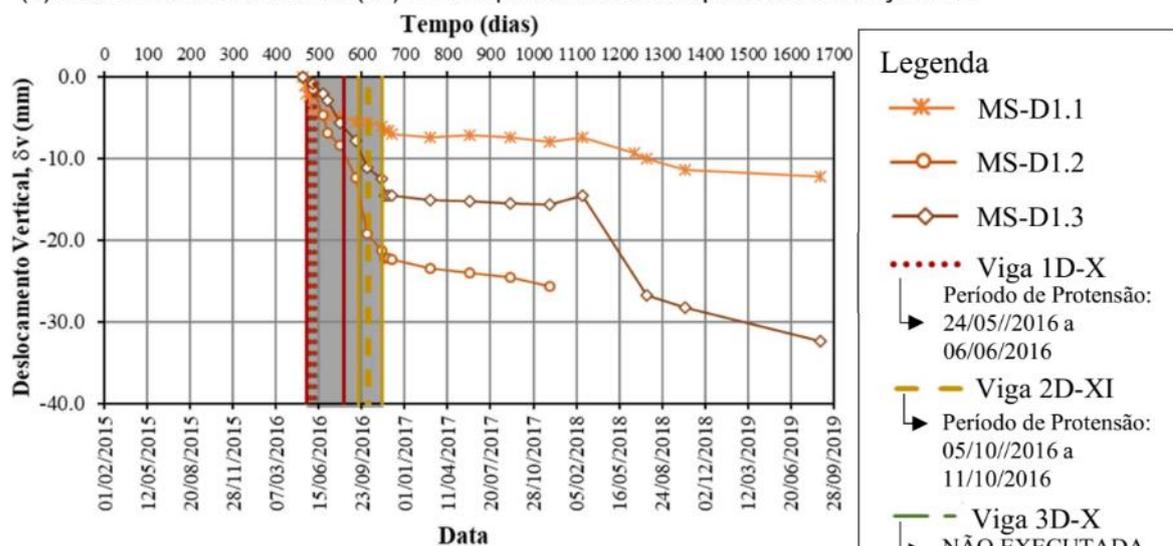
Tabela 27 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção D1.

Seção: D1	Deslocamentos (mm)		
	MS-D1.1	MS-D1.2	MS-D1.3
Período de análise			
Após a execução da protensão	24/11/2016 -6,60	24/11/2016 -22,20	24/11/2016 -14,60
Início da estabilização	01/12/2016 -7,00	16/11/2016 22,20	16/11/2016 14,60
Início da reativação do movimento	19/02/2018 -7,50	-	19/02/2018 -14,60
Fim da reativação do movimento	18/10/2018 -11,40	-	19/07/2018 -26,70
Leitura final	27/08/2019 -12,20	05/12/2017 -25,60	27/08/2019 -32,30

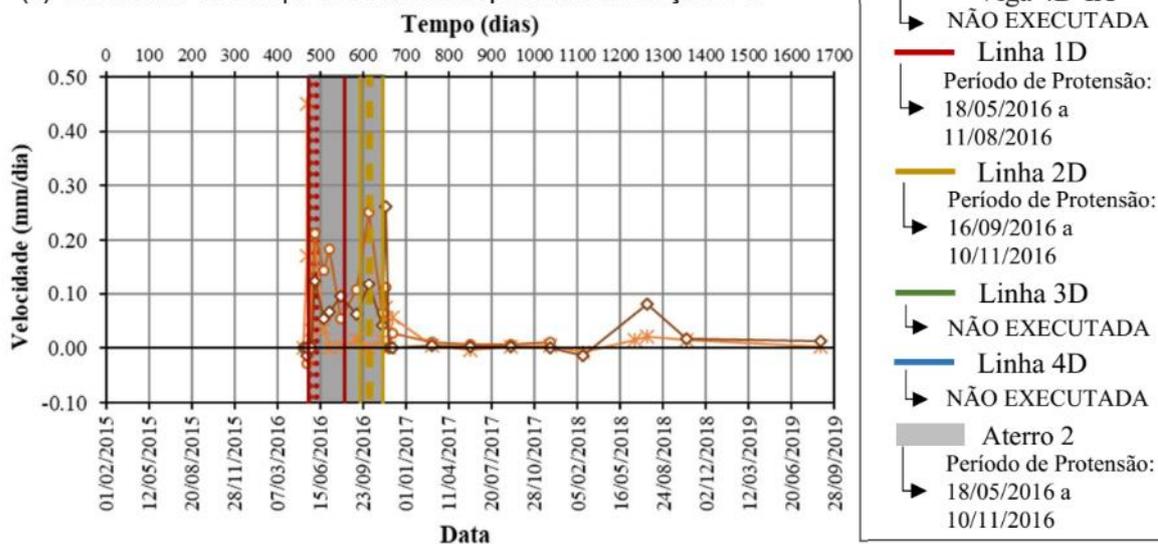
Fonte: O Autor (2022).

Figura 101 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção D1.

(a) Seção D1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.

(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo dos marcos superficiais da Seção D1.

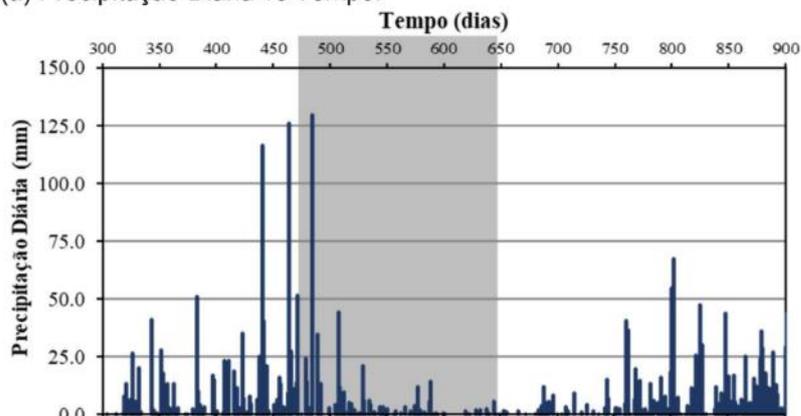
(c) Velocidade vs Tempo dos marcos superficiais da Seção D1.



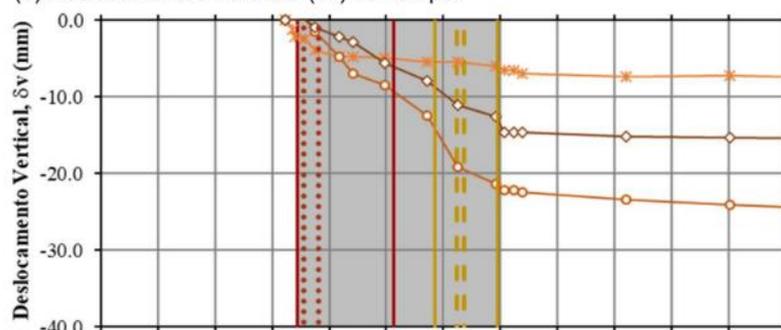
Fonte: O Autor (2022).

Figura 102 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção D1.

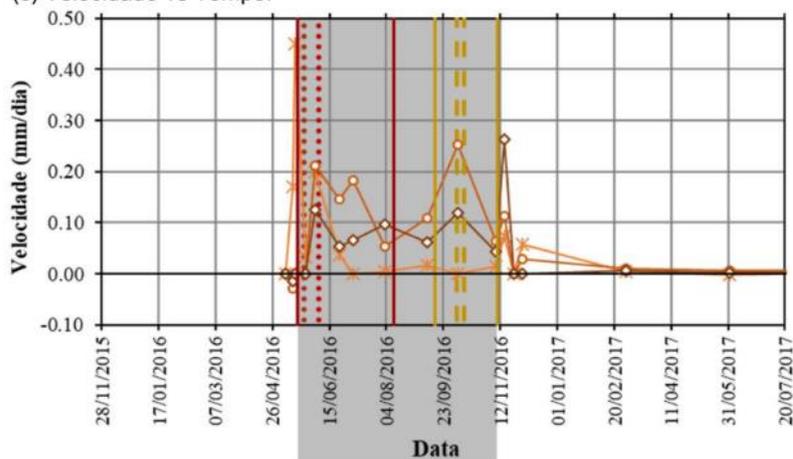
(a) Precipitação Diária vs Tempo.



(b) Deslocamentos Verticais (δ_v) vs Tempo.



(c) Velocidade vs Tempo.



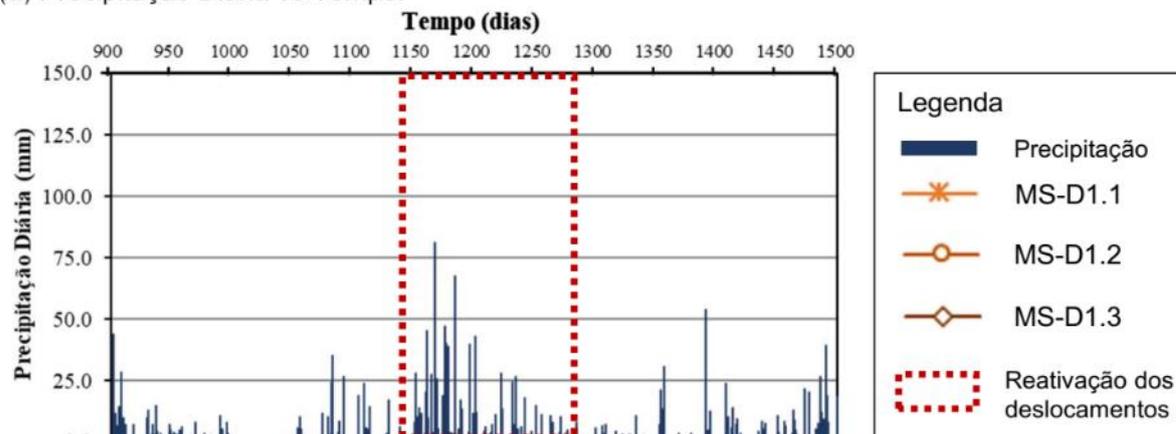
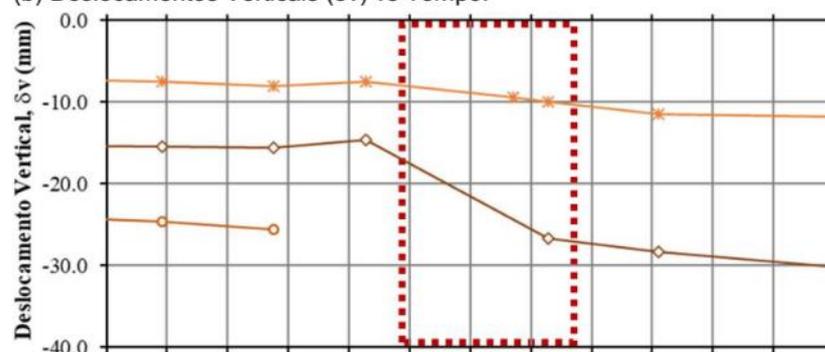
Legenda

- Precipitação
- * MS-D1.1
- MS-D1.2
- ◇ MS-D1.3
- Viga 1D-X
 ↳ Período de Protensão:
 ↳ 24/05//2016 a
 ↳ 06/06/2016
- Viga 2D-XI
 ↳ Período de Protensão:
 ↳ 05/10//2016 a
 ↳ 11/10/2016
- Viga 3D-X
 ↳ NÃO EXECUTADA
- Viga 4D-IX
 ↳ NÃO EXECUTADA
- Linha 1D
 ↳ Período de Protensão:
 ↳ 18/05/2016 a
 ↳ 11/08/2016
- Linha 2D
 ↳ Período de Protensão:
 ↳ 16/09/2016 a
 ↳ 10/11/2016
- Linha 3D
 ↳ NÃO EXECUTADA
- Linha 4D
 ↳ NÃO EXECUTADA
- Aterro 2
 ↳ Período de Protensão:
 ↳ 18/05/2016 a
 ↳ 10/11/2016

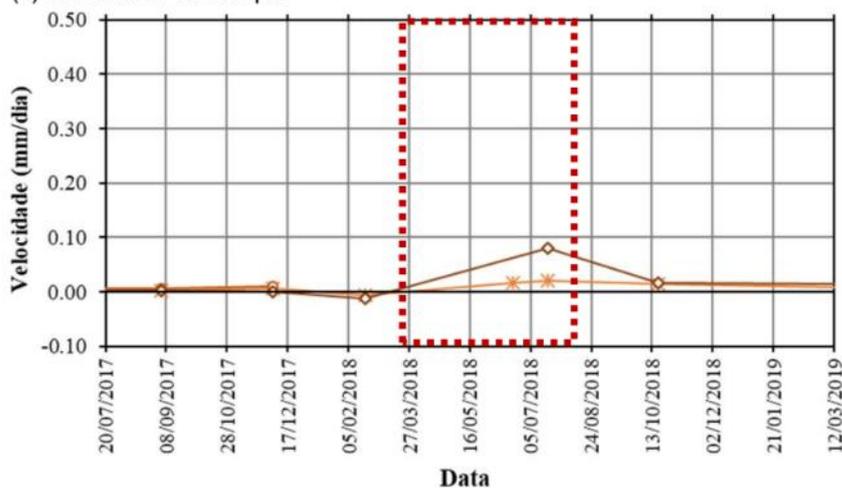
Fonte: O Autor (2022).

Figura 103 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção D1.

(a) Precipitação Diária vs Tempo.

(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.

(c) Velocidade vs Tempo.



Fonte: O Autor (2022).

A seção D2 está posicionada na área D, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 104a. Nesta seção não foram executadas as linhas 1D, 3D e 4D, bem como as vigas 2D-V, 3D-V e 4D-III previstas no projeto executivo inicial. A linha 2D foi executada parcialmente e as demais linhas e vigas executadas na seção de análise são marcadas a fim de facilitar o entendimento.

A análise dos deslocamentos (Figura 104b) evidenciaram um comportamento progressivo das leituras para todos marcos superficiais até o registro de 08/11/2016, após esse período ocorreu uma redução dos valores, seguidos por uma reativação do movimento para o MS-D2.3. Cabe destacar que a magnitude dos deslocamentos para o marco MS-D2.3 é significativamente maior do que os outros analisados desta seção e foi o maior valor de deslocamento registrado entre todos os instrumentos analisados, com o último valor de registro da ordem de -86,80 mm em 27/08/2019.

A velocidade (Figura 104c), demonstrou um comportamento oscilatório, até a leitura 02/03/2017, com valores da ordem de 0,35 mm/dia, após esse período os valores sofreram significativa redução, com uma pequena alteração no período de reativação da movimentação, já identificado no deslocamento.

Como já destacado, também foram consideradas as análises dos deslocamentos durante o período inicial do monitoramento (28/11/2015 a 20/07/2017). Em uma análise comparativa dos dados de chuva com os resultados do deslocamento (Figura 105b), verificou-se um aumento gradual dos deslocamentos para o MS-D2.3, e um comportamento gradativo para os marcos MS-D2.1 e MS-D2.2. Embora, fique mais evidente neste período de destaque, que após o período de protensão do aterro 1 (faixa em cinza Figura 105b), os deslocamentos se comportam de forma estável.

Da forma semelhante ao destaque do período inicial das leituras, foram analisados (Figura 106) os dados de precipitação e dos deslocamentos no período de 20/07/2017 a 12/03/2019 em que se verificou alterações no comportamento do deslocamento. O aumento da ocorrência de chuvas (Figura 106a) coincidiu com a reativação do deslocamento (Figura 106b) identificada no MS-D2.3 para o período destacado. Nesse intervalo, a velocidade dos deslocamentos para MS-D2.3 sofreu um aumento registrando 0,14 mm/dia.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 28 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

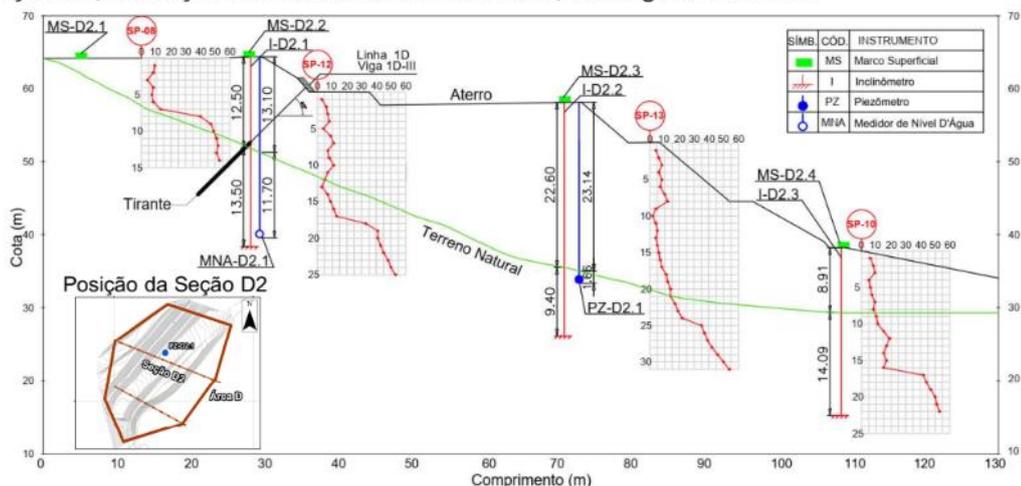
Tabela 28 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção D2.

Seção: D2	Deslocamentos (mm)			
	MS-D2.1	MS-D2.2	MS-D2.3	MS-D2.4
Período de análise				
Após a execução da protensão	24/11/2016 -0,70	24/11/2016 -10,50	24/11/2016 -48,60	-
Início da estabilização	08/11/2016 -0,70	08/11/2016 -10,40	02/03/2019 -59,20	-
Início da reativação do movimento	-	-	19/02/2018 -59,00	-
Fim da reativação do movimento	-	-	19/07/2018 -80,20	-
Leitura final	05/12/2017 -0,40	19/02/2018 -12,70	27/08/2019 -86,80	09/09/2016 -14,40

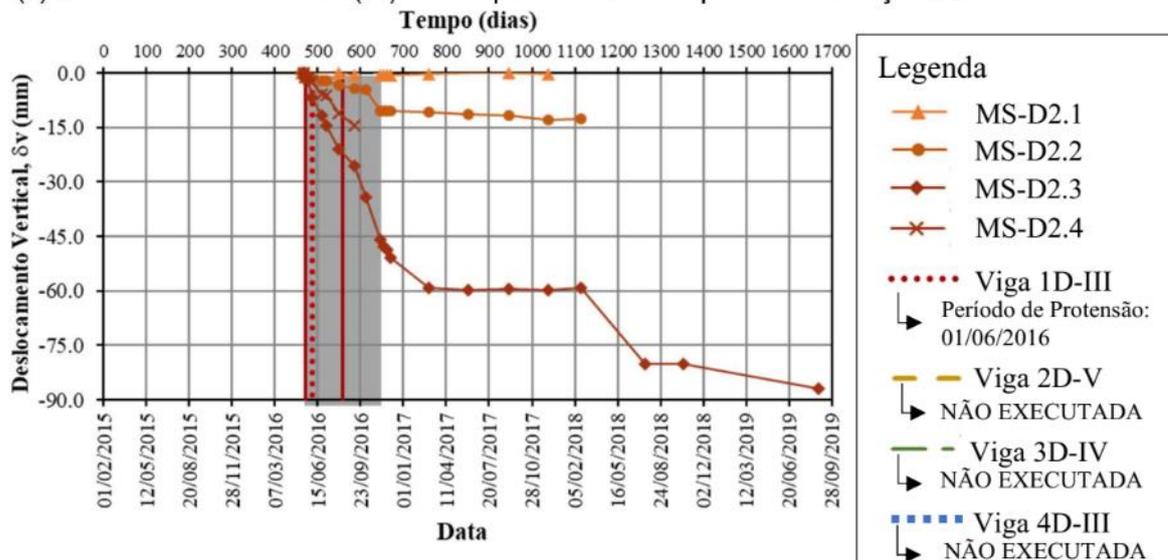
Fonte: O Autor (2022).

Figura 104 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção D2.

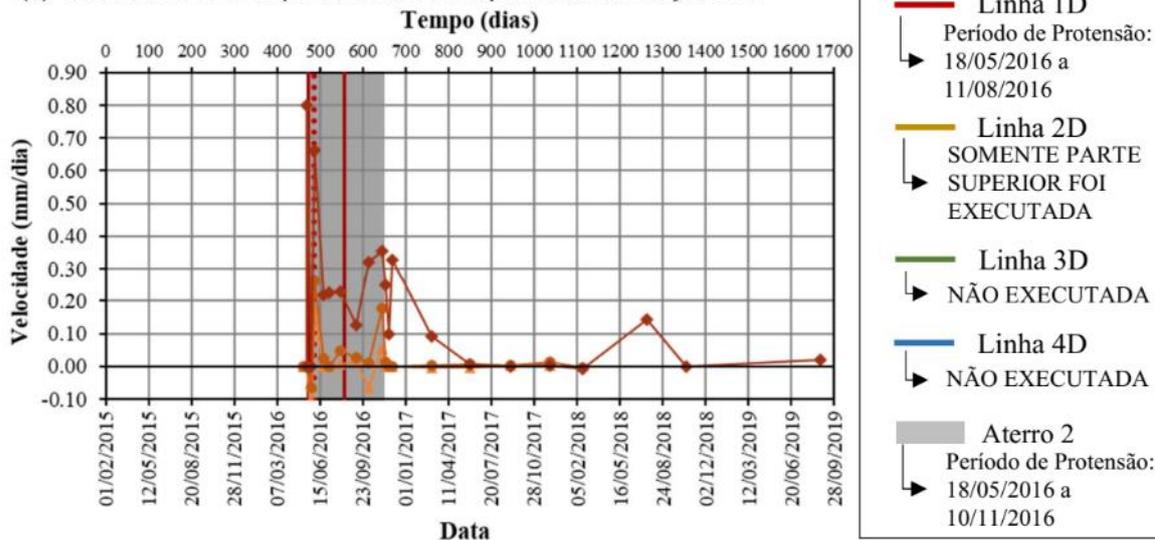
(a) Seção D2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo dos marcos superficiais da Seção D2.



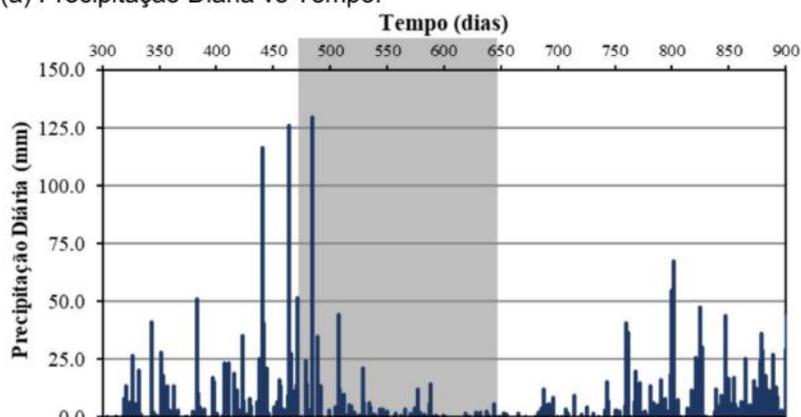
(c) Velocidade vs Tempo dos marcos superficiais da Seção D2.



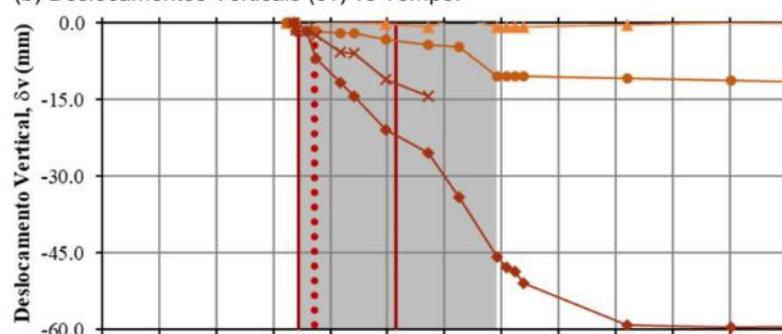
Fonte: O Autor (2022).

Figura 105 – Destaque do período inicial dos dados de deslocamento e velocidade da seção D2.

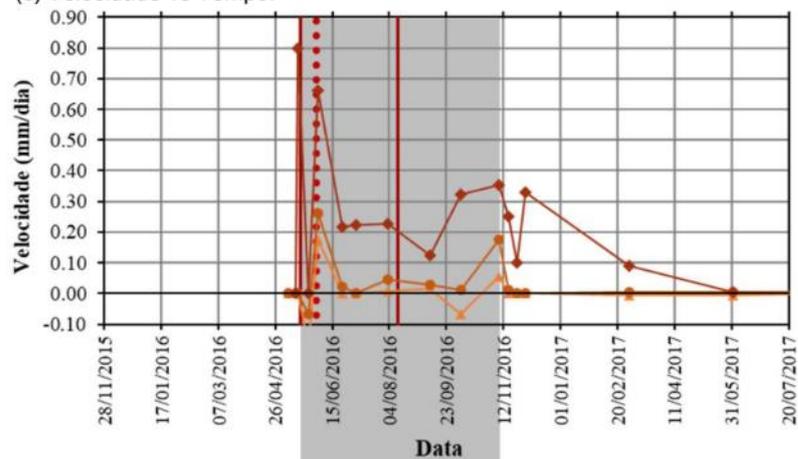
(a) Precipitação Diária vs Tempo.



(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.



(c) Velocidade vs Tempo.



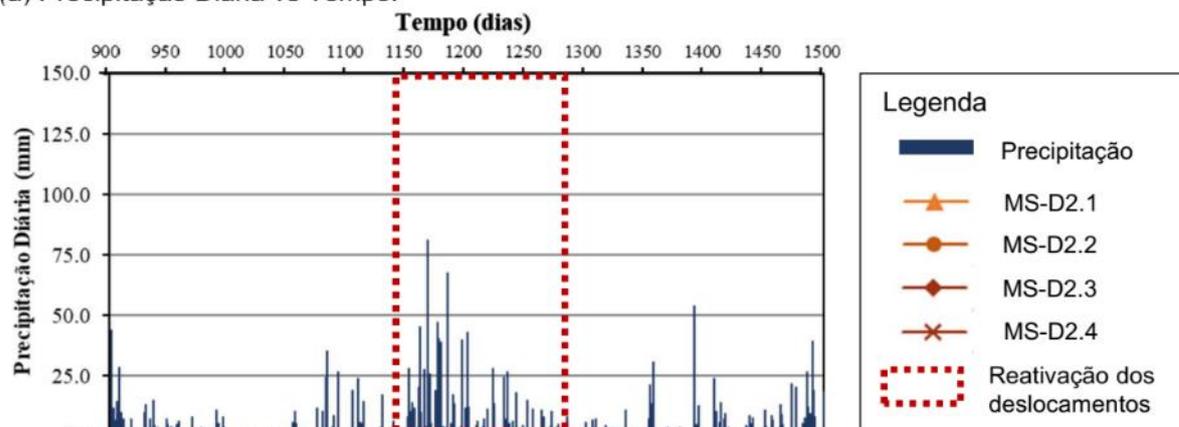
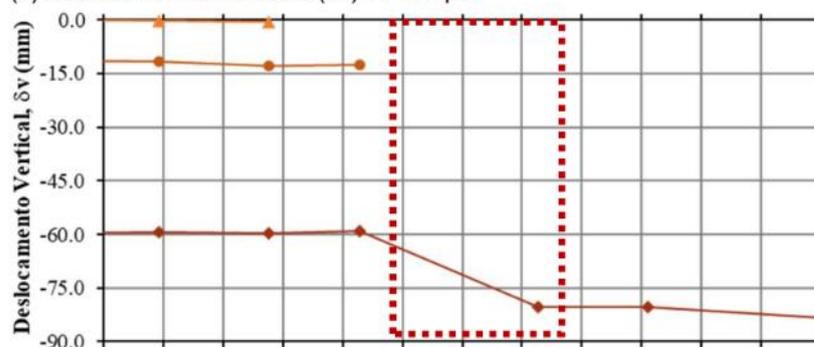
Legenda

- Precipitação
- ▲ MS-D2.1
- MS-D2.2
- ◆ MS-D2.3
- × MS-D2.4
- Viga 1D-III
- └ Período de Protensão: 01/06/2016
- Viga 2D-V
- └ NÃO EXECUTADA
- Viga 3D-IV
- └ NÃO EXECUTADA
- Viga 4D-III
- └ NÃO EXECUTADA
- Linha 1D
- └ Período de Protensão: 18/05/2016 a 11/08/2016
- Linha 2D
- └ SOMENTE PARTE SUPERIOR FOI EXECUTADA
- Linha 3D
- └ NÃO EXECUTADA
- Linha 4D
- └ NÃO EXECUTADA
- Aterro 2
- └ Período de Protensão: 18/05/2016 a 10/11/2016

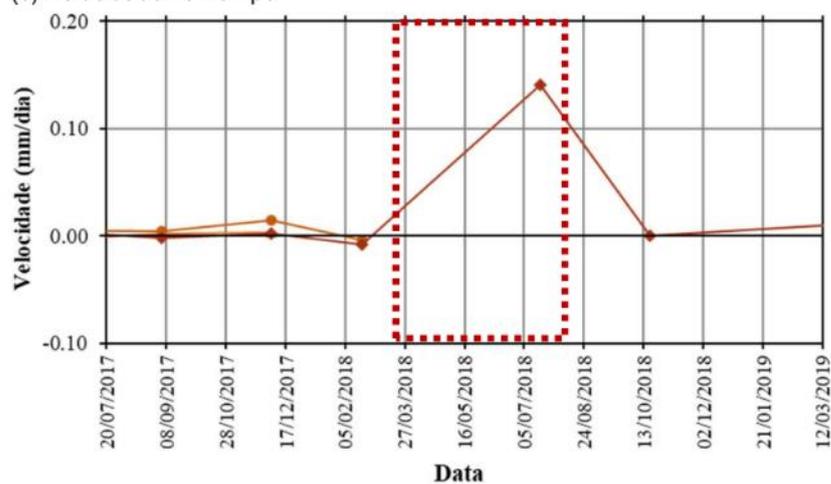
Fonte: O Autor (2022).

Figura 106 – Destaque do período de reativação dos dados de deslocamento da seção D2.

(a) Precipitação Diária vs Tempo.

(b) Deslocamentos Verticais (δv) vs Tempo.

(c) Velocidade vs Tempo.



Fonte: O Autor (2022).

8.2.4.2 Análise do mapa da evolução temporal e espacial dos deslocamentos verticais

Em ambiente SIG, por meio do *software* ArcGIS foi criada a interpolação dos dados, conforme apresentados na Seção 8.1.2.1. Nos mapas constam também o Limite Terreno Natural e o Aterro (linha azul) e as localizações dos instrumentos estão destacadas em quadrados verdes. Para uma melhor visualização dos dados, optou-se por representar em degradê verde os valores com menores deslocamentos, e em degradê variando para o vermelho os valores com maiores deslocamentos, estabelecendo assim um maior contraste entre os valores.

8.2.4.2.1 Região Aterro 1

Após interpolação dos dados, foi extraído do raster o valor correspondente ao calculado pelo método Krigagem Ordinária para cada marco superficial. Com os valores medidos na campanha de leituras dos instrumentos e os valores obtidos pela interpolação, foram realizados os cálculos de ME (erro médio), RMS (erro médio quadrático) e r (coeficiente de correlação de Pearson), a fim de avaliar a acurácia das interpolações.

A Tabela 29 apresenta os resultados da análise estatística para validação da acurácia das interpolações. Os valores de ME e RMSE de boa parte das interpolações ficaram em torno de 0, indicando uma boa qualidade para os valores estimados. Já os resultados para o coeficiente de correlação de Pearson ficaram próximas a 1, significando uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis analisadas (deslocamentos medidos e deslocamentos estimados pela interpolação). Assim, foram validadas as acurácias das interpolações realizadas e, com isso, utilizou-se todas para interpretação da evolução temporal e espacial dos deslocamentos verticais.

Tabela 29 – Análise estatística das interpolações dos deslocamentos verticais do Aterro 1, por meio do ME, RMS e r.

Datas	Krigagem Ordinária		
	ME	RMSE	r
16/05/2016	-0.02	0.12	0.9938
02/06/2016	-0.05	0.88	0.9550
06/07/2016	0.05	0.34	0.9958
03/08/2016	0.00	1.04	0.9757
09/09/2016	0.01	0.93	0.9868
06/10/2016	0.06	0.47	0.9976
08/11/2016	0.01	0.96	0.9915
01/12/2016	0.04	0.76	0.9957
02/03/2017	-0.06	1.88	0.9768
01/06/2017	-0.05	2.06	0.9728
05/09/2017	-0.06	2.15	0.9698
05/12/2017	-0.06	2.05	0.9713
19/02/2018	0.05	0.31	0.9992
20/06/2018	0.11	0.95	0.9988
19/07/2018	0.02	0.57	0.9997
18/10/2018	-0.02	0.62	0.9996
28/08/2019	0.11	0.86	0.9994

Fonte: O Autor (2022).

É possível visualizar nas Figura 107 e Figura 108 a composição de mapas da evolução temporal e espacial do deslocamento vertical do Aterro 1. No período compreendido entre 16/05/2016 e 05/12/2017 as leituras dos 20 marcos superficiais foram utilizadas para interpolação e análise de dados e podem ser visualizados nas Figura 107a à Figura 107l. Analisando os mapas da Figura 107a à Figura 107g que considerou os dados medidos entre 16/05/2016 e 08/11/2016, observa-se a evolução do deslocamento vertical variando entre 0 e -29,9mm com deslocamento máximo compreendido na faixa de -29,9 e -20 mm localizado a sudeste da área interpolada (Figura 107g).

Nos mapas das Figura 107h a Figura 108m, que consideram os dados medidos no período entre 01/12/2016 e 19/02/2018, foi observada a variação dos deslocamentos entre 0 e -34,9mm, notando uma estabilidade nos valores de

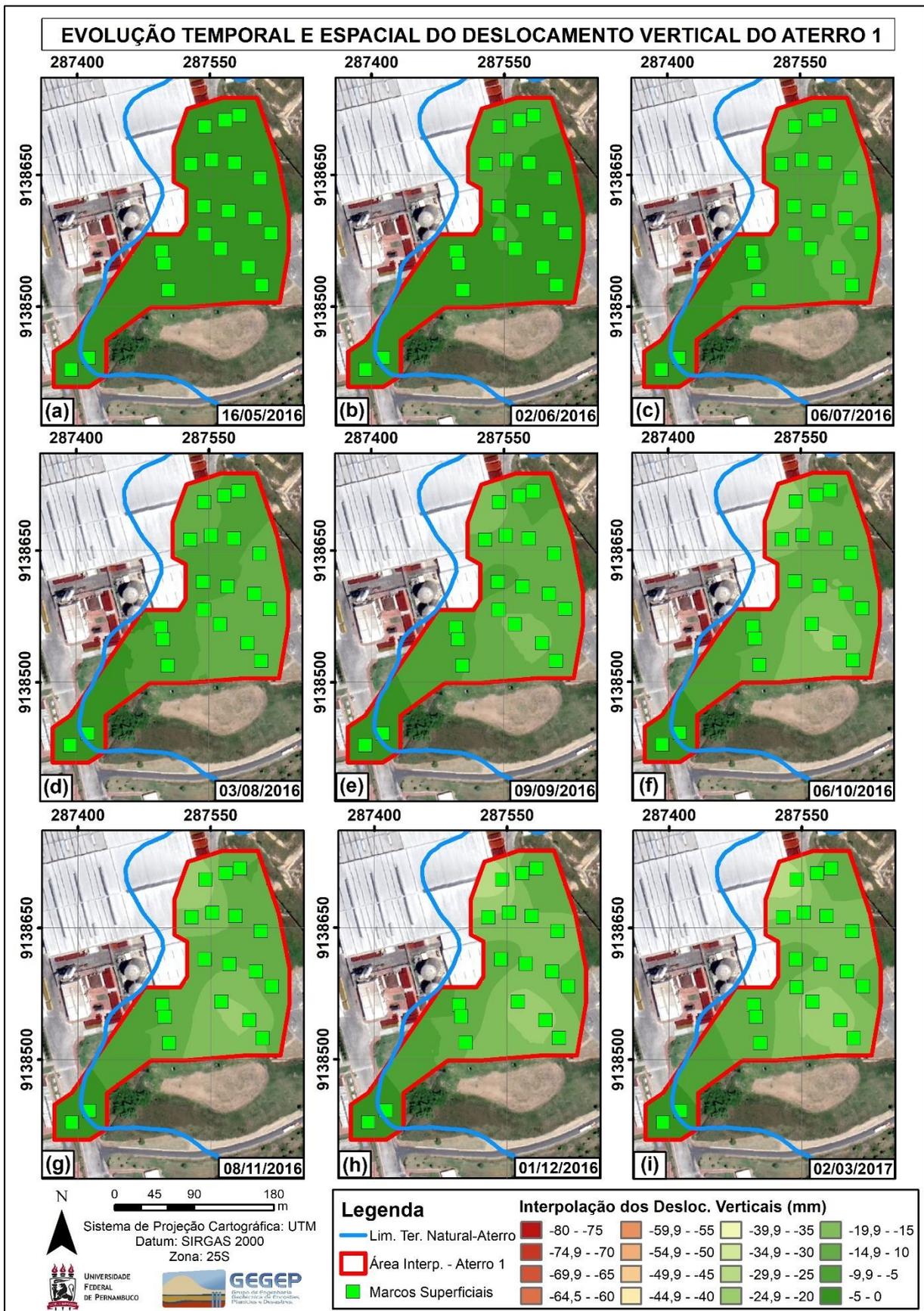
deslocamentos verticais em um intervalo de aproximadamente um ano e dois meses. Vale salientar que em 17/11/2016 houve a finalização da execução de todas as protensões dos tirantes do Aterro 1 (com exceção das linhas de tirantes 1A, 2A e parte da 3B) , indicando a eficiência da obra de estabilização.

Analisando os mapas das Figura 108n a Figura 108p observa-se a variação dos deslocamentos verticais entre 0 e -80mm, com dados obtidos no período entre 20/06/2018 e 18/10/2018. Nota-se que entre os dados da Figura 108m (19/02/2018) e Figura 108n (20/06/2018), cujo intervalo das leituras corresponde a 4 meses, houve uma variação máxima de aproximadamente 40mm no deslocamento vertical, com a coloração degradê vermelho são representados os maiores valores de deslocamento, compreendidos na faixa de -45mm e -80mm e localizados na região central da área interpolada. Indicando a reativação da movimentação da Região do Aterro 1, principalmente em torno das áreas B e C.

Na Figura 108q tem-se o mapa dos dados interpolados do dia 28/08/2019, observa-se a variação entre 0 e -64,9 mm com valores máximos de deslocamento concentrados na parte central da área interpolada. Destaca-se que essa interpolação contou apenas com a leituras de oito MS. Com isso, os valores obtidos na interpolação podem não apresentar a distribuição espacial dos deslocamentos vertical.

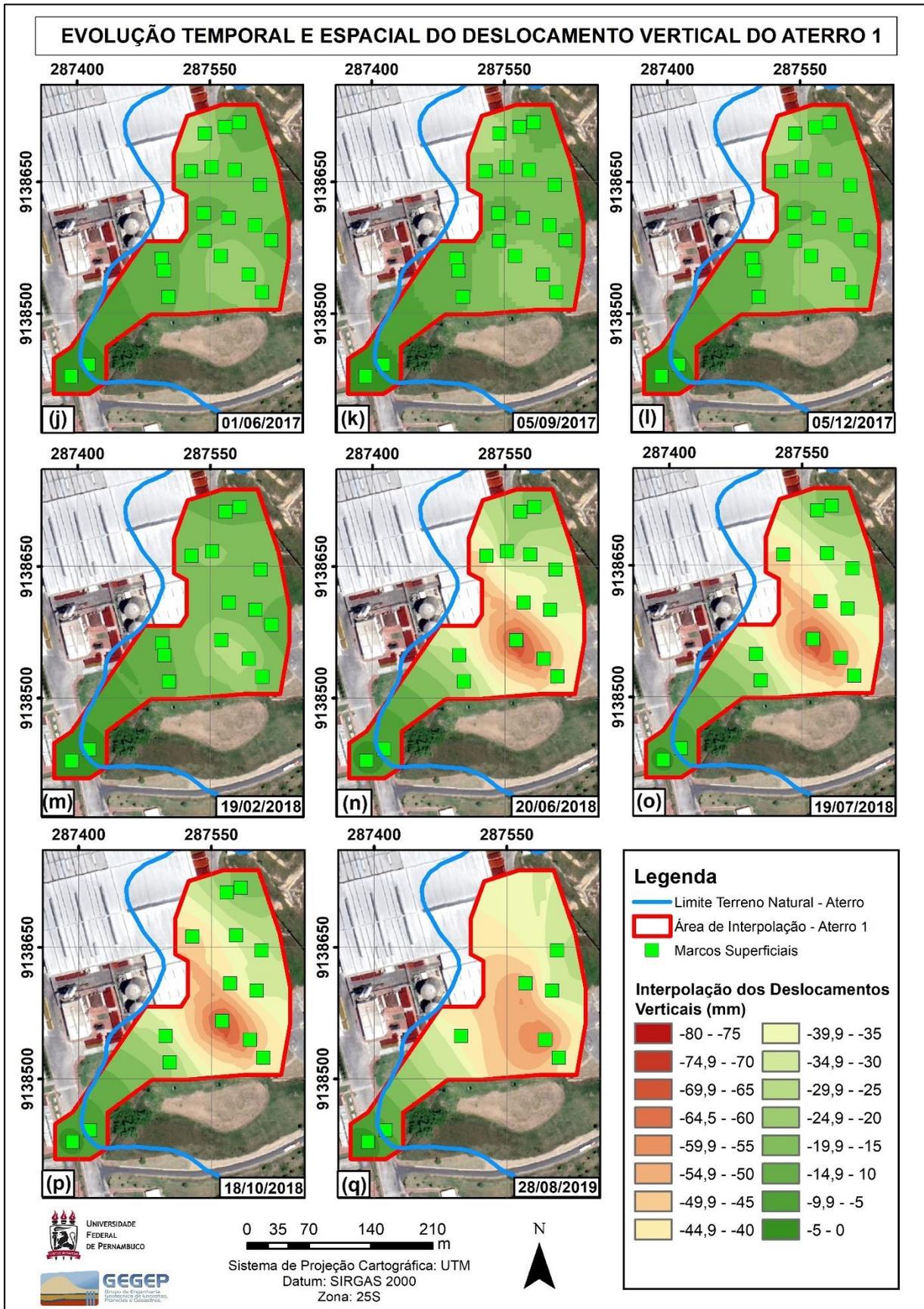
Também para interpolação dos dados do dia 20/06/2018 foram utilizados 15 marcos superficiais, para 19/07/2018 foram utilizados 14 MS e para 28/08/2019 foram utilizados apenas oito MS, conforme comentado anteriormente. A variação na quantidade de dados de leituras interpoladas pode interferir no resultado final dos deslocamentos.

Figura 107 – Evolução temporal e espacial do deslocamento vertical do Aterro 1 (Parte 1).



Fonte: O Autor (2022).

Figura 108 – Evolução temporal e espacial do deslocamento vertical do Aterro 1 (Parte 2).



Fonte: O Autor (2022).

8.2.4.2.2 Região Aterro 2

Depois de realizada a interpolação dos dados, foi extraído do raster o deslocamento vertical correspondente ao calculado pelo método Krigagem Ordinária para cada marco superficial. Com os valores medidos na campanha de campo dos instrumentos e os valores obtidos pela interpolação, foram realizados os cálculos de ME (erro médio), RMS (erro médio quadrático) e r (coeficiente de correlação de Pearson), a fim de avaliar a acurácia das interpolações.

A Tabela 30 apresenta os resultados da análise estatística para validação da acurácia das interpolações.

Tabela 30 – Análise estatística das interpolações dos deslocamentos verticais do Aterro 2, por meio do ME, RMS e r.

Data	Krigagem Ordinária		
	ME	RMS	R
16/05/2016	0.06	0.22	0.9966
02/06/2016	0.01	0.11	0.9997
06/07/2016	-0.53	4.29	0.2067
03/08/2016	-0.53	5.54	0.5138
09/09/2016	0.03	0.24	0.9998
06/10/2016	0.03	0.41	0.9998
08/11/2016	-0.62	13.75	0.4034
01/12/2016	0.04	0.55	0.9999
02/03/2017	0.05	0.63	0.9999
01/06/2017	0.05	0.65	0.9999
05/09/2017	0.05	0.65	0.9999
05/12/2017	0.61	1.04	0.9993
19/02/2018	0.00	20.69	-
20/06/2018	0.00	0.00	-
19/07/2018	-0.29	1.63	1.000
18/10/2018	-0.29	1.31	1.000
28/08/2019	-0.31	1.85	1.000

Fonte: O Autor (2022).

Os valores de ME e RMSE de boa parte das interpolações ficaram em torno de 0, indicando uma boa qualidade para os valores estimados, com exceção das interpolações das leituras dos dias 06/07/2016, 03/08/2016, 08/11/2016, e 19/02/2018.

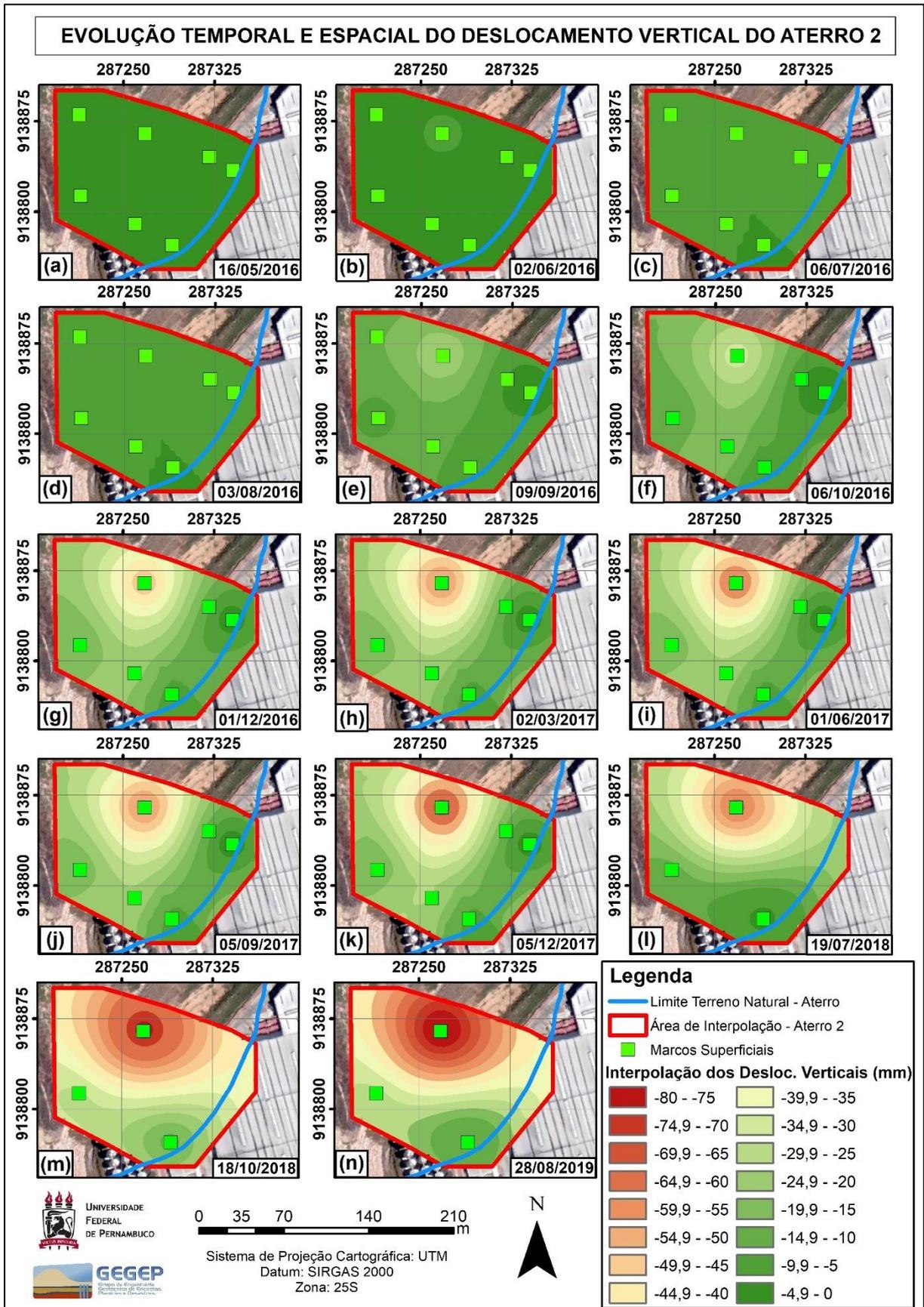
Já os resultados para o r , boa parte também ficou próxima a 1, com exceção das interpolações das leituras dos dias 06/07/2016, 03/08/2016 e 08/11/2016, significando uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis analisadas. Assim, foram validadas as acurácias das interpolações realizadas e, com isso, retirou-se da interpretação da evolução temporal e espacial dos deslocamentos verticais as interpolações das leituras dos dias 08/11/2016, 19/02/2018 e 20/06/2018.

A Figura 109 apresenta uma composição de mapas da evolução temporal e espacial do deslocamento vertical do Aterro 2. No período compreendido entre 16/05/2016 e 09/09/2016 as leituras dos sete marcos superficiais foram utilizadas para interpolação e análise de dados e podem ser visualizados nas Figura 109a à Figura 109e. Analisando os mapas da Figura 109a à Figura 109f que considerou os dados medidos no período de 5 meses, entre 16/05/2016 e 06/10/2016, observa-se a evolução do deslocamento vertical variando entre 0 e -29,9mm.

No período compreendido entre 01/12/2016 e 05/12/2017 as leituras de seis marcos superficiais foram utilizadas para interpolação e análise de dados e podem ser visualizados nas Figura 109g à Figura 109k. Analisando os mapas das Figura 109g a Figura 109k observa-se uma evolução dos deslocamentos verticais na região norte da área interpolada, na Figura 109g os valores máximos de deslocamento estão em torno de -44,9mm. Vale destacar que em 10/11/2016 houve a finalização da execução das protensões das linhas de tirantes 1D e 2D, não sendo executadas as linhas 3D e 4D, indicando a eficiência da obra de estabilização. Com isso, nota-se nas Figura 109h, Figura 109i, Figura 109j e Figura 109k que os deslocamentos verticais em torno das linhas tirantes 1D e 2D executadas, ficaram estabilizados. Entretanto, continuou havendo a movimentação com valores máximos variando entre -49,9mm e -64,9mm na região mais a norte, em torno das linhas 3D e 4D, onde não foram executadas a solução de estabilização proposta pelo Projeto coordenado pelo Prof. Dr. Roberto Quental Courtinho.

Os mapas das Figura 109l, Figura 109m e Figura 109n foram elaborados utilizando a interpolação de apenas três marcos superficiais. Observa-se a deslocamentos verticais mais intensos na região norte da área interpolada, com valores máximos variando entre -60mm e -80mm, com dados obtidos no período entre 19/07/2018 e 28/08/2019. A variação na quantidade de dados de leituras interpoladas pode interferir no resultado final dos deslocamentos.

Figura 109 – Evolução temporal e espacial do deslocamento vertical do Aterro 2.

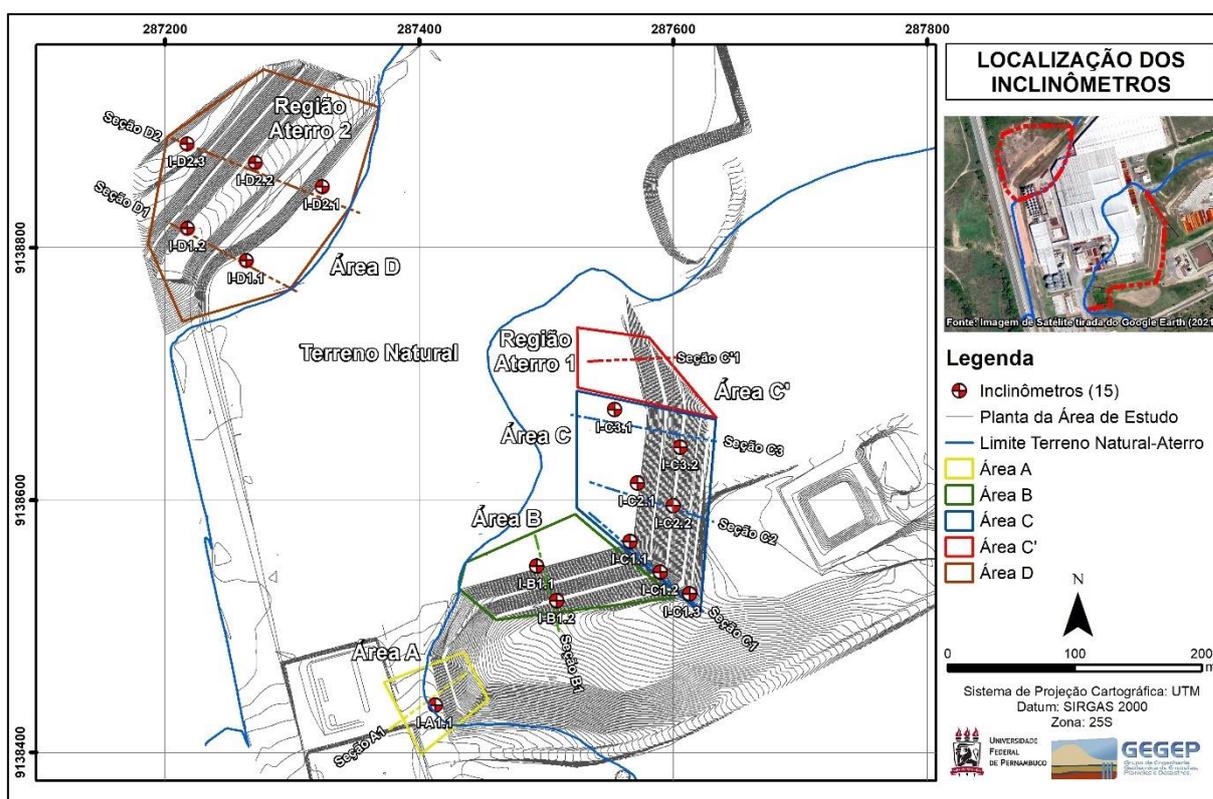


Fonte: O Autor (2022).

8.2.5 Dados dos inclinômetros

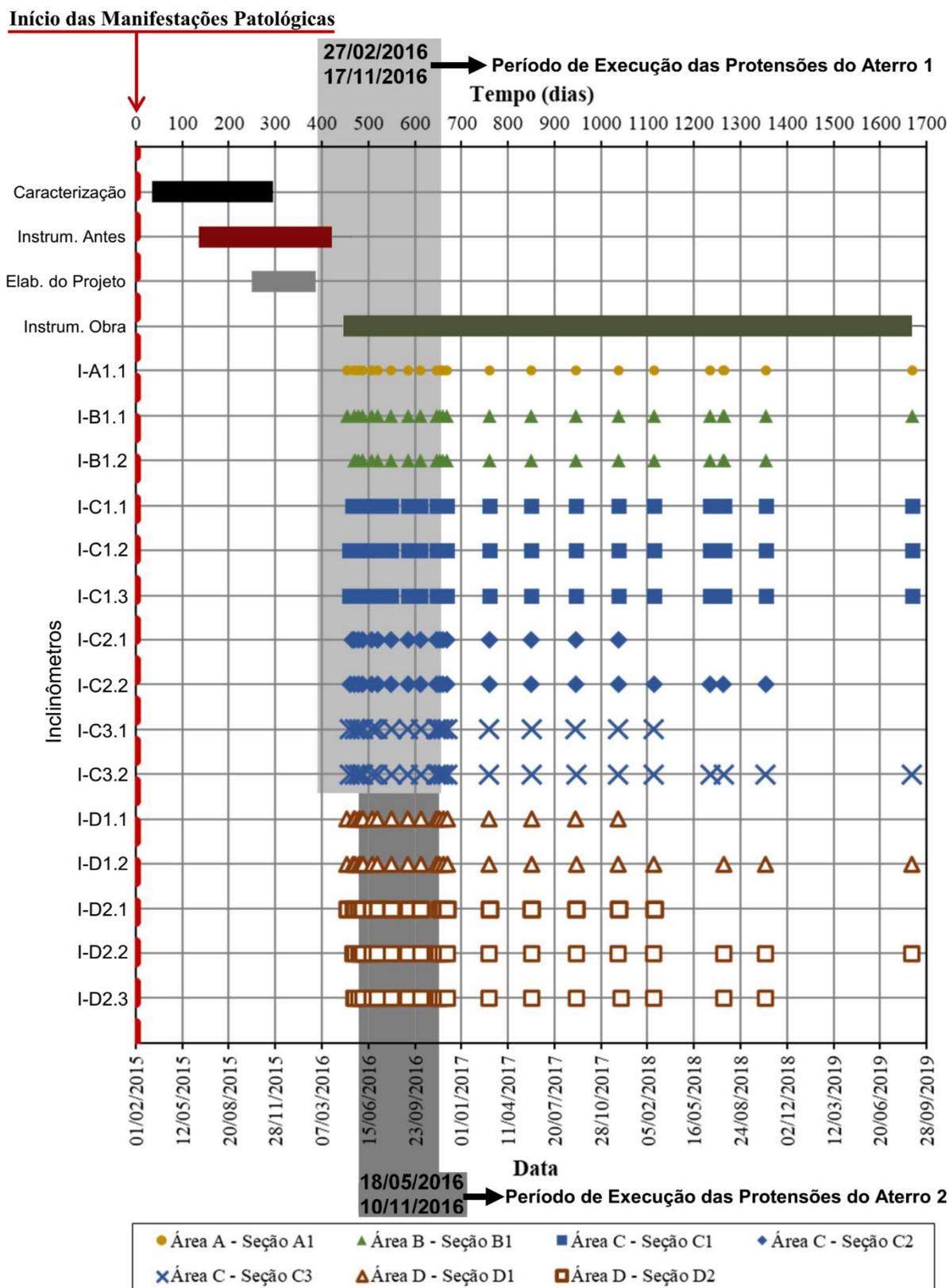
Nesta seção estão apresentados os resultados dos deslocamentos horizontais em profundidade medidos por meio dos 15 inclinômetros (I) instalados na obra (Figura 110). As datas de leituras dos inclinômetros instalados na obra estão indicadas na Figura 111 de forma síntese, de modo a permitir melhor entendimento temporal do leitor.

Figura 110 – Localização dos inclinômetros.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 111 – Indicação das leituras realizadas nos inclinômetros.



Fonte: O Autor (2022).

8.2.5.1 Análise dos deslocamentos horizontais em profundidade

A seguir estão apresentados os resultados e as discussões para as regiões dos Aterros 1 e 2 quanto aos deslocamentos horizontais em profundidade.

8.2.5.1.1 Região Aterro 1

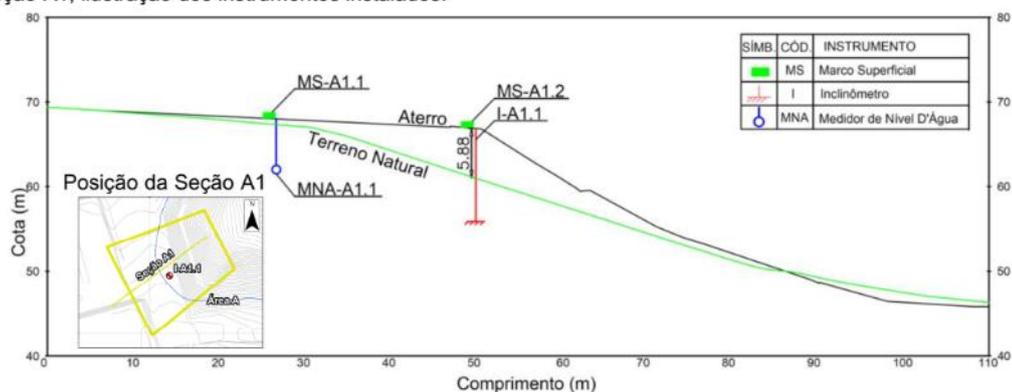
A Figura 112 apresenta os resultados obtidos nas 22 leituras realizadas para o inclinômetro I-A1.1 no período de 30/04/2016 a 28/08/2019 com intervalos entre leituras variando na ordem de 7 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 66m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 1,80mm no sentido leste e no eixo B da ordem de 5,8mm na direção norte, com vetor resultante da ordem de 6,07mm na direção nordeste. Na cota 58m (profundidade 9m) o vetor resultante é da ordem de 2,73mm e está orientado para a mesma direção do vetor da cota 66m. O contato estimado foi de 5,88m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface observou-se mudança de direção apenas no eixo A.

Na Figura 113 tem-se os resultados obtidos nas 22 leituras realizadas para o inclinômetro I-B1.1 no período de 30/04/2016 a 28/08/2019 com intervalos entre leituras variando na ordem de 7 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 62m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 8,00mm no sentido sul e no eixo B da ordem de 17,00mm na direção leste, com vetor resultante da ordem de 18,79mm na direção sudeste. Na cota 54m (profundidade 9m) o vetor resultante é da ordem de 14,85mm e está orientado para a mesma direção do vetor da cota 62m. O contato estimado foi de 17,64m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface observou-se mudança de direção apenas no eixo B entre as profundidades de 16-18m.

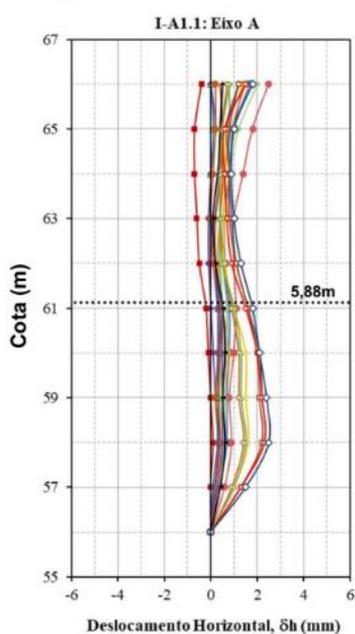
A Figura 114 apresenta os resultados obtidos nas 21 leituras realizadas para o inclinômetro I-B1.2 no período de 16/05/2016 a 17/10/2018 com intervalos entre leituras variando na ordem de 7 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 46m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 7,20mm no sentido sul e no eixo B da ordem de 7,80mm na direção leste, com vetor resultante da ordem de 10,62mm na direção sudeste. Na cota 43m (profundidade 4m) o vetor resultante é da ordem de 10,65mm e está orientado para a mesma direção do vetor da cota 46m. O contato estimado foi de 8,24m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface observou-se mudança de direção apenas no eixo B nessa mesma profundidade.

Figura 112 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro A1.1.

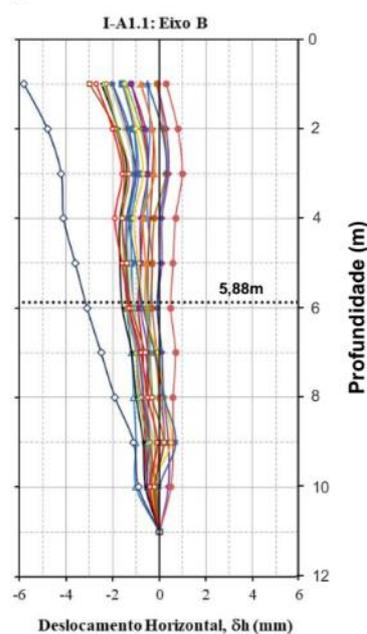
(a) Seção A1, ilustração dos instrumentos instalados.



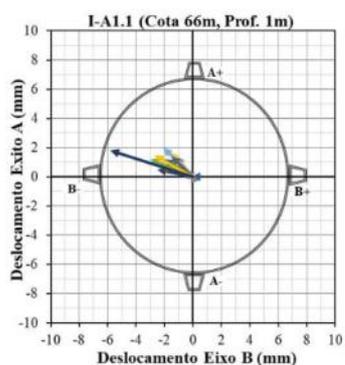
(b) Deslocamento no Eixo A



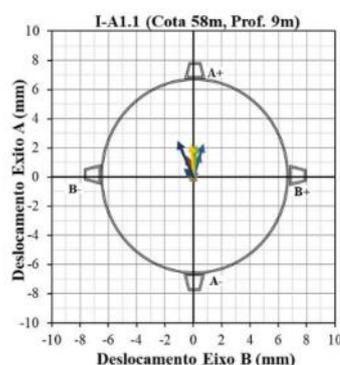
(c) Deslocamento no Eixo B



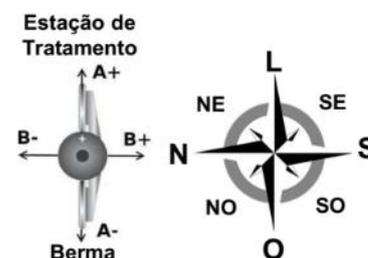
(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 66m, Prof. 1m



(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 58m, Prof. 9m



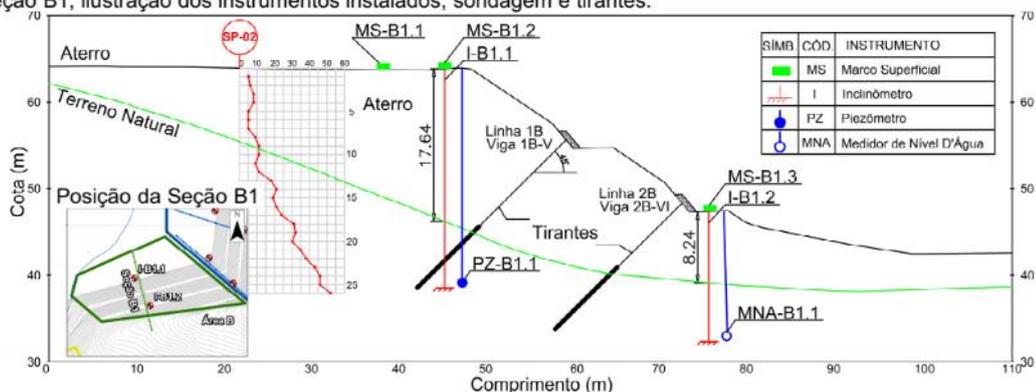
(f) Indicação da Posição Geográfica



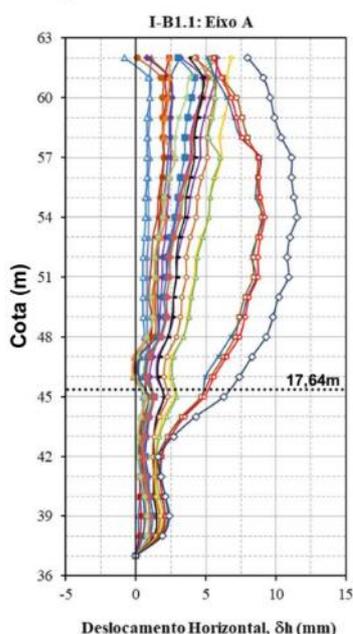
Fonte: O Autor (2022).

Figura 113 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro B1.1.

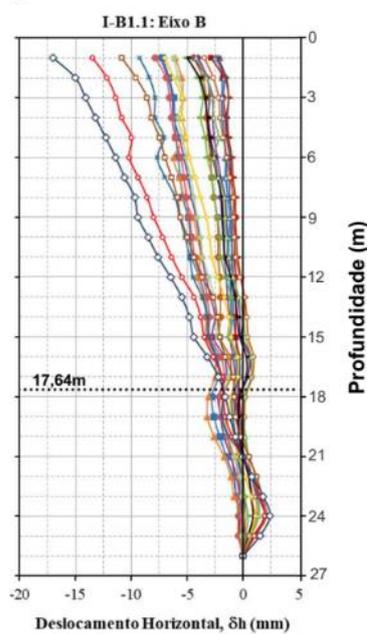
(a) Seção B1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



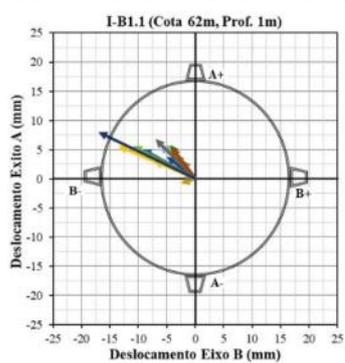
(b) Deslocamento no Eixo A



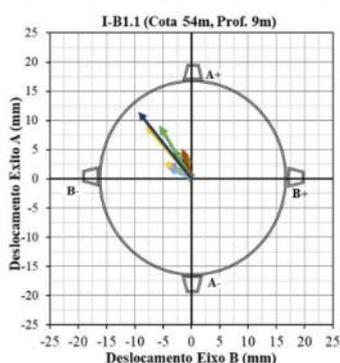
(c) Deslocamento no Eixo B



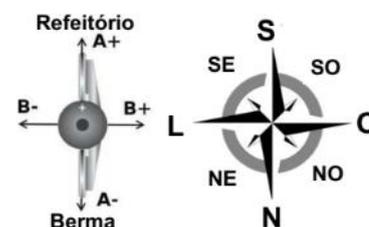
(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 62m, Prof. 1m



(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 54m, Prof. 9m



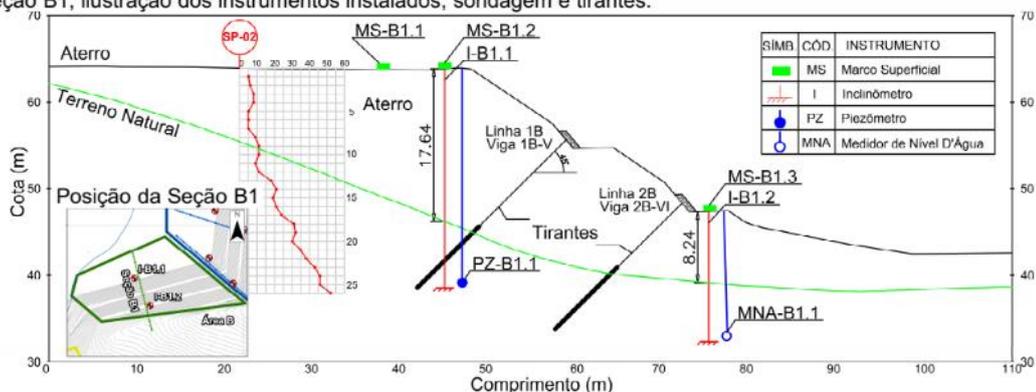
(f) Indicação da Posição Geográfica



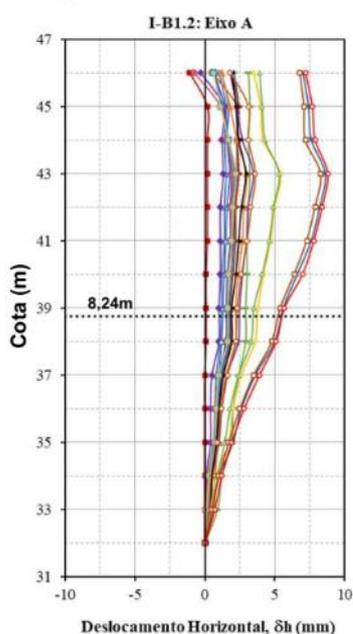
Fonte: O Autor (2022).

Figura 114 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro B1.2.

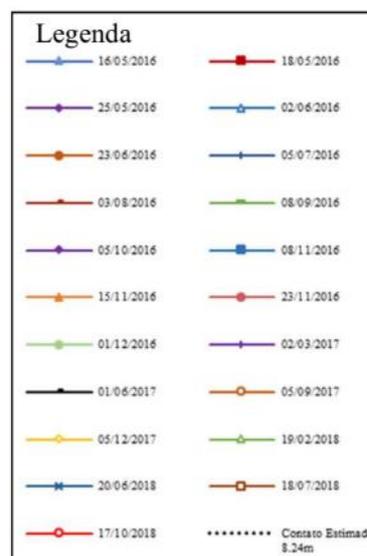
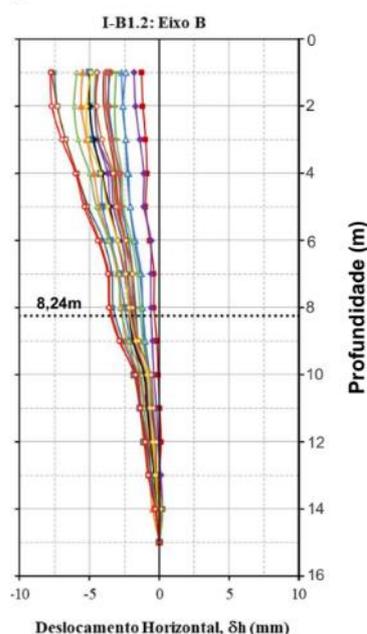
(a) Seção B1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



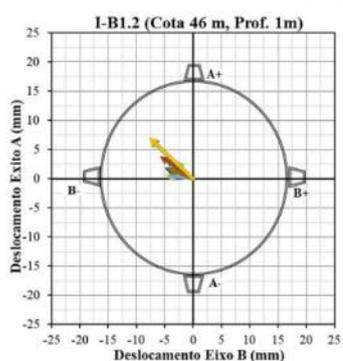
(b) Deslocamento no Eixo A



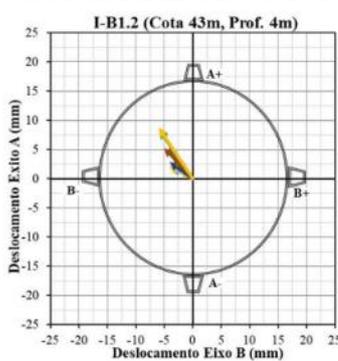
(c) Deslocamento no Eixo B



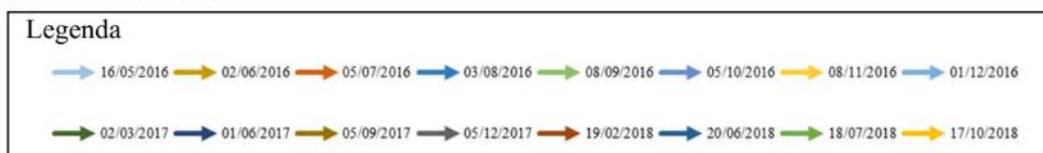
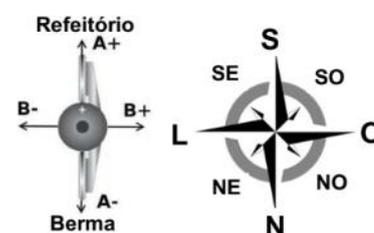
(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 46m, Prof. 1m



(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 43m, Prof. 4m



(f) Indicação da Posição Geográfica



Fonte: O Autor (2022).

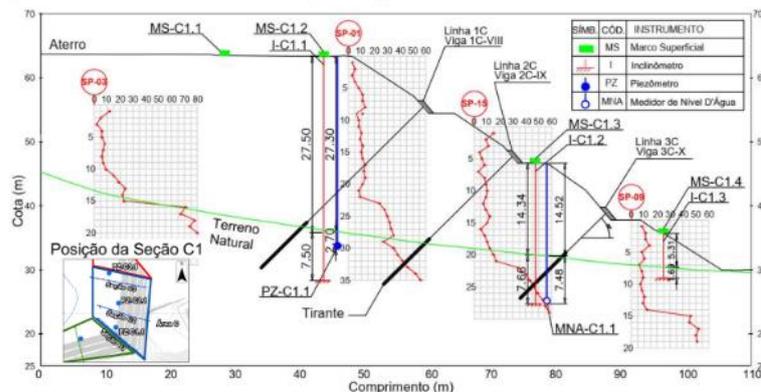
A Figura 115 apresenta os resultados obtidos nas 21 leituras realizadas para o inclinômetro I-C1.1 no período de 12/05/2016 a 28/08/2019 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 62m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 4,40mm no sentido oeste e no eixo B da ordem de 1,80mm na direção sul, com vetor resultante da ordem de 4,75mm na direção sudoeste. Na cota 41m (profundidade 22m) o vetor resultante é da ordem de 16,95mm e está orientado para a direção sudeste. O contato estimado foi de 27,50m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface observou-se mudança de direção apenas no eixo B nessa mesma profundidade na data.

A Figura 116 apresenta os resultados obtidos nas 22 leituras realizadas para o inclinômetro I-C1.2 no período de 04/05/2016 a 28/08/2019 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 46m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 14,70mm no sentido sul e no eixo B da ordem de 5,60mm na direção leste, com vetor resultante da ordem de 15,73mm na direção sudeste. Na cota 45m (profundidade 2m) o vetor resultante é da ordem de 18,44mm e está orientado para a direção sudeste. O contato estimado foi de 14,34m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface observou-se mudança de direção apenas no eixo A.

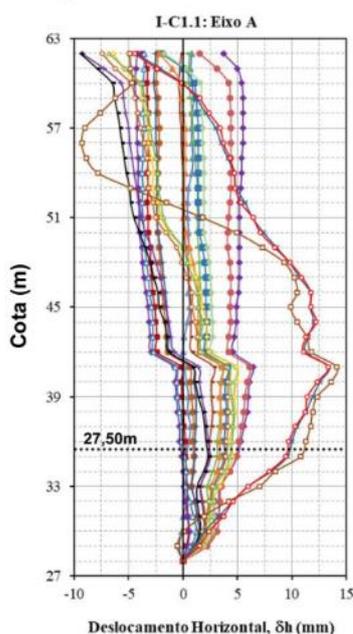
A Figura 117 apresenta os resultados obtidos nas 22 leituras realizadas para o inclinômetro I-C1.3 no período de 04/05/2016 a 28/08/2019 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 38m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 2,90mm no sentido sul e no eixo B da ordem de 1,80mm na direção oeste, com vetor resultante da ordem de 3,41mm na direção sudoeste. Na cota 37m (profundidade 2m) o vetor resultante é da ordem de 0,36mm e está orientado para a direção nordeste. O contato estimado foi de 5,31m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface não foi observada mudança de direção.

Figura 115 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C1.1.

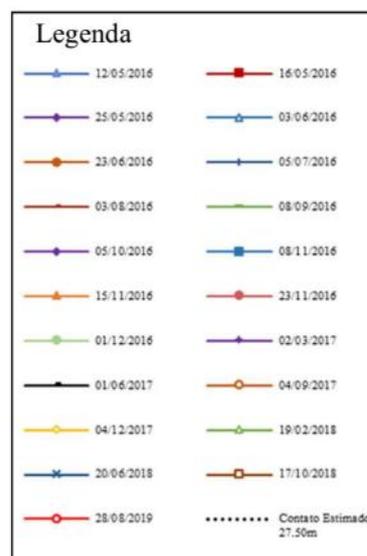
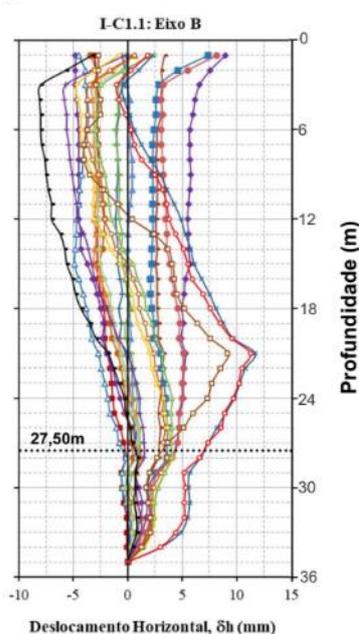
(a) Seção C1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



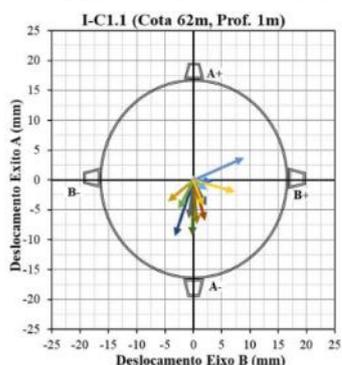
(b) Deslocamento no Eixo A



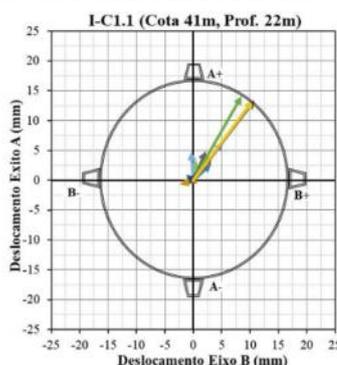
(c) Deslocamento no Eixo B



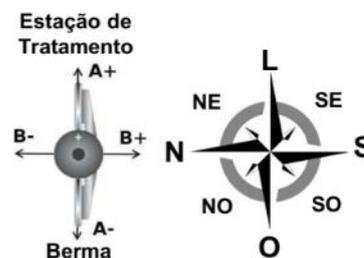
(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 62m, Prof. 1m



(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 41m, Prof. 22m



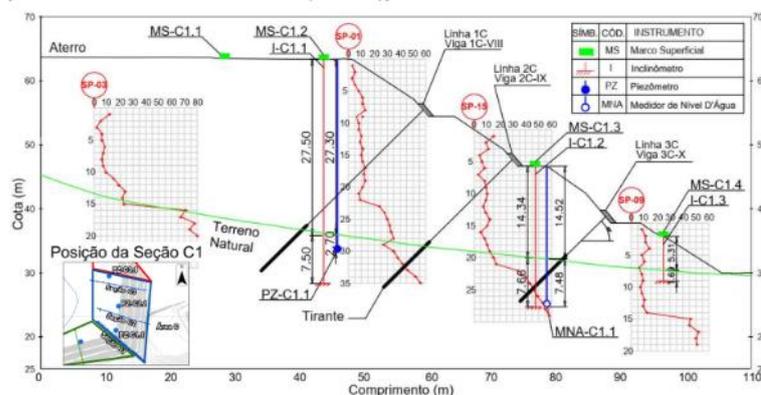
(f) Indicação da Posição Geográfica



Fonte: O Autor (2022).

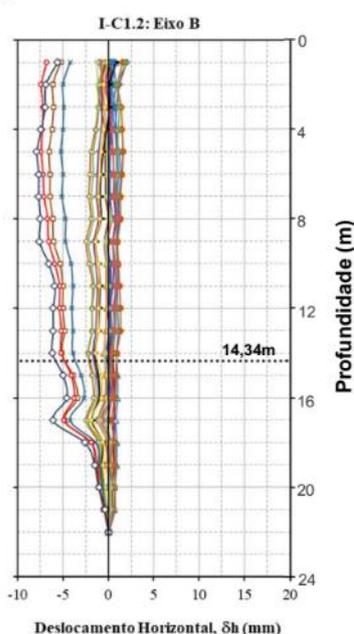
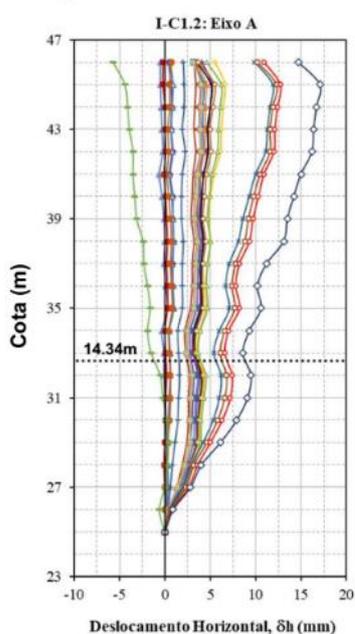
Figura 116 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C1.2.

(a) Seção C1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamento no Eixo A

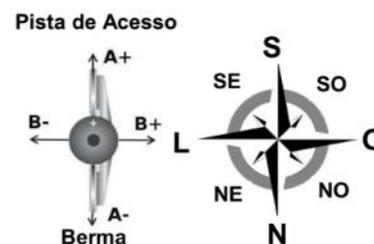
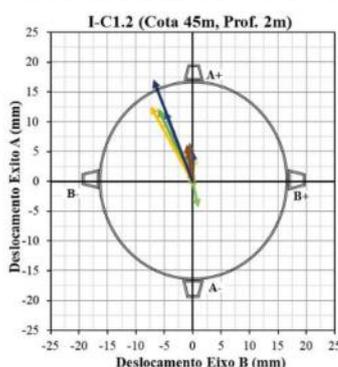
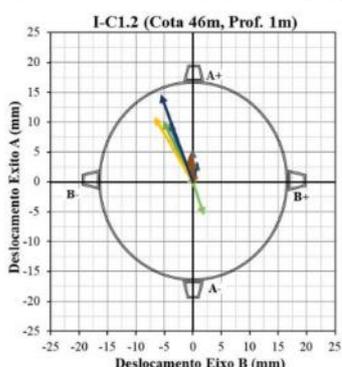
(c) Deslocamento no Eixo B



(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 46m, Prof. 1m

(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 45m, Prof. 2m

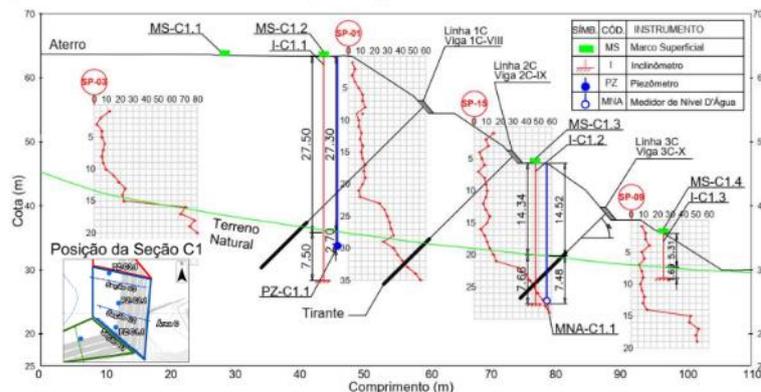
(f) Indicação da Posição Geográfica



Fonte: O Autor (2022).

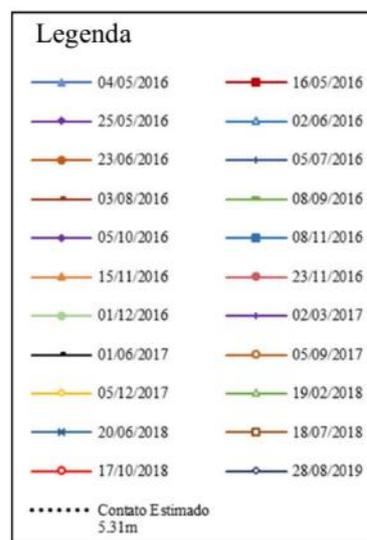
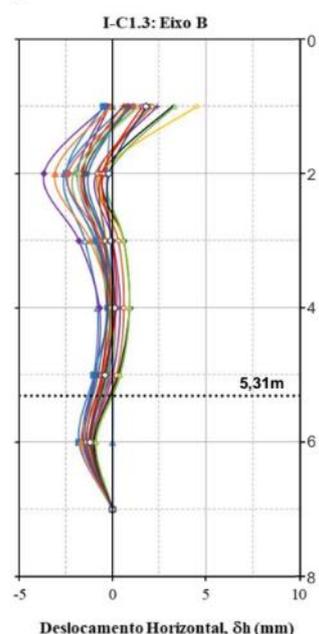
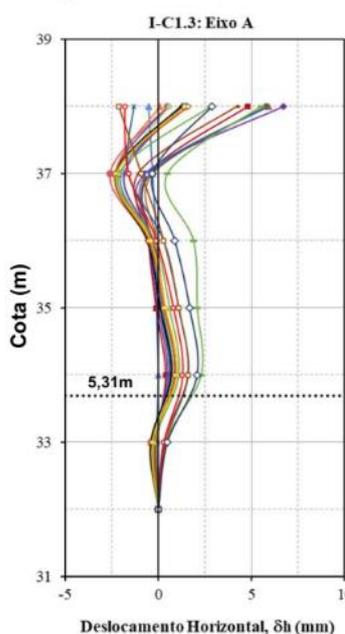
Figura 117 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C1.3.

(a) Seção C1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamento no Eixo A

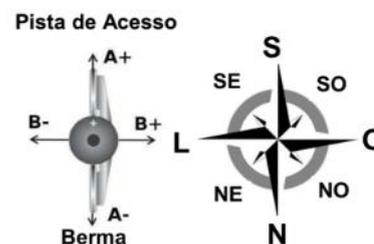
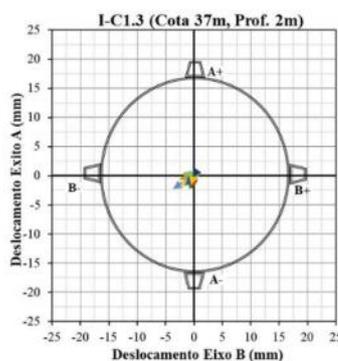
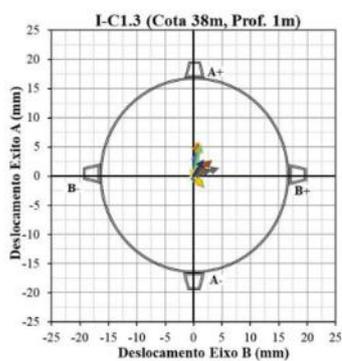
(c) Deslocamento no Eixo B



(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 38m, Prof. 1m

(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 37m, Prof. 2m

(f) Indicação da Posição Geográfica



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 118 apresenta os resultados obtidos nas 17 leituras realizadas para o inclinômetro I-C2.1 no período de 12/05/2016 a 04/12/2017 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 63m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 2,40mm no sentido oeste e no eixo B da ordem de 12,00mm na direção norte, com vetor resultante da ordem de 12,24mm na direção noroeste. Na cota 62m (profundidade 2m) o vetor resultante é da ordem de 18,48mm e está orientado para a direção noroeste. O contato estimado foi de 17,78m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface foi observada mudança de direção em ambos os eixos.

A Figura 119 apresenta os resultados obtidos nas 21 leituras realizadas para o inclinômetro I-C2.2 no período de 07/05/2016 a 17/10/2018 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 46m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 3,70mm no sentido oeste e no eixo B da ordem de 3,80mm na direção sul, com vetor resultante da ordem de 5,30mm na direção sudoeste. Na cota 45m (profundidade 2m) o vetor resultante é da ordem de 5,73mm e está orientado para a direção noroeste. O contato estimado foi de 10,01m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface não foi observada mudança de direção nos eixos A e B.

A Figura 120 apresenta os resultados obtidos nas 20 leituras realizadas para o inclinômetro I-C3.1 no período de 07/05/2016 a 19/02/2018 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 62m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 11,70mm no sentido oeste e no eixo B da ordem de 10,30mm na direção norte, com vetor resultante da ordem de 15,59mm na direção noroeste. Na cota 61m (profundidade 2m) o vetor resultante é da ordem de 15,73mm e está orientado para a direção noroeste. O contato estimado foi de 23,15m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface não foi observada mudança de direção nos eixos A e B.

A Figura 121 apresenta os resultados obtidos nas 22 leituras realizadas para o inclinômetro I-C3.2 no período de 07/05/2016 a 28/08/2019 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 46m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 3,10mm no sentido oeste e no eixo B da ordem de 6,00mm na direção norte, com vetor resultante da ordem de 6,75mm na direção noroeste. Na cota 34m (profundidade 13m)

o vetor resultante é da ordem de 5,24mm e está orientado para a direção noroeste. O contato estimado foi de 9,83m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface não foi observada mudança de direção nos eixos A e B.

A Tabela 31 apresenta o resumo do deslocamento horizontal resultante para profundidade mais superficial (1m) dos inclinômetros do Aterro 1. Com base nesses dados, é possível observar o maior deslocamento em superfície foi registrado no I-B1.1, na cota 62m, profundidade 1m, com 18,79 mm, e orientação para Sudeste. Em relação a orientação desses deslocamentos mais próximos da superfície, 3 deles foram orientados para noroeste, 3 para sudeste, 3 para sudoeste e 1 para nordeste.

Tabela 31 – Resumo dos resultados de deslocamento horizontal resultante para profundidade mais superficial (1m) dos inclinômetros do Aterro 1.

Inclinômetro	Prof. do contato estimado (m)	Cota / Prof. (m)	Desl. Resultante Horizontal (mm)
I-A1.1	5,88	66 / 1	6,07 (NE)
I-B1.1	17,64	62 / 1	18,79 (SE)
I-B1.2	8,24	46 / 1	10,62 (SE)
I-C1.1	27,50	62 / 1	4,75 (SO)
I-C1.2	14,34	46 / 1	15,73 (SE)
I-C1.3	5,31	38 / 1	3,41 (SO)
I-C2.1	17,78	63 / 1	12,24 (NO)
I-C2.2	10,01	46 / 1	5,30 (SO)
I-C3.1	23,15	62 / 1	15,59 (NO)
I-C3.2	9,83	46 / 1	6,75 (NO)

Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 32 apresenta o resumo do deslocamento horizontal resultante para profundidade com maior intensidade dos inclinômetros do Aterro 1. Com base nesses dados, é possível observar os maiores deslocamento horizontais resultante foram registrados no I-C1.2 (cota 45m, profundidade 2m) e I-C2.1 (cota 62m, profundidade 2m), com respectivamente, 18,44mm (no sentido sudeste) e 18,48mm (no sentido noroeste). Em relação a orientação desses deslocamentos com maiores intensidade, 4 deles foram orientados para noroeste, 4 para sudeste, 2 para nordeste.

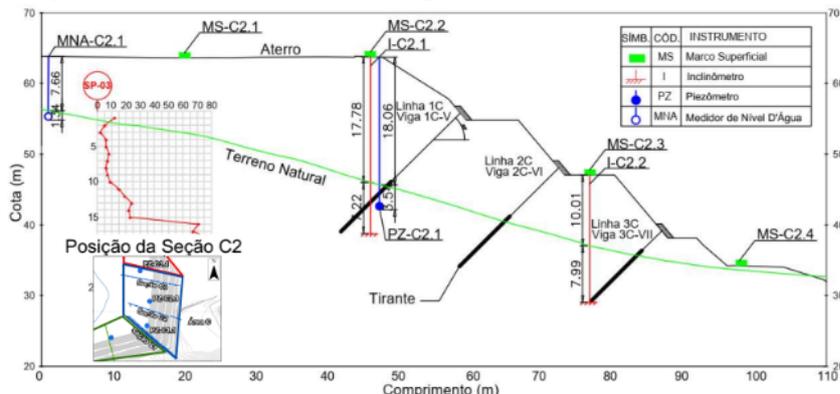
Tabela 32 – Resumo dos resultados de deslocamento horizontal resultante para profundidade com maior intensidade dos inclinômetros do Aterro 1.

Inclinômetro	Prof. do contato estimado (m)	Cota / Prof. (m)	Desl. Resultante Horizontal (mm)
I-A1.1	5,88	58 / 9	2,73 (NE)
I-B1.1	17,64	54 / 9	14,85 (SE)
I-B1.2	8,24	43 / 4	10,65 (SE)
I-C1.1	27,50	41 / 22	16,95 (SE)
I-C1.2	14,34	45 / 2	18,44 (SE)
I-C1.3	5,31	37 / 2	0,36 (NE)
I-C2.1	17,78	62 / 2	18,48 (NO)
I-C2.2	10,01	45 / 2	5,73 (NO)
I-C3.1	23,15	61 / 2	15,73 (NO)
I-C3.2	9,83	34 / 13	5,24 (NO)

Fonte: O Autor (2022).

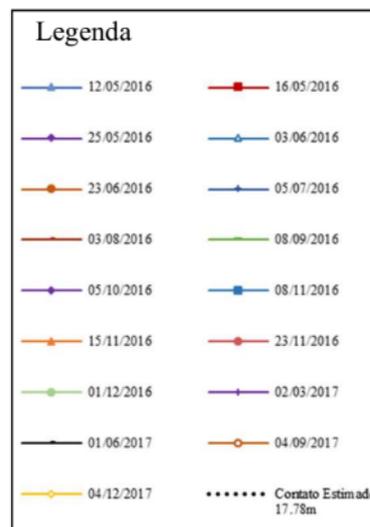
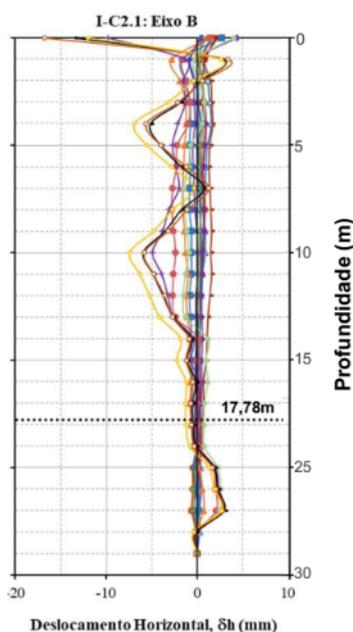
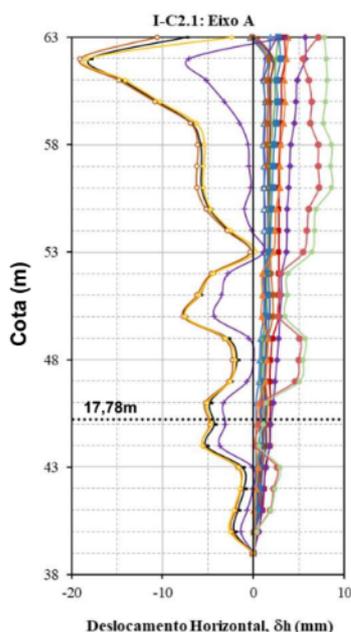
Figura 118 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C2.1.

(a) Seção C2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



(b) Deslocamento no Eixo A

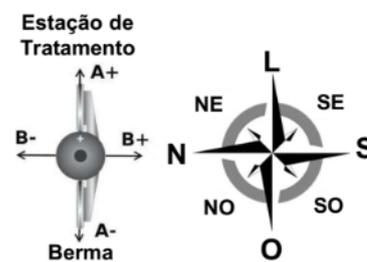
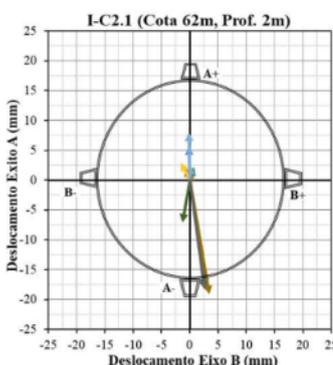
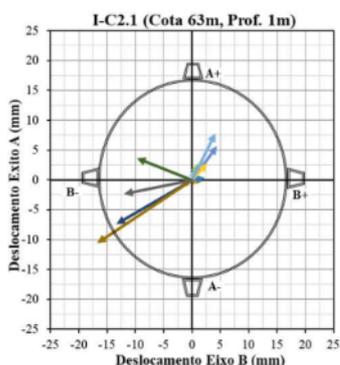
(c) Deslocamento no Eixo B



(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 63m, Prof. 1m

(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 62m, Prof. 2m

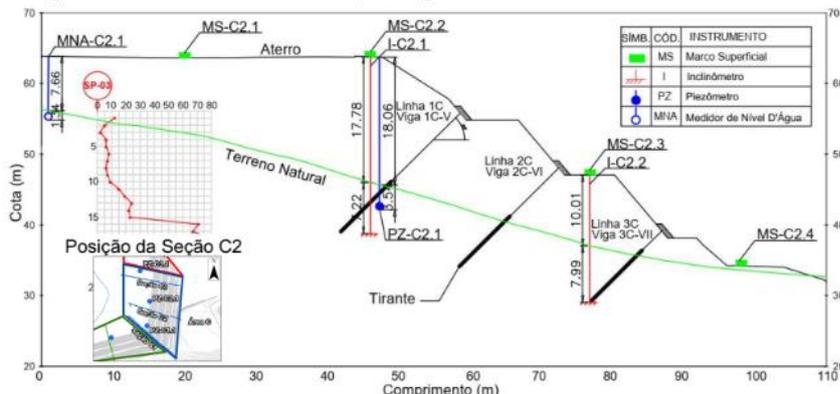
(f) Indicação da Posição Geográfica



Fonte: O Autor (2022).

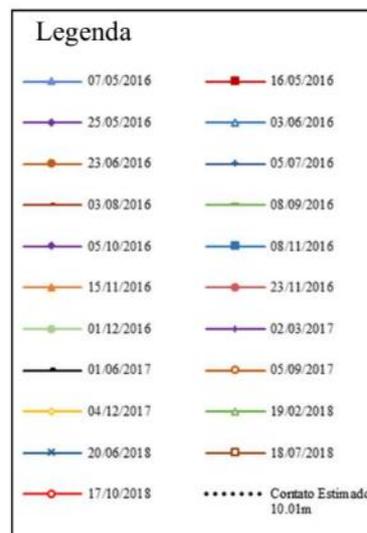
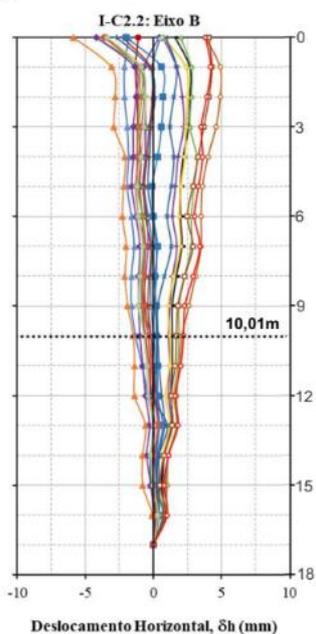
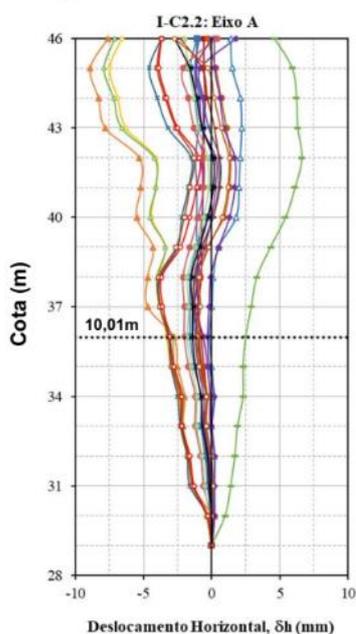
Figura 119 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C2.2.

(a) Seção C2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



(b) Deslocamento no Eixo A

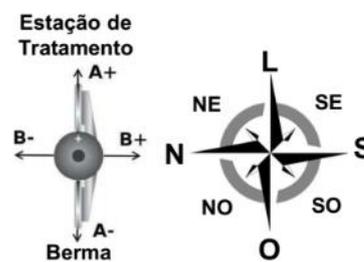
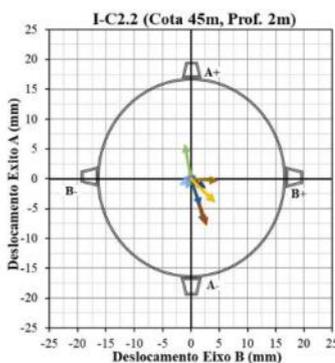
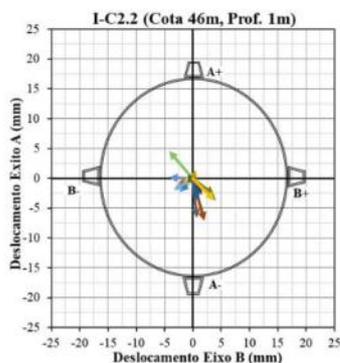
(c) Deslocamento no Eixo B



(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 46m, Prof. 1m

(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 45m, Prof. 2m

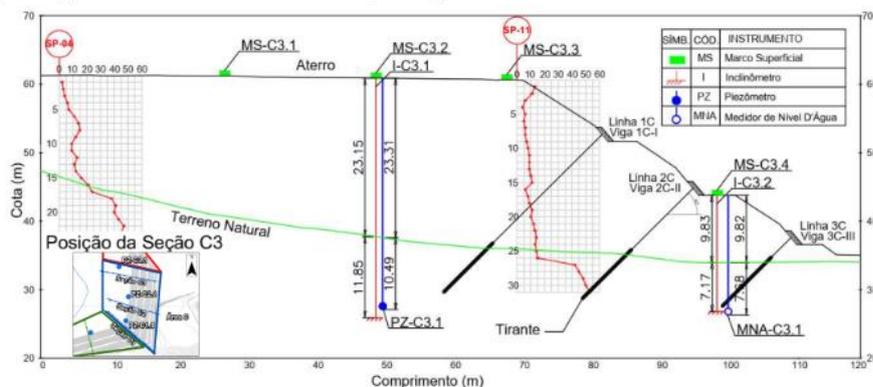
(f) Indicação da Posição Geográfica



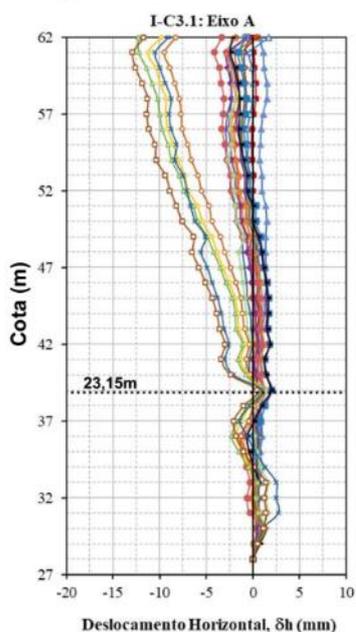
Fonte: O Autor (2022).

Figura 120 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C3.1.

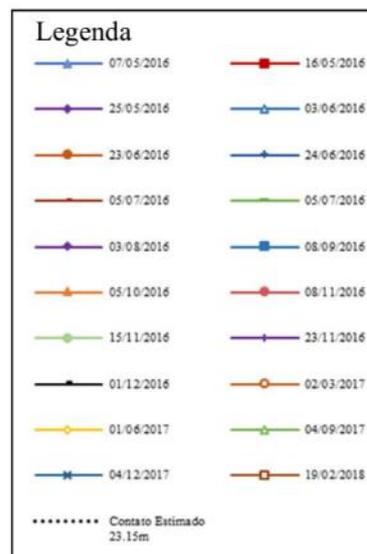
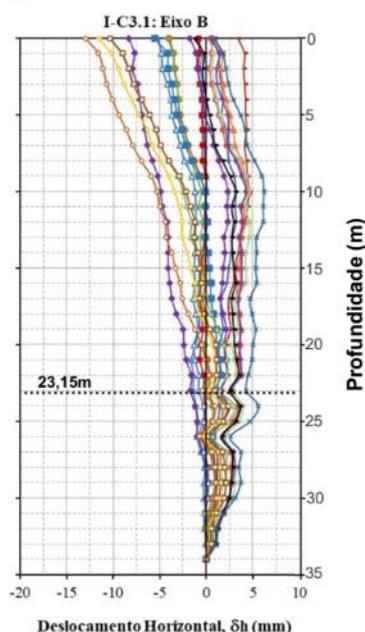
(a) Seção C3, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



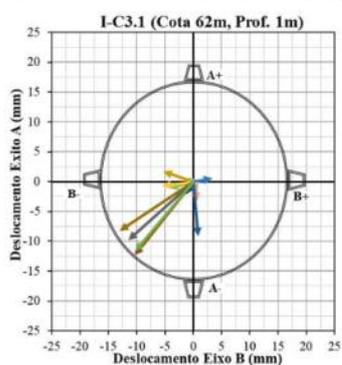
(b) Deslocamento no Eixo A



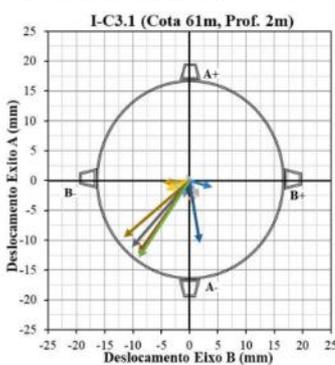
(c) Deslocamento no Eixo B



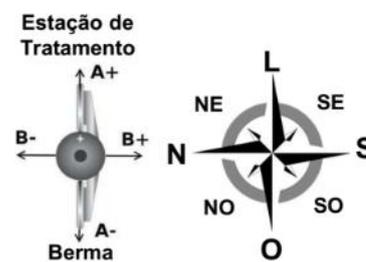
(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 62m, Prof. 1m



(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 61m, Prof. 2m



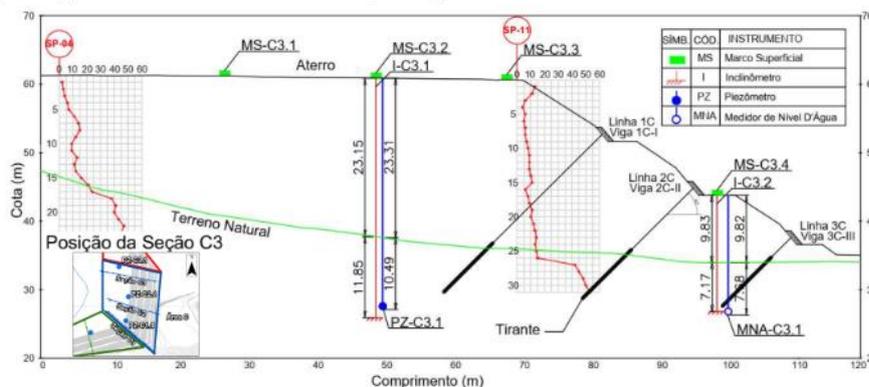
(f) Indicação da Posição Geográfica



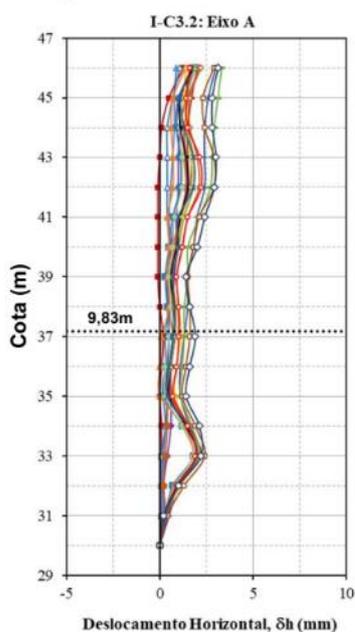
Fonte: O Autor (2022).

Figura 121 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro C3.2.

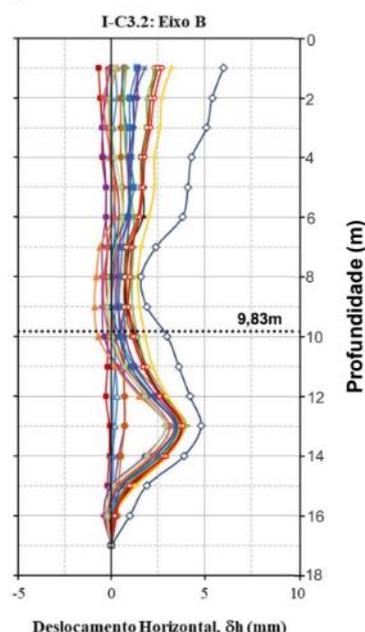
(a) Seção C3, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



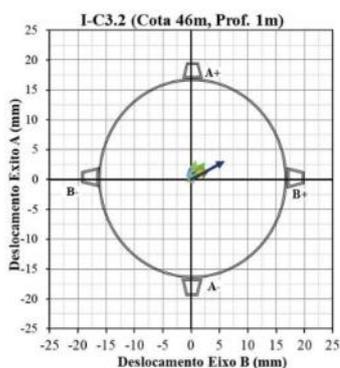
(b) Deslocamento no Eixo A



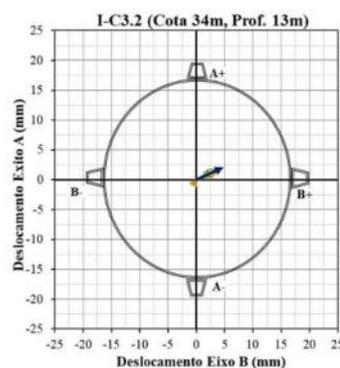
(c) Deslocamento no Eixo B



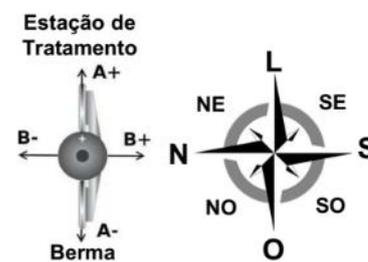
(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 46m, Prof. 1m



(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 34m, Prof. 13m



(f) Indicação da Posição Geográfica



Fonte: O Autor (2022).

8.2.5.1.2 Região Aterro 2

A Figura 122 apresenta os resultados obtidos nas 18 leituras realizadas para o inclinômetro I-D1.1 no período de 30/04/2016 a 04/12/2017 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 61m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 20,40mm no sentido noroeste e no eixo B da ordem de 2,80mm na direção nordeste, com vetor resultante da ordem de 20,59mm na direção noroeste. Na cota 44m (profundidade 19m) o vetor resultante é da ordem de 11,13mm e está orientado para a direção Oeste. O contato estimado foi de 22,60m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface não foi observada mudança de direção nos eixos A e B.

A Figura 123 apresenta os resultados obtidos nas 22 leituras realizadas para o inclinômetro I-D1.2 no período de 30/04/2016 a 28/08/2019 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 49m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 21,70mm no sentido noroeste e no eixo B da ordem de 17,90mm na direção nordeste, com vetor resultante da ordem de 28,13mm na direção norte. Na cota 38m (profundidade 12m) o vetor resultante é da ordem de 13,50mm e está orientado para a direção Norte. O contato estimado foi de 23,85m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface não foi observada mudança de direção nos eixos A e B.

A Figura 124 apresenta os resultados obtidos nas 18 leituras realizadas para o inclinômetro I-D2.1 no período de 30/04/2016 a 19/02/2018 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 63m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 20,00mm no sentido noroeste e no eixo B da ordem de 6,30mm na direção sudoeste, com vetor resultante da ordem de 20,97mm na direção oeste. Na cota 62m (profundidade 2m) o vetor resultante é da ordem de 19,56mm e está orientado para a direção Oeste. O contato estimado foi de 12,50m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface não foi observada mudança de direção nos eixos A e B.

A Figura 125 apresenta os resultados obtidos nas 18 leituras realizadas para o inclinômetro I-D2.2 no período de 13/05/2016 a 28/08/2019 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 53m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 54,00mm no sentido Oeste e no eixo B da ordem de 3,80mm na direção sudoeste, com vetor

resultante da ordem de 54,13mm na direção oeste. Na cota 51m (profundidade 3m) o vetor resultante é da ordem de 48,77mm e está orientado para a direção Oeste. O contato estimado foi de 22,60m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface não foi observada mudança de direção nos eixos A e B.

A Figura 126 apresenta os resultados obtidos nas 18 leituras realizadas para o inclinômetro I-D2.3 no período de 14/05/2016 a 17/10/2018 com intervalos entre leituras variando na ordem de 4 dias a 315 dias. É possível observar para a cota 43m (profundidade 1m), deslocamentos acumulados orientados para o eixo A de 31,20mm no sentido noroeste e no eixo B da ordem de 21,50mm na direção nordeste, com vetor resultante da ordem de 37,89mm na direção norte. Na cota 37m (profundidade 7m) o vetor resultante é da ordem de 42,75mm e está orientado para a direção norte. O contato estimado foi de 8,91m de profundidade entre o aterro e o terreno natural. E nessa interface foi observado mudança de direção em ambos os eixos.

A Tabela 33 apresenta o resumo do deslocamento horizontal resultante para profundidade mais superficial (1m) dos inclinômetros do Aterro 2. Com base nesses dados, é possível observar o maior deslocamento em superfície foi registrado no I-D2.2, na cota 53m, profundidade 1m, com 54,13 mm, e orientação para Oeste. Em relação a orientação desses deslocamentos mais próximos da superfície, 3 deles foram orientados para oeste, 2 para norte e 1 para nordeste.

Tabela 33 – Resumo dos resultados de deslocamento horizontal resultante para profundidade mais superficial (1m) dos inclinômetros do Aterro 2.

Inclinômetro	Prof. do contato estimado (m)	Cota / Prof. (m)	Desl. Resultante Horizontal (mm)
I-D1.1	22,60	61 / 1	20,59 (NO)
I-D1.2	23,85	49 / 1	28,13 (N)
I-D2.1	12,50	63 / 1	20,97 (O)
I-D2.2	22,60	53 / 1	54,13 (O)
I-D2.3	8,91	43 / 1	37,89 (N)

Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 34 apresenta o resumo do deslocamento horizontal resultante para profundidade com maior intensidade dos inclinômetros do Aterro 2. Com base nesses dados, é possível observar os maiores deslocamento horizontais resultante foram registrados no I-D2.2 (cota 51m, profundidade 3m) e I-D2.3 (cota 37m, profundidade 7m), com respectivamente, 48,77mm (no sentido oeste) e 42,75mm (no sentido norte). Em relação a orientação desses deslocamentos com maiores intensidade, 3 deles foram orientados para oeste e 2 para norte.

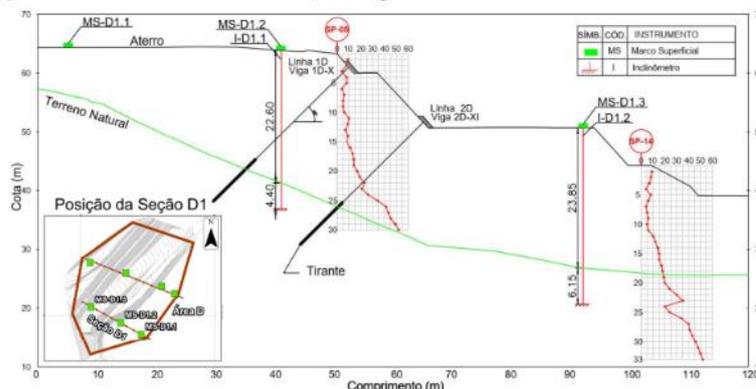
Tabela 34 – Resumo dos resultados de deslocamento horizontal resultante para profundidade com maior intensidade dos inclinômetros do Aterro 2.

Inclinômetro	Prof. do contato estimado (m)	Cota / Prof. (m)	Desl. Resultante Horizontal (mm)
I-D1.1	22,60	44 / 19	11,13 (O)
I-D1.2	23,85	38 / 12	13,50 (N)
I-D2.1	12,50	62 / 2	19,56 (O)
I-D2.2	22,60	51 / 3	48,77 (O)
I-D2.3	8,91	37 / 7	42,75 (N)

Fonte: O Autor (2022).

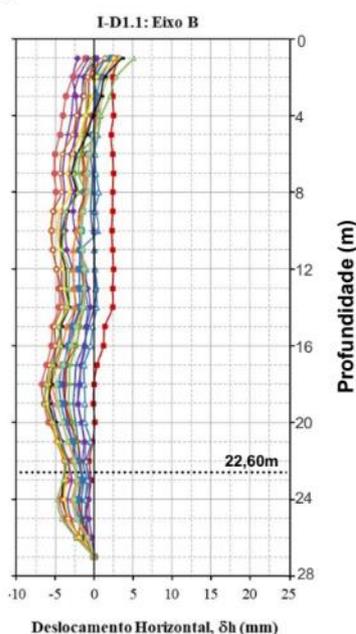
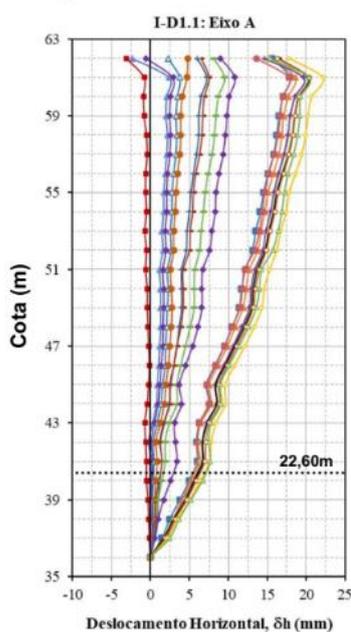
Figura 122 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro D1.1.

(a) Seção D1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamento no Eixo A

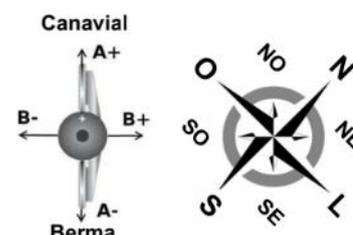
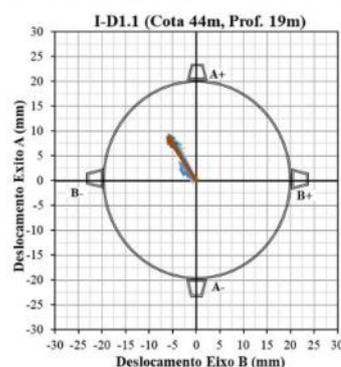
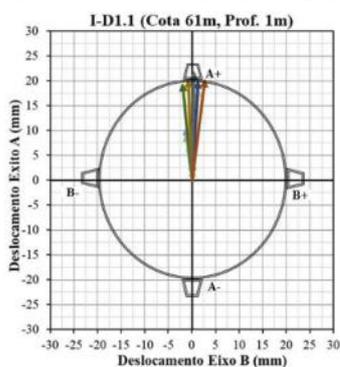
(c) Deslocamento no Eixo B



(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 61m, Prof. 1m

(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 44m, Prof. 19m

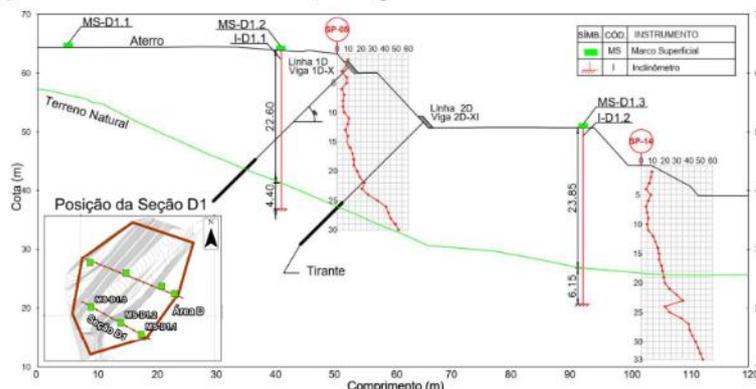
(f) Indicação da Posição Geográfica



Fonte: O Autor (2022).

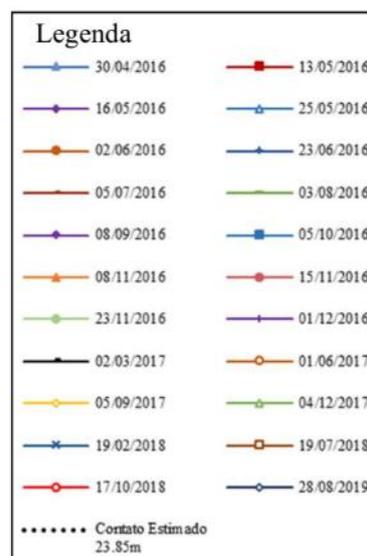
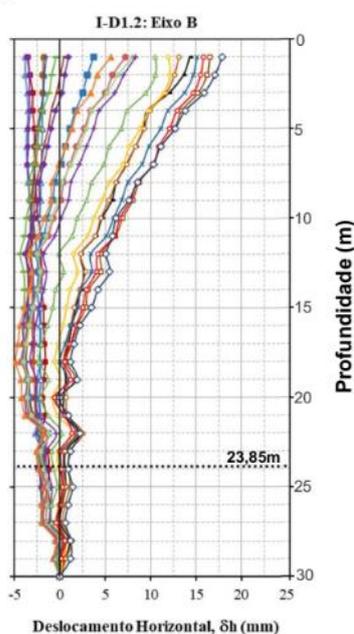
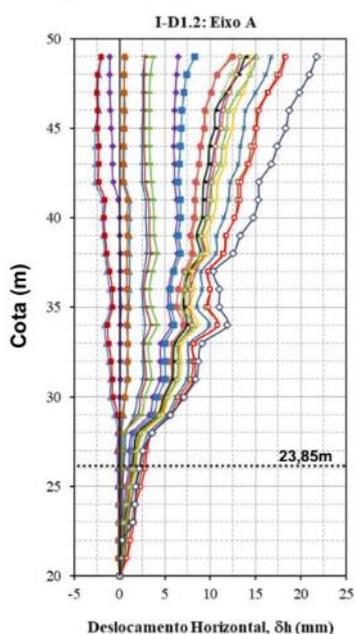
Figura 123 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro D1.2.

(a) Seção D1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamento no Eixo A

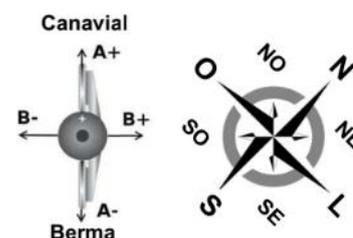
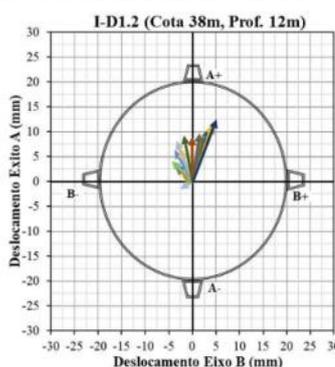
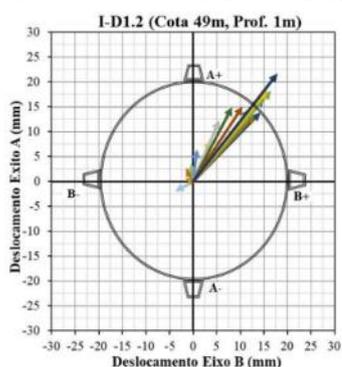
(c) Deslocamento no Eixo B



(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 49m, Prof. 1m

(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 38m, Prof. 12m

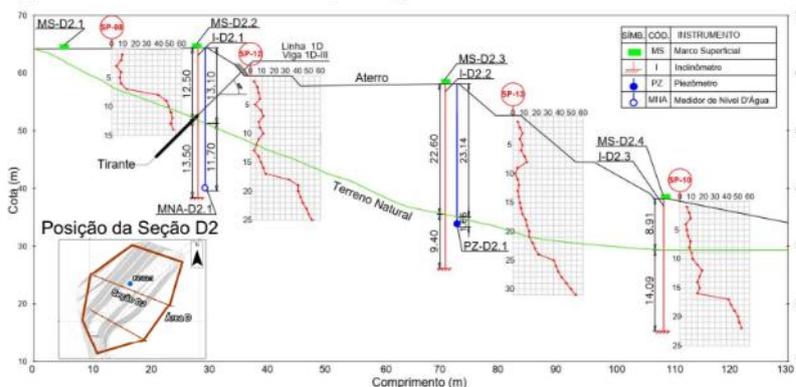
(f) Indicação da Posição Geográfica



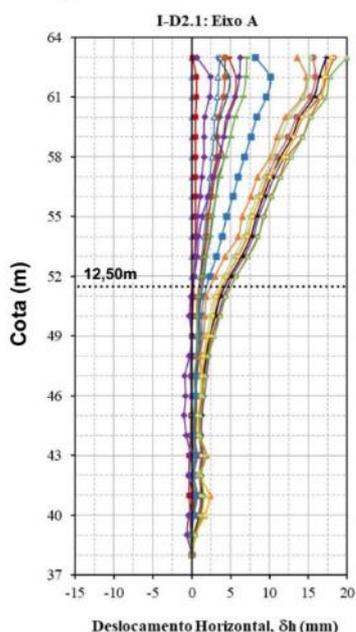
Fonte: O Autor (2022).

Figura 124 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro D2.1.

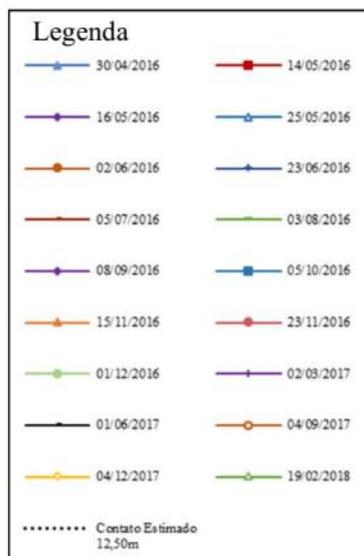
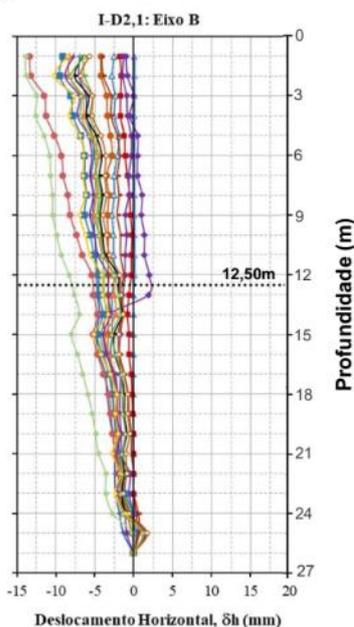
(a) Seção D2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



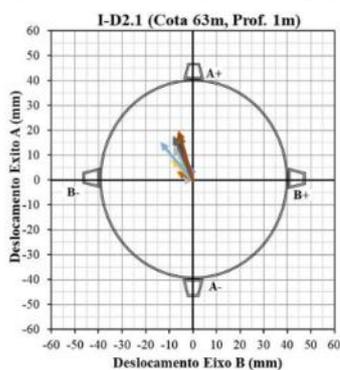
(b) Deslocamento no Eixo A



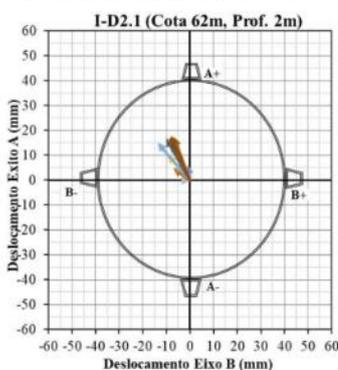
(c) Deslocamento no Eixo B



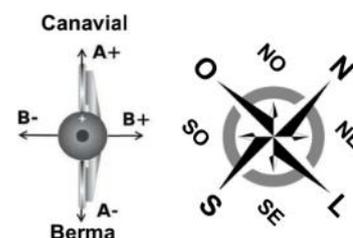
(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 63m, Prof. 1m



(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 62m, Prof. 2m



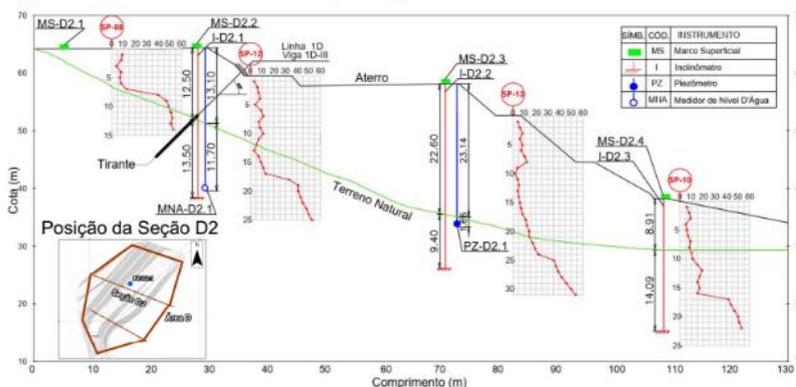
(f) Indicação da Posição Geográfica



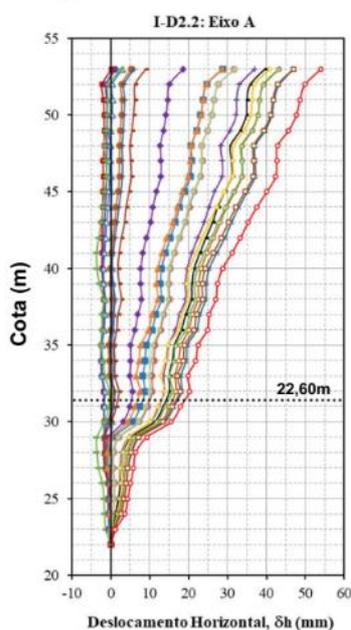
Fonte: O Autor (2022).

Figura 125 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro D2.2.

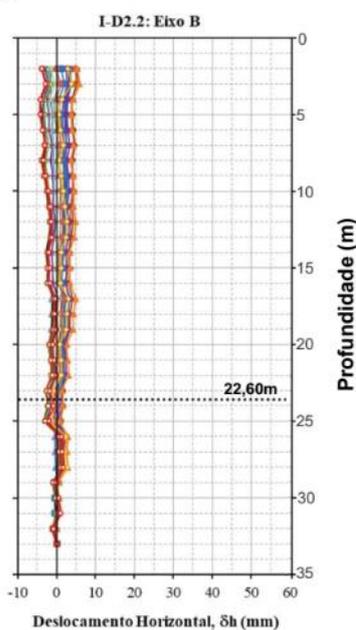
(a) Seção D2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



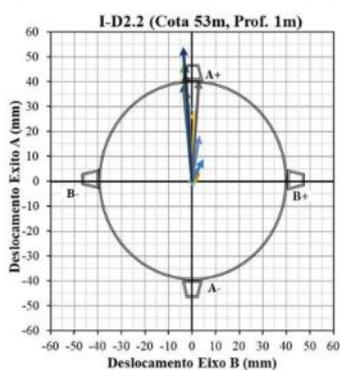
(b) Deslocamento no Eixo A



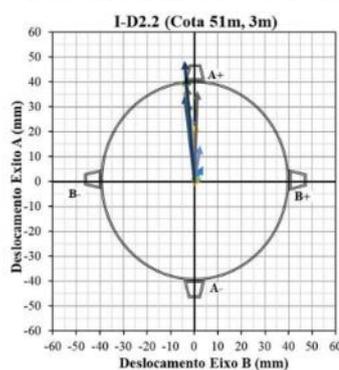
(c) Deslocamento no Eixo B



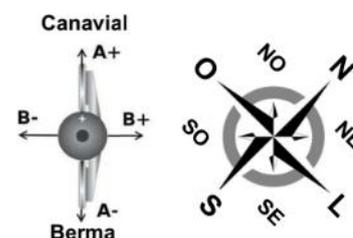
(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 53m, Prof. 1m



(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 51m, Prof. 3m



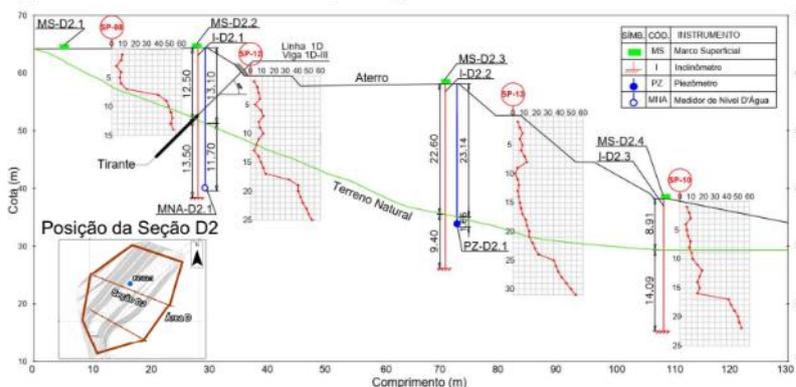
(f) Indicação da Posição Geográfica



Fonte: O Autor (2022).

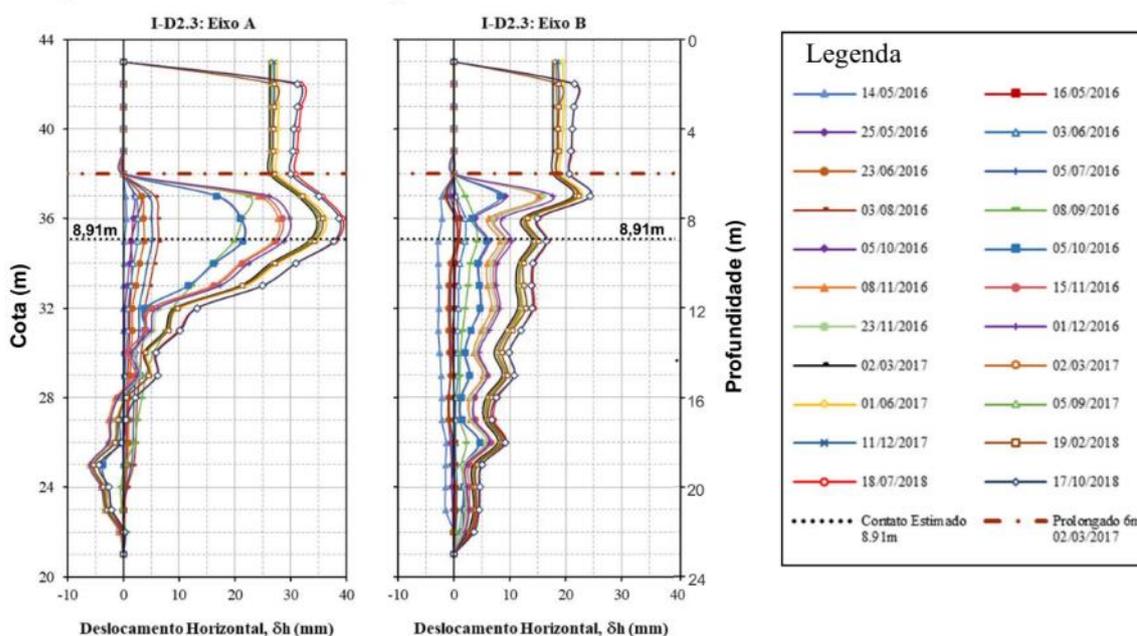
Figura 126 – Resultados dos deslocamentos horizontais do inclinômetro D2.3.

(a) Seção D2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamento no Eixo A

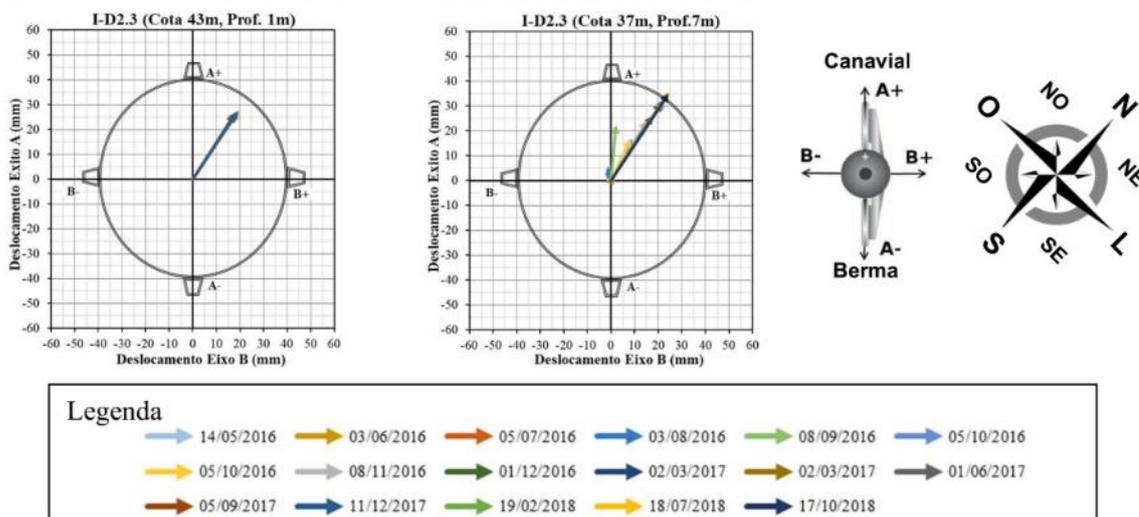
(c) Deslocamento no Eixo B



(d) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 43m, Prof. 1m

(e) Vetor Deslocamento Horizontal Resultante para Cota 37m, Prof. 7m

(f) Indicação da Posição Geográfica



Fonte: O Autor (2022).

8.2.5.2 Análise pontual do deslocamento horizontal resultante máximo ($Y_{\text{máx}}$)

A seguir estão apresentados os resultados e as discussões para as regiões dos Aterros 1 e 2 quanto análise pontual do deslocamento horizontal resultante máximo.

8.2.5.2.1 Região Aterro 1

A seção A1 está posicionada na área A, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 127a. Para esta seção não foram executadas as linhas de tirantes previstas inicialmente no projeto executivo, por essa razão a legenda da Figura 127 não indica as marcações gráficas dos períodos de execução desses elementos, como será visto nas demais figuras.

A análise dos deslocamentos (Figura 127b) evidenciam um comportamento progressivo das leituras obtida na cota 66m, que corresponde a profundidade de 1m, até a data de 01/12/2016. Após esse período percebe-se uma estabilização do movimento que oscila por volta de 2,5mm, seguido de uma tendência de crescimento a partir de 20/06/2018 até a data da última leitura atingindo 6mm.

A velocidade (Figura 127c), demonstrou um padrão de comportamento com oscilações mais intensas até 01/12/2016, que corresponde ao período de maior crescimento no deslocamento. Após esse período, percebe-se que a velocidade tem um comportamento com menores variações, e valores próximos de 0,02mm/dia, sendo possível registrar um pico (0,08 mm/dia em 19/07/2018) durante período de reativação da movimentação.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 35 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

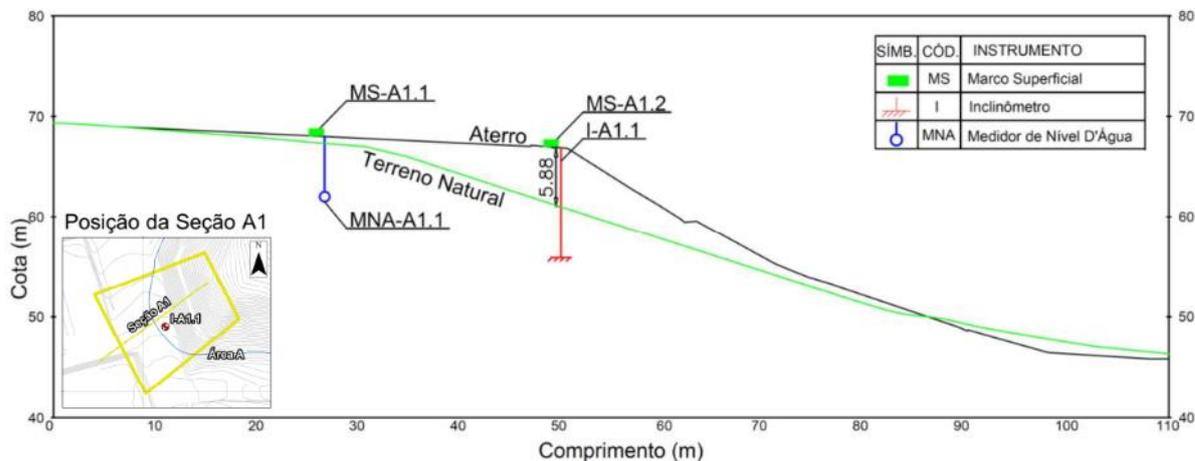
Tabela 35 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção A1.

Seção: A1	Deslocamentos (mm)
Período de análise	I-A1.1
Após a execução da protensão	23/11/2016 2,52
Início da estabilização	02/03/2017 2,33
Início da reativação do movimento	20/06/2018 2,33
Fim da reativação do movimento	28/08/2019 6,07
Leitura final	28/08/2019 6,07

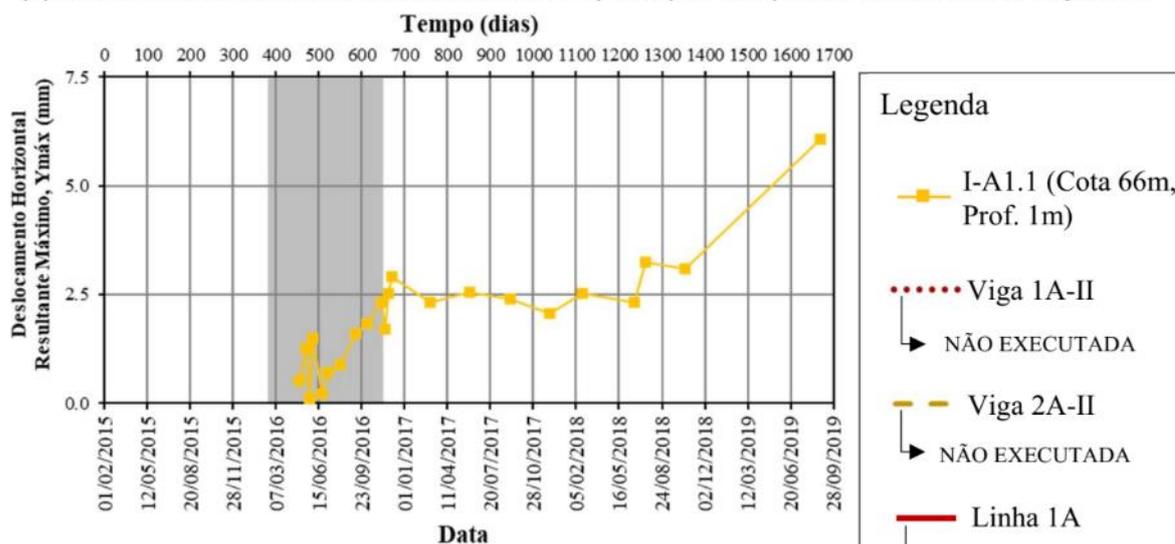
Fonte: O Autor (2022).

Figura 127 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção A1.

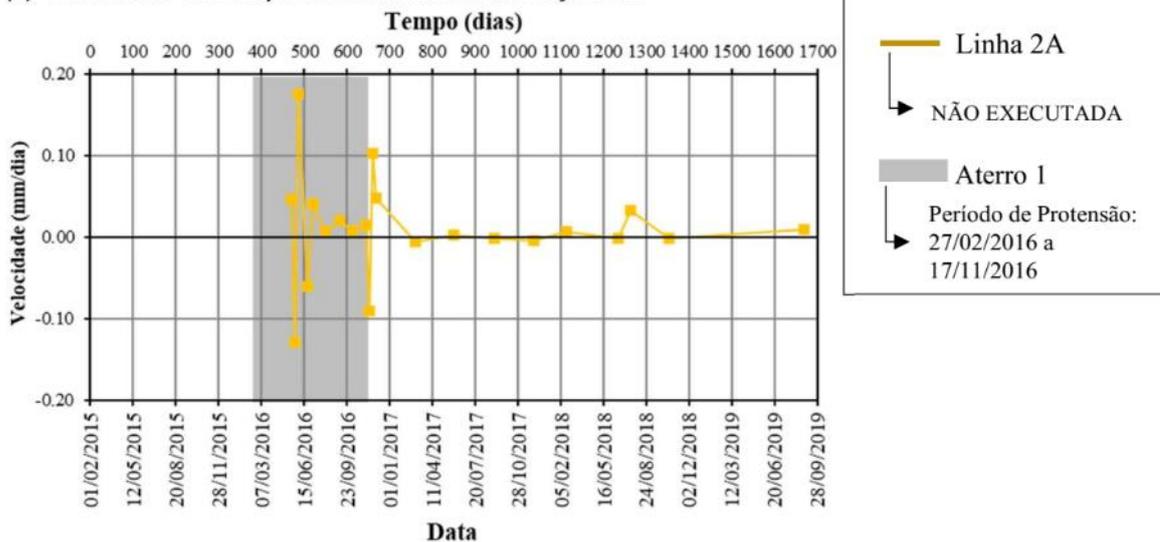
(a) Seção A1, ilustração dos instrumentos instalados.



(b) Deslocamento Horizontal Resultante Máximo (Y_{máx}) vs Tempo do inclinômetro da Seção A1.



(c) Velocidade vs Tempo do inclinômetro da Seção A1.



Fonte: O Autor (2022).

A seção B1 está posicionada na área B, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 128a. Nesta seção não foi executada a linha 3B, bem como a viga 3B-VII previstas no projeto executivo inicial. As demais linhas e vigas executadas na seção de análise são marcadas a fim de facilitar o entendimento. Nesta seção foi analisada a cota 62m (profundidade 1m) para o inclinômetro I-B1.1 e a cota 46m (profundidade 1m) no instrumento I-B1.2.

Os resultados apresentados na Figura 128b mostraram uma certa similaridade dos deslocamentos entre os instrumentos analisados, até a 03/08/2018, que corresponde com a execução da Linha 2B. A partir de 01/12/2016 foi possível observar uma aparente estabilização da movimentação no instrumento I-B1.2 até 05/09/2017. Neste período, o inclinômetro I-B1.1 apresentou oscilações sem que houvesse um padrão de estabilização. Este instrumento apresentou uma tendência de crescimento progressivo do deslocamento desde 19/02/2018 sem que se observe formação de estabilização. No tocante ao inclinômetro I-B1.2, pode-se notar que após a estabilização, entre 05/09/2017 e 20/06/2018, houve novamente evolução do deslocamento, seguido de uma redução do deslocamento, o que pode indicar uma tendência de estabilização.

O comportamento da velocidade (Figura 128c), indica o período de estabilização do deslocamento, com a presença de picos no início, entre 08/09/2016 e 02/03/2017. Ao longo da série são observados pequenos picos para o inclinômetro I-B1.1, o qual não se observou uma tendência de estabilização muito clara no deslocamento, de modo que a velocidade atinge -0,04mm/dia em seu maior pico, identificado na fase de crescimento progressivo do deslocamento.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 36 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

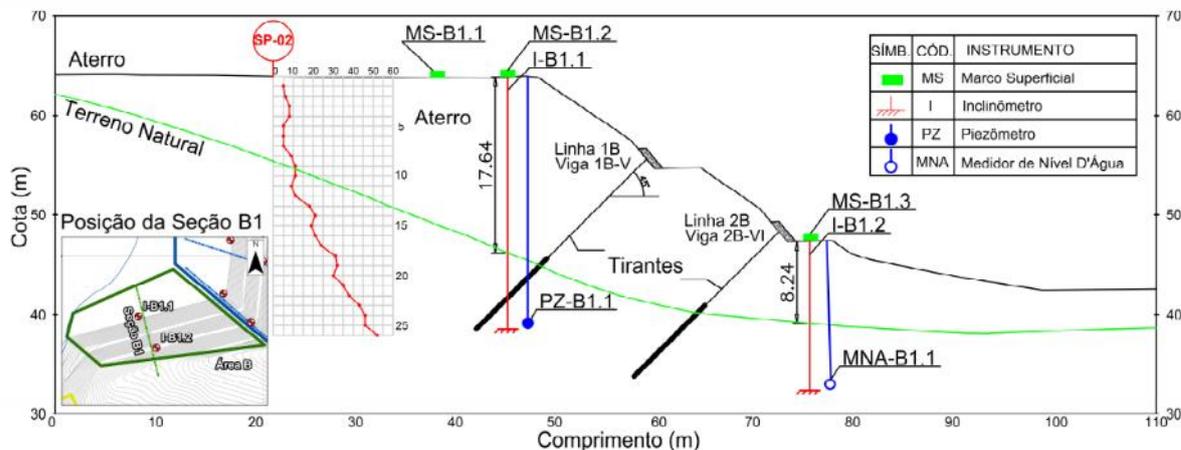
Tabela 36 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção B1.

Seção: B1 Período de análise	Deslocamentos (mm)	
	I-B1.1	I-B1.2
Após a execução da protensão	23/11/2016 8,99	23/11/2016 3,88
Início da estabilização	-	01/12/2016 4,64
Início da reativação do movimento	19/02/2018 6,76	05/09/2017 4,85
Fim da reativação do movimento	-	20/06/2018 10,26
Leitura final	28/08/2019 18,79	17/10/2018 10,62

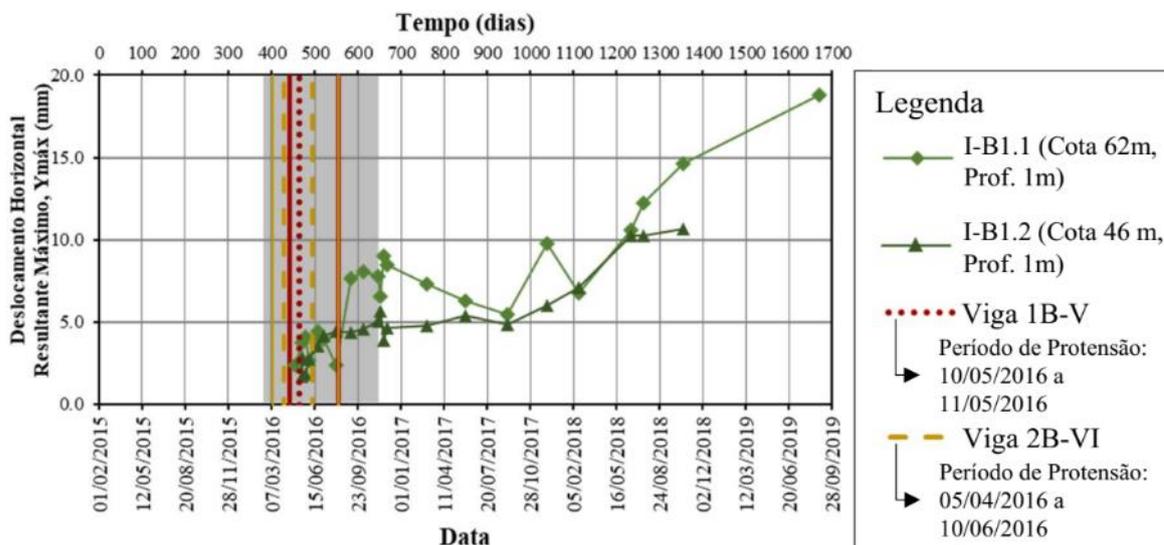
Fonte: O Autor (2022).

Figura 128 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção B1.

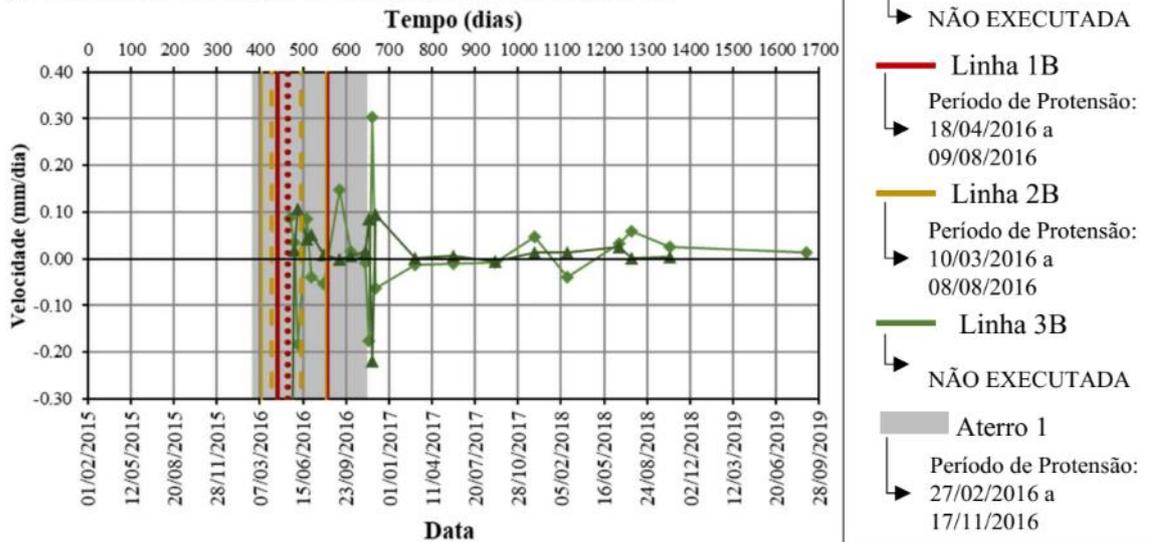
(a) Seção B1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



(b) Deslocamento Horizontal Resultante Máximo (Y_{máx}) vs Tempo dos inclinômetros da Seção B1.



(c) Velocidade vs Tempo dos inclinômetros da Seção B1.



Fonte: O Autor (2022).

A seção C1 está posicionada na área C cuja representação esquemática é mostrada na Figura 129a. Nesta seção foram executadas todas as linhas de tirantes previstas inicialmente no projeto executivo, havendo sido analisados os instrumentos com a profundidade de 1m.

Os resultados de deslocamento apresentados na Figura 129b mostraram que os instrumentos demonstram comportamento similar em alguns intervalos de tempo. Até que seja executada a protensão percebe-se que todos os inclinômetros tem comportamento oscilatório, com indícios de estabilização para os instrumentos I-C1.2 e I-C1.3, entre os períodos de 01/12/2016 e 19/02/2018. Após o período de estabilização o I-C1.2, foi verificado um aumento do deslocamento da ordem de 11mm até a data da última leitura. Os outros instrumentos instalados nesta seção não apresentaram comportamento similar, de modo que o inclinômetro I-C1.1 apresenta tendência de redução do movimento desde 01/06/2017 até a data da última leitura.

O gráfico da velocidade (Figura 129c), reporta um crescimento durante o período de aumento do deslocamento, com picos pontuais para I-C1.1 com valores da ordem de 0,75mm/dia registrado em 23/11/2016. Além disso, valores mais altos também são registrados no período inicial das leituras, embora sejam constatadas oscilação nas leituras. A partir de 02/03/2017 percebe-se uma estabilização na velocidade, com pequenos picos identificados para I-C1.2 no período de reativação do movimento.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 37 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

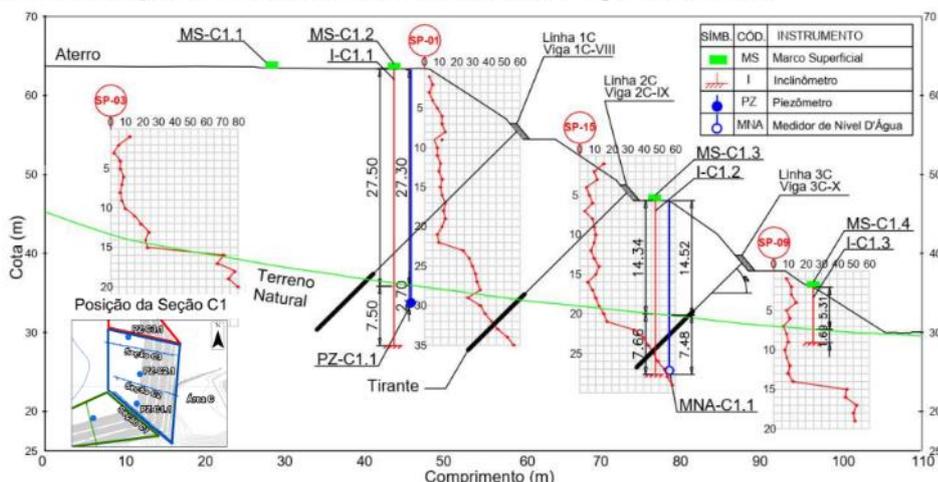
Tabela 37 - Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C1.

Seção: C1	Deslocamentos (mm)			
	Período de análise	I-C1.1	I-C1.2	I-C1.3
Após a execução da protensão	23/11/2017	23/11/2017	23/11/2017	
		8,34	3,54	1,21
Início da estabilização	-	23/11/2016	23/11/2016	
			3,54	1,21
Início da reativação do movimento	-	19/02/2018	20/06/2018	
			4,63	1,58
Fim da reativação do movimento	-	-	18/07/2018	
				2,83
Leitura final	28/08/2019	28/08/2019	28/08/2019	
		4,75	15,73	3,41

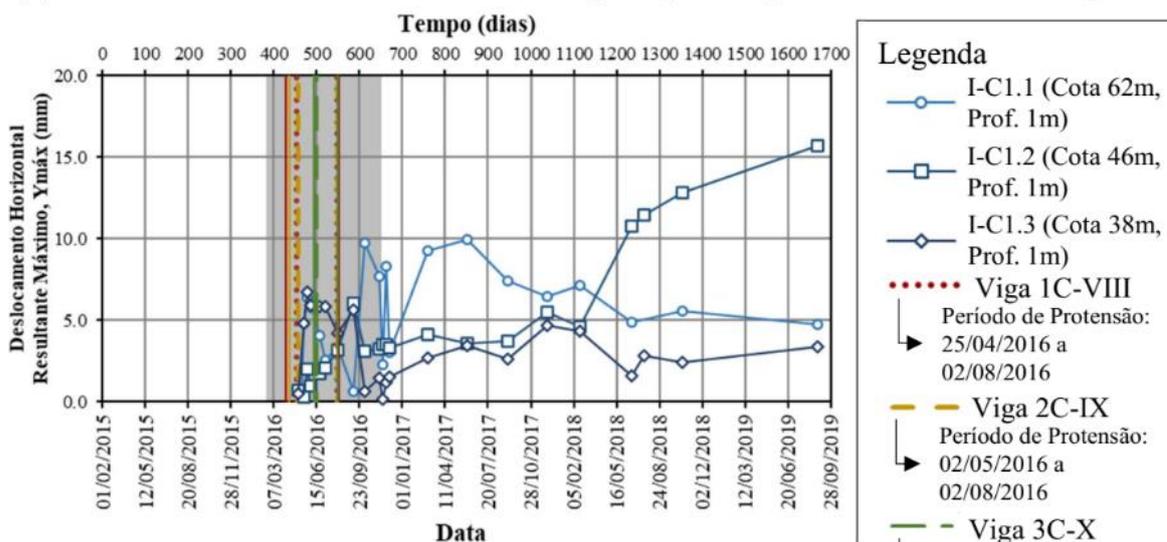
Fonte: O Autor (2022).

Figura 129 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C1.

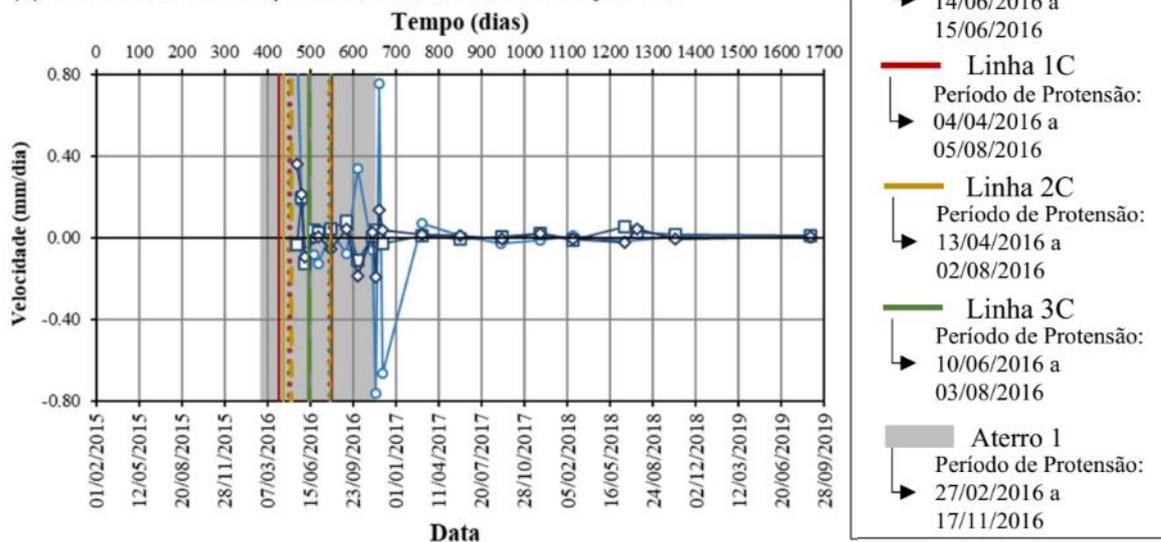
(a) Seção C1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamento Horizontal Resultante Máximo (Y_{máx}) vs Tempo dos inclinômetros da Seção C1.



(c) Velocidade vs Tempo dos inclinômetros da Seção C1.



Fonte: O Autor (2022).

A seção C2 está posicionada na área C cuja representação esquemática é mostrada na Figura 130a. Nesta seção foram executadas todas as linhas de tirantes previstas inicialmente no projeto executivo, havendo sido analisados os instrumentos com a profundidade de 1m.

Os resultados gráficos da Figura 130b mostraram um comportamento progressivo das leituras sem que se observe com clareza a forma de uma estabilização. Após o período de protensão observou-se um incremento no deslocamento para os dois instrumentos, de modo que I-C2.2 atingiu aproximadamente 20mm em 04/09/2017. O comportamento de crescimento do deslocamento também foi verificado para o I-C2.1, porém com valores menores, cujo pico foi identificado em 19/02/2018 (7,38mm). Com a sucessão de leituras, pode-se inferir que possivelmente o instrumento I-C2.1 apresentaria uma estabilização a partir de 18/07/2018, contudo não há continuidade nas leituras para que se possa afirmar.

A velocidade (Figura 130c), mostrou um comportamento oscilatório durante o período inicial, que coincidiu com a fase de execução das protensões realizadas. As velocidades passaram a pequenas oscilações com valores muito reduzidos (próximos a zero) a partir de 01/12/2016.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 38 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

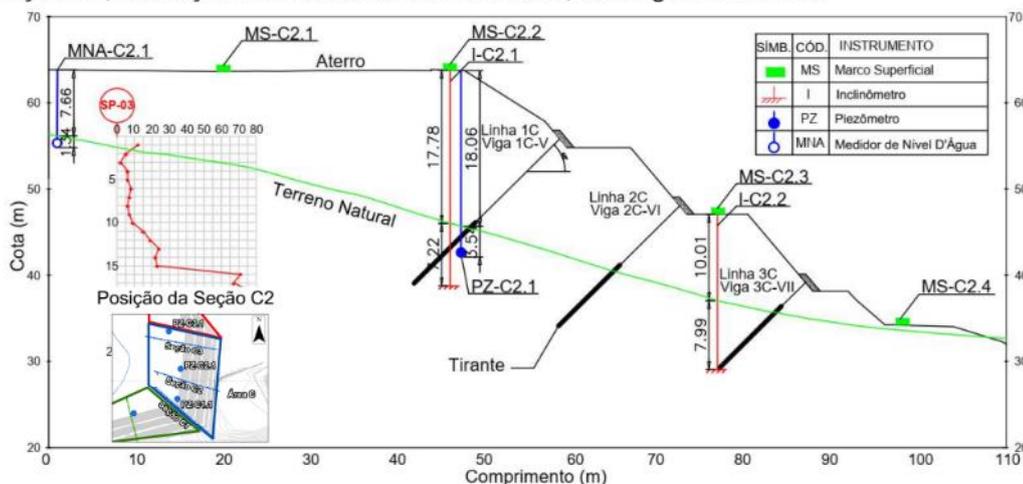
Tabela 38 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C2.

Seção: C2	Deslocamentos (mm)	
Período de análise	I-C2.1	I-C2.2
Após a execução da protensão	23/11/2016 7,22	23/11/2016 3,52
Início da estabilização	-	-
Início da reativação do movimento	-	-
Fim da reativação do movimento	-	-
Leitura final	04/12/2017 12,24	17/10/2018 5,30

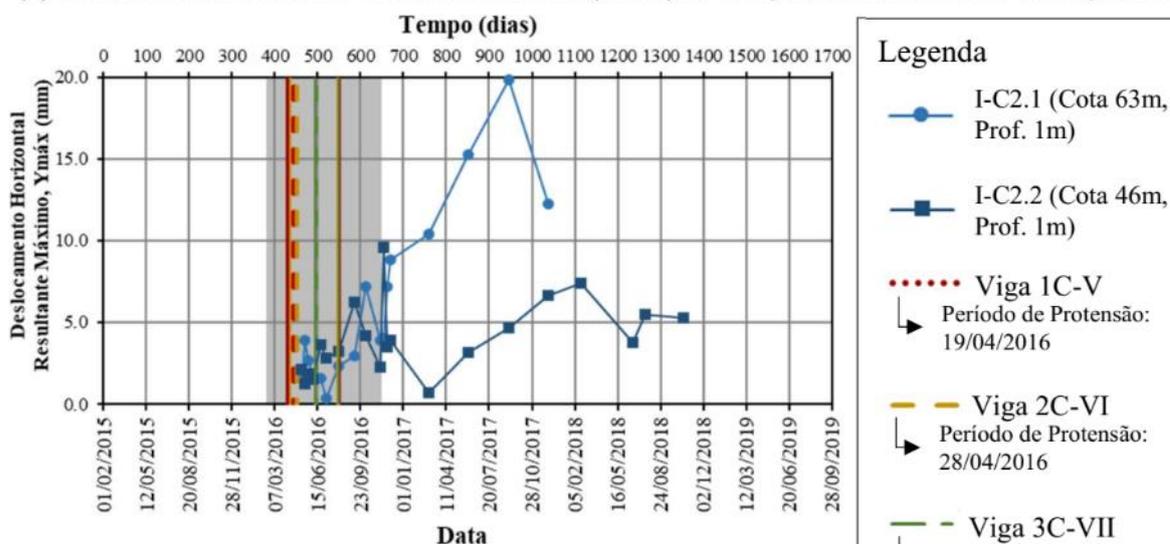
Fonte: O Autor (2022).

Figura 130 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C2.

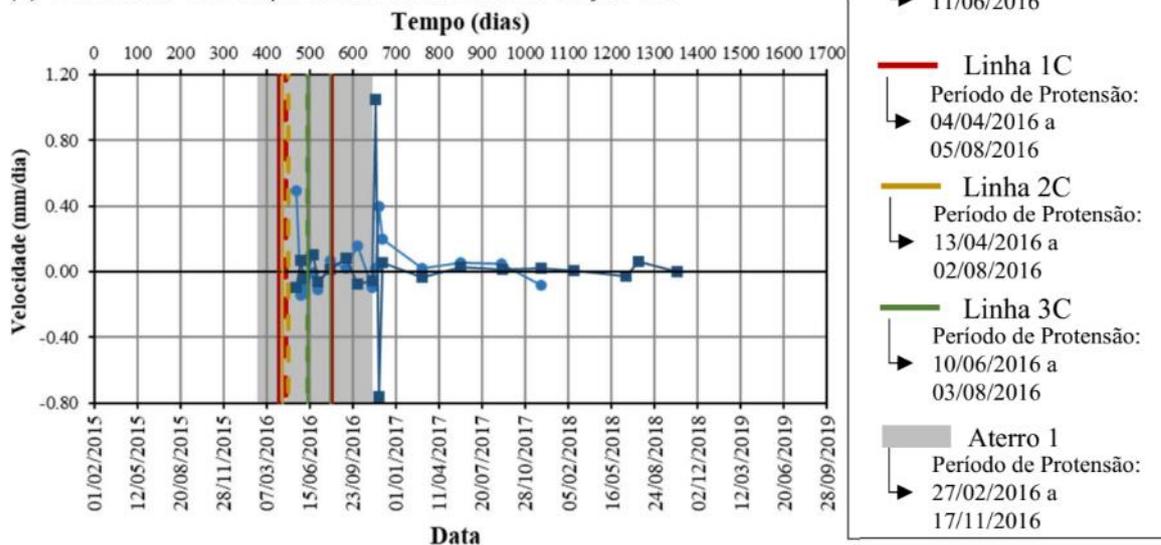
(a) Seção C2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagem e tirantes.



(b) Deslocamento Horizontal Resultante Máximo (Y_{máx}) vs Tempo dos inclinômetros da Seção C2.



(c) Velocidade vs Tempo dos inclinômetros da Seção C2.



Fonte: O Autor (2022).

A seção C3 está posicionada na área C cuja representação esquemática é mostrada na Figura 131a. Nesta seção foram executadas as protensões previstas no projeto executivo inicial.

Os resultados evidenciados na Figura 131b mostraram similar dos deslocamentos até os registros de 01/12/2016. Na sequência da execução da protensão foi possível observar uma estabilização nos deslocamentos para ambos os equipamentos, porém de forma mais evidente para I-C3.2, cujo comportamento se estendeu até 20/06/2018. No caso do I-C3.1, percebe-se que o período no qual os deslocamentos se encontram mais estáveis é mais curto (02/03/2017 a 04/09/2017). Ocorreu uma reativação da movimentação com aumento dos deslocamentos no I-C3.1, contudo este comportamento não pôde ser confirmado em decorrência da ausência de leituras posteriores.

O comportamento da velocidade (Figura 131c), mostrou a confirmação do período (07/05/2016 a 23/11/2016) de oscilação indicado na análise do deslocamento, que correspondem ao período anterior a protensão. Não foi possível confirmar o comportamento de estabilidade nas leituras para o I-C3.1, devido à perda de registros.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 39 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

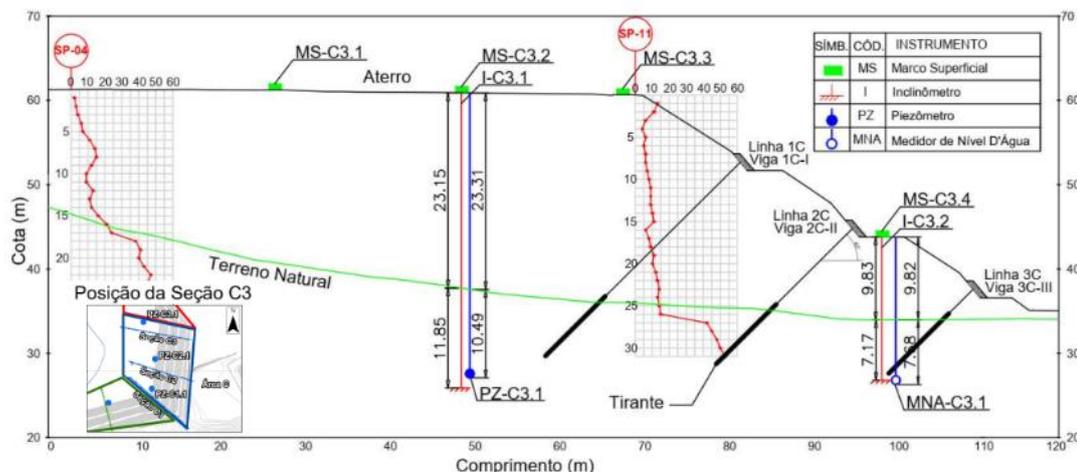
Tabela 39 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção C3.

Seção: C3	Deslocamentos (mm)	
	I-C3.1	I-C3.2
Período de análise		
Após a execução da protensão	23/11/2016 0,81	23/11/2016 2,10
Início da estabilização	02/03/2017 15,42	23/11/2016 2,10
Início da reativação do movimento	04/12/2017 9,14	20/06/2018 2,48
Fim da reativação do movimento	-	17/10/2018 3,14
Leitura final	19/02/2018 15,59	28/08/2019 6,75

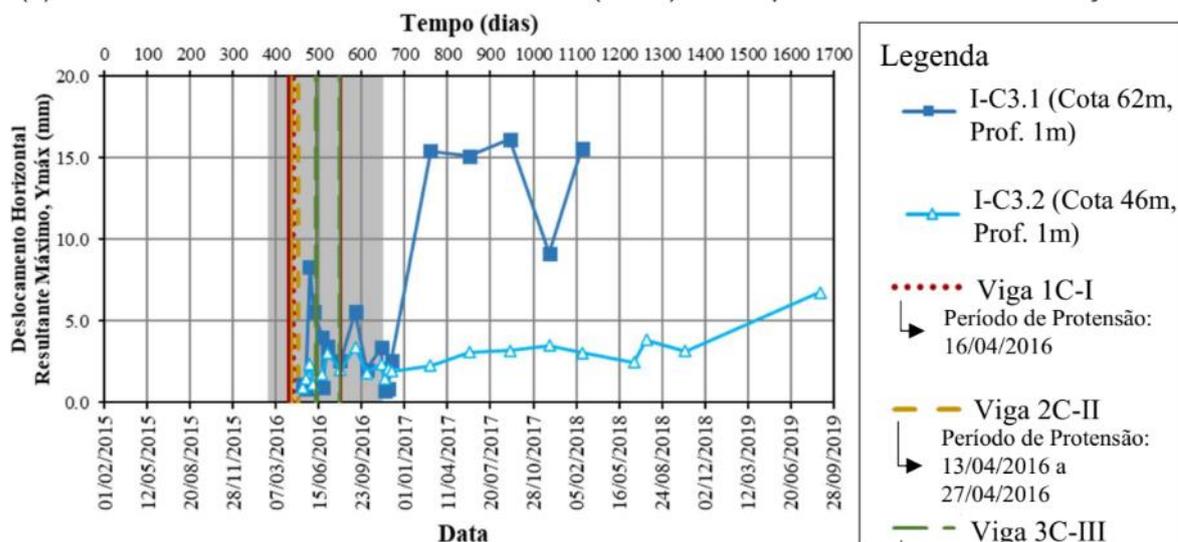
Fonte: O Autor (2022).

Figura 131 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção C3.

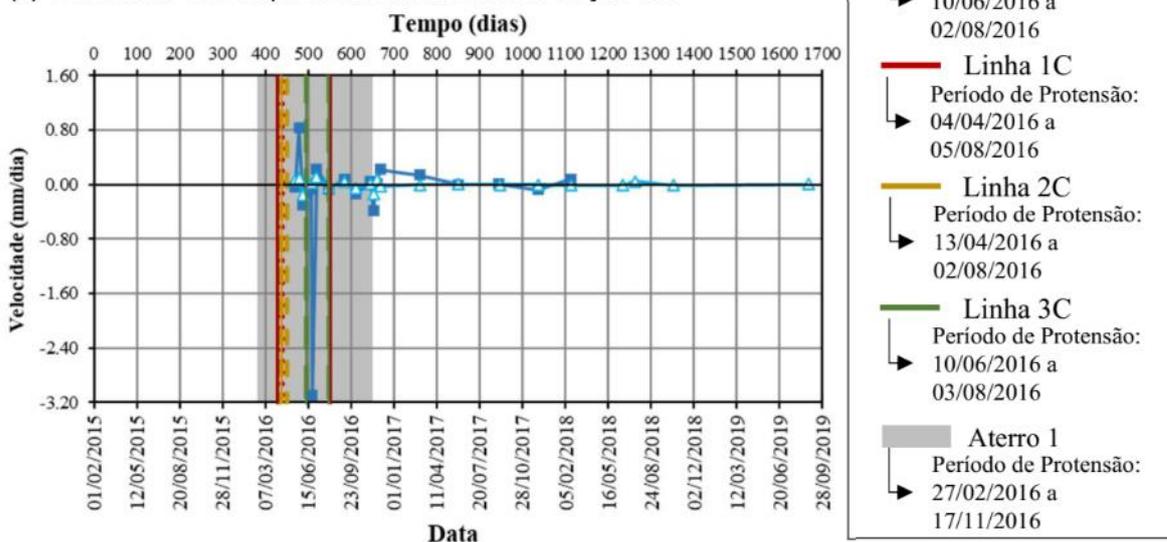
(a) Seção C3, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamento Horizontal Resultante Máximo (Y_{máx}) vs Tempo dos inclinômetros da Seção C3.



(c) Velocidade vs Tempo dos inclinômetros da Seção C3.



Fonte: O Autor (2022).

8.2.5.2.2 Região Aterro 2

A seção D1 está posicionada na área D, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 132a. Nesta seção não foram executadas as linhas 3D e linha 4D, bem como as vigas 3D-X e 4D-IX, previstas no projeto executivo inicial.

Os resultados indicados na Figura 132b mostraram um comportamento progressivo dos deslocamentos entre os instrumentos estudados, até o período de finalização da protensão. Como observa-se, a partir das leituras de 23/11/2016 ocorre uma estabilização dos deslocamentos, logo após o período de conclusão das protensões do aterro 1. A partir de 04/12/2017, ocorreu uma reativação da movimentação com aumento dos deslocamentos identificada em I-D1.2, seguindo este comportamento até a leitura final. Não se pode afirmar sobre a reativação do movimento para o I-D1.2, visto que as leituras são interrompidas em 04/12/2017.

O comportamento da velocidade (Figura 132c), mostrou oscilações no período inicial, que corresponde ao processo de protensão. Após isso, percebe-se que as velocidades, de ambos os instrumentos, se encontram estabilizadas que corresponde ao intervalo de estabilização nas leituras do deslocamento. Há um pico na velocidade do I-D1.2 (0,05mm/dia), que está relacionado com o início da fase de reativação dos deslocamentos (19/02/2018).

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 40 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

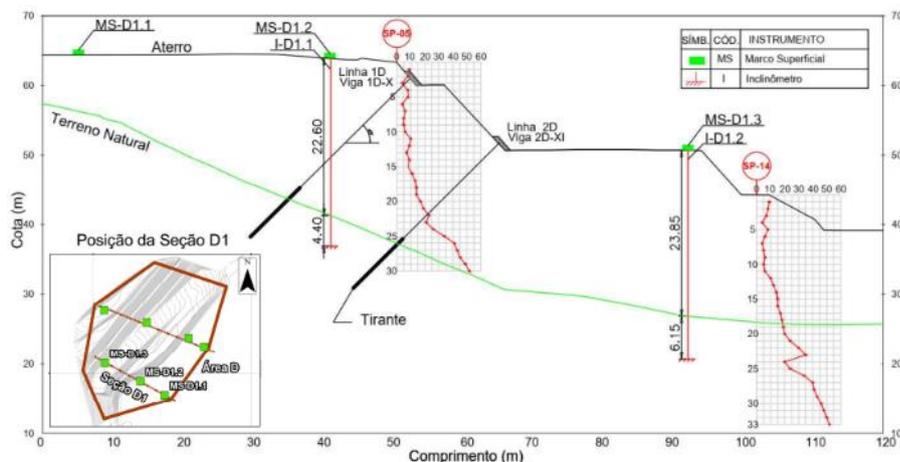
Tabela 40 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção D1.

Seção: D1 Período de análise	Deslocamentos (mm)	
	I-D1.1	I-D1.2
Após a execução da protensão	23/11/2016 19,77	23/11/2016 16,30
Início da estabilização	01/12/2016 19,70	01/12/2016 17,14
Início da reativação do movimento	-	04/12/2017 18,39
Fim da reativação do movimento	-	-
Leitura final	04/12/2017 20,59	28/08/2019 28,13

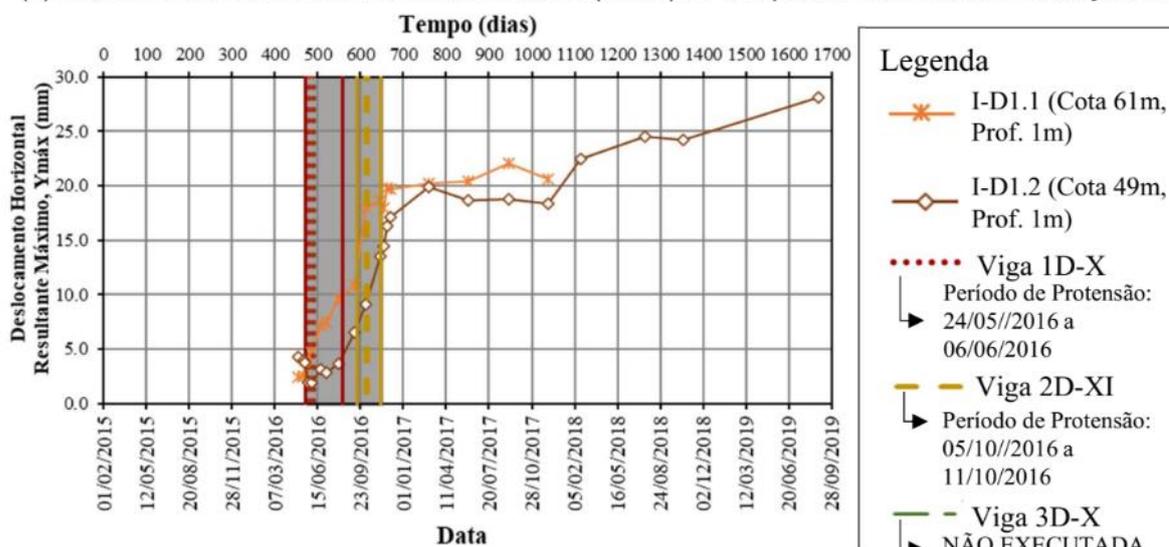
Fonte: O Autor (2022).

Figura 132 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção D1.

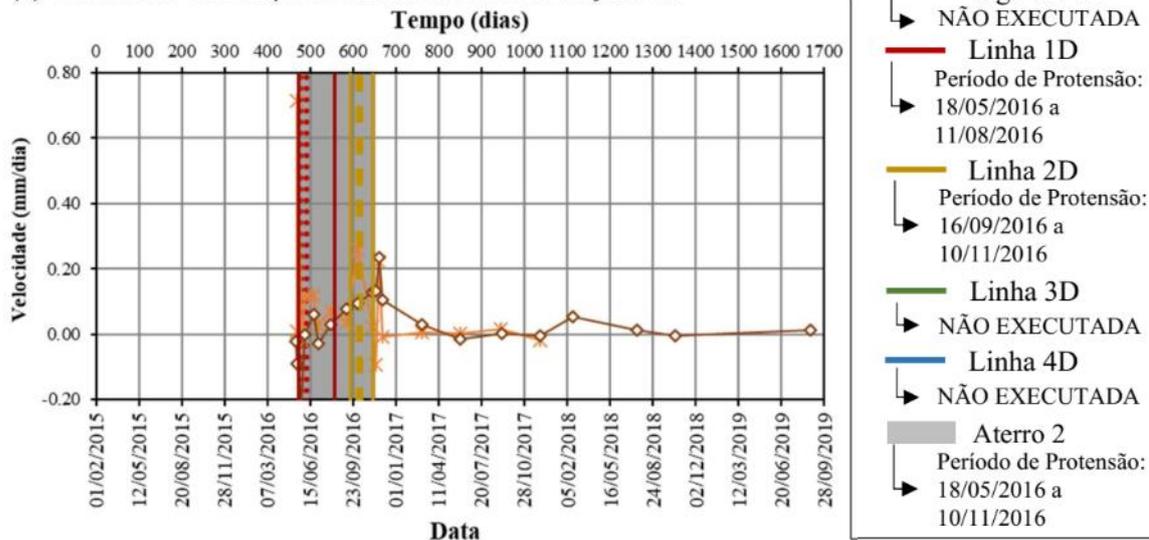
(a) Seção D1, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamento Horizontal Resultante Máximo (Y_{máx}) vs Tempo dos inclinômetros da Seção D1.



(c) Velocidade vs Tempo dos inclinômetros da Seção D1.



Fonte: O Autor (2022).

A seção D2 está posicionada na área D, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 133a. Nesta seção não foram executadas as linhas 1D, 3D e 4D, bem como as vigas 2D-V, 3D-V e 4D-III previstas no projeto executivo inicial. A linha 2D foi executada parcialmente e as demais linhas e vigas executadas na seção de análise são marcadas a fim de facilitar o entendimento.

A análise dos deslocamentos (Figura 133b) evidenciaram um comportamento progressivo das leituras até pouco depois da realização da protensão. É possível perceber I-D2.1 apresenta uma fase de estabilização entre 01/12/2016 e 19/02/2018, não havendo leituras que possam confirmar a continuidade desta fase ou a mudança para uma possível reativação do movimento, a qual foi identificada nos outros instrumentos. Para I-D2.2 e I-D2.3 a fase de estabilização é suave, sendo observada a mudança de comportamento, para um crescimento progressivo do deslocamento em 19/02/2018, que se estendeu até a última leitura. Cabe destacar que a magnitude dos deslocamentos para o inclinômetro I-D2.3 é significativamente maior do que os outros analisados desta seção e foi o maior valor de deslocamento registrado entre todos os instrumentos analisados, com o último valor de registro da ordem de 54,13mm em 28/08/2019.

A velocidade (Figura 133c), demonstrou um comportamento oscilatório, até que fosse finalizado o processo de protensão. Após esse período os valores sofreram significativa redução, com pequenas oscilações ao longo do tempo, havendo picos pontuais, especialmente na mudança para fase de reativação do movimento.

Para auxiliar a compreensão do leitor sobre a evolução dos deslocamentos para esta seção, construiu-se a Tabela 41 que destaca os períodos de análise mais importantes e os valores de deslocamentos registrados.

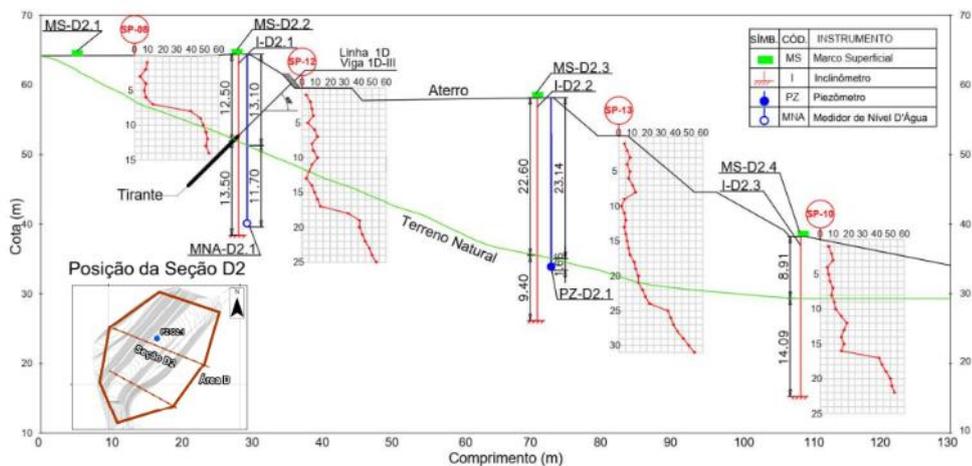
Tabela 41 – Resumo dos deslocamentos para os períodos de análise considerados na seção D2.

Seção: D2 Período de análise	Deslocamentos (mm)		
	I-D2.1	I-D2.2	I-D2.3
Após a execução da protensão	23/11/2016 20,57	23/11/2016 31,80	23/11/2016 30,65
Início da estabilização	23/11/2016 20,57	02/03/2017 36,99	02/03/2019 37,86
Início da reativação do movimento	-	04/12/2017 41	19/02/2018 39,09
Fim da reativação do movimento	-	-	18/07/2018 43,30
Leitura final	19/02/2018 20,97	28/08/2019 54,13	17/10/2018 42,75

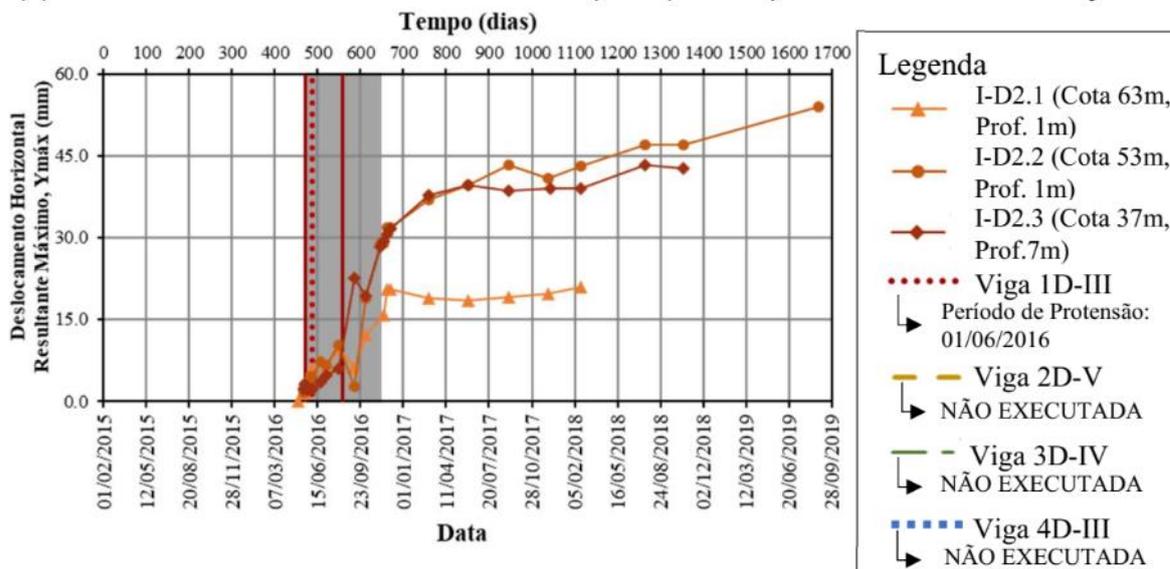
Fonte: O Autor (2022).

Figura 133 – Resultados dos deslocamentos e da velocidade para seção D2.

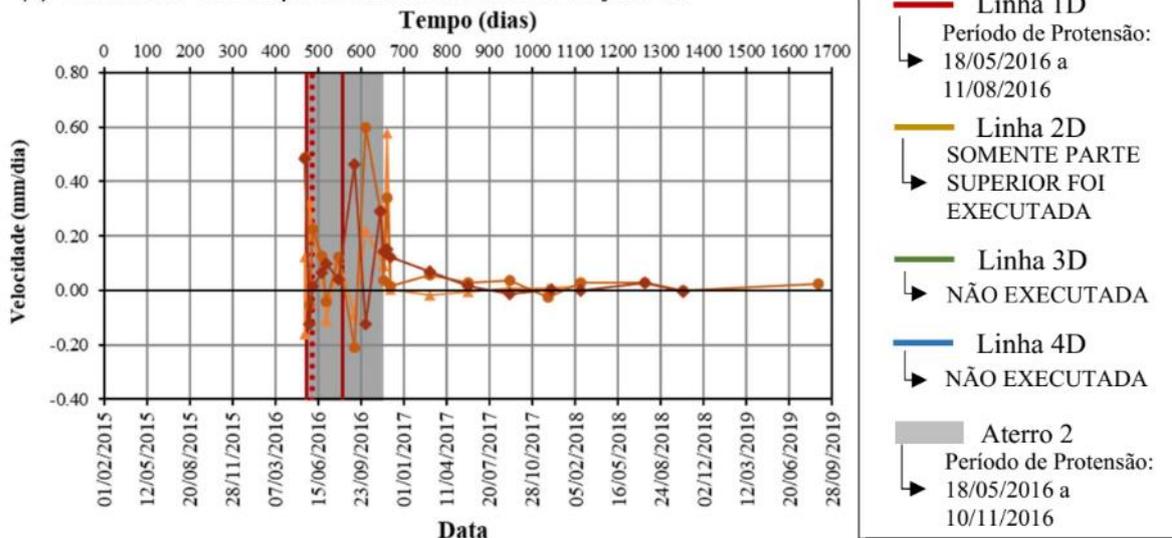
(a) Seção D2, ilustração dos instrumentos instalados, sondagens e tirantes.



(b) Deslocamento Horizontal Resultante Máximo (Y_{máx}) vs Tempo dos inclinômetros da Seção D2.



(c) Velocidade vs Tempo dos inclinômetros da Seção D2.

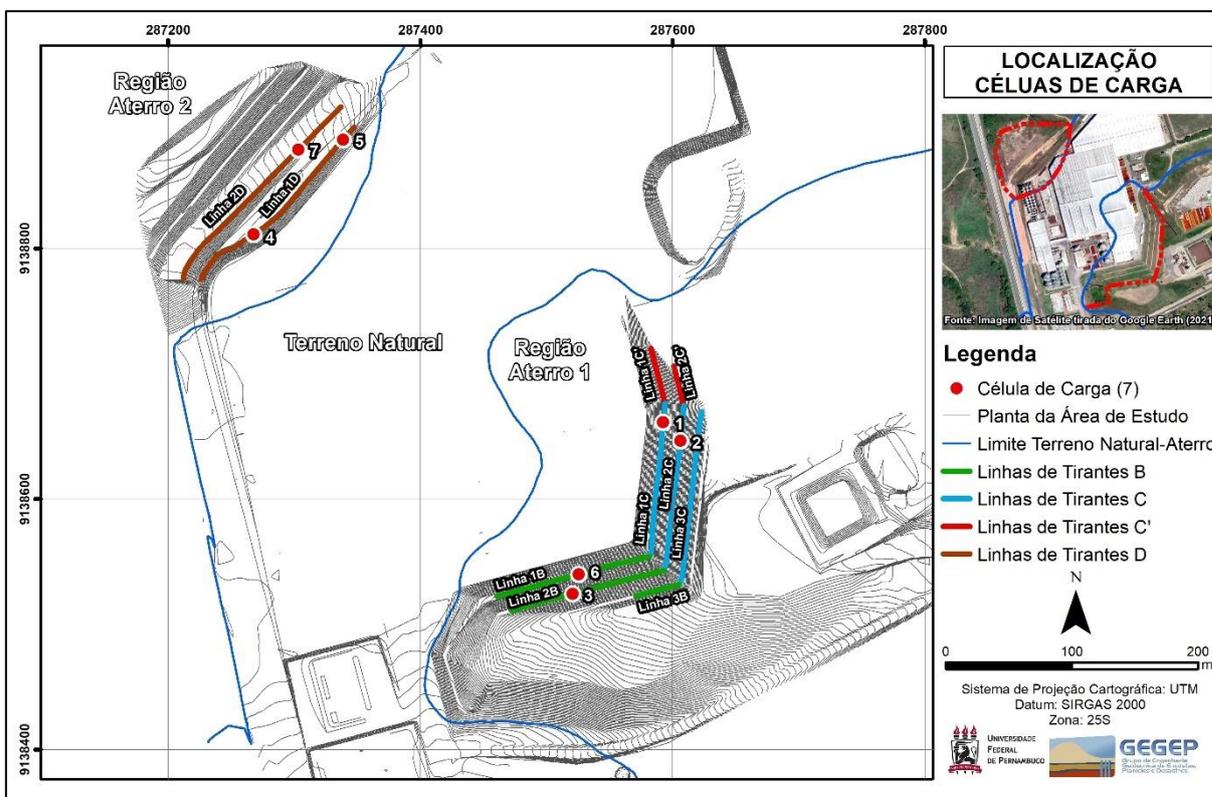


Fonte: O Autor (2022).

8.2.6 Dados células de carga

Nesta seção estão apresentados os resultados das células de carga instaladas em sete tirantes da obra de estabilização (Figura 134). Na Tabela 42 estão descritas as informações gerais das células de carga (tirante instrumentados, leituras iniciais que correspondem a data de instalação e a carga de incorporação). Nota-se que no momento da primeira leitura todas os tirantes estavam protendidos com a carga muito próxima a estipulada em Projeto, 45 tf.

Figura 134 – Localização dos tirantes instrumentados com células de carga.



Fonte: O Autor (2022).

Tabela 42 – Informações das células de cargas.

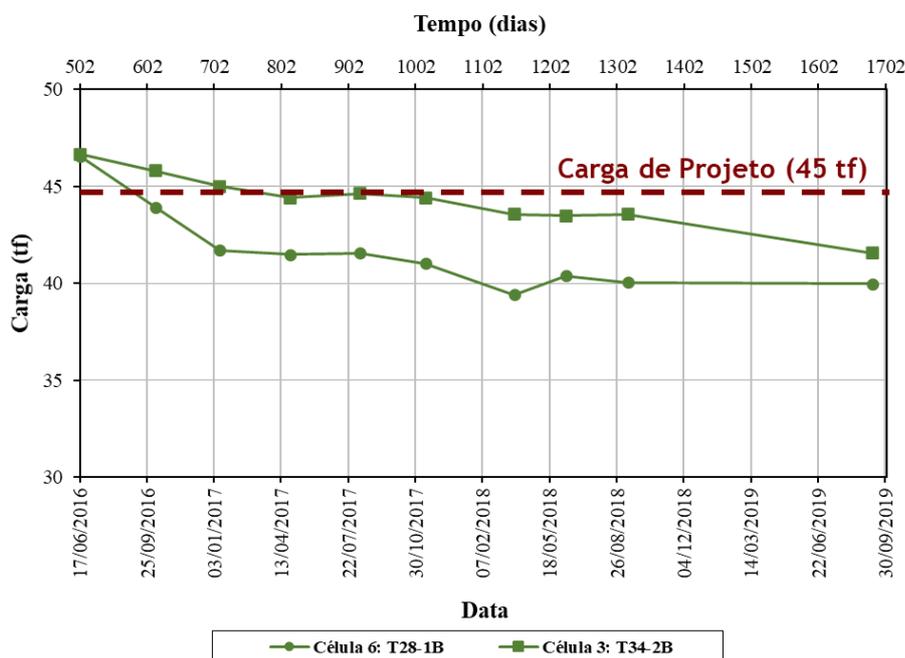
Tirante	Célula de Carga	Data de Instalação	Carga de Incorporação (tf)
T28-1B	Célula 6	17/06/2016	46,55
T34-2B	Célula 3	20/06/2016	46,66
T15-1C	Célula 1	17/06/2016	45,23
T21-2C	Célula 2	20/06/2016	45,18
T19-1D	Célula 5	17/06/2016	47,26
T52-1D	Célula 4	14/06/2016	45,26
T34-1D	Célula 7	21/06/2016	45,09

Fonte: O Autor (2022).

A campanha experimental das células de carga totalizou nove leituras após a data de instalação, perfazendo o período de 07/10/2016 a 11/09/2019.

Nas Figura 135, Figura 136 e Figura 137 têm-se os resultados das leituras de células de cargas, respectivamente, nos tirantes da Área B, Área C e Área D. Percebe-se que durante o tempo analisado praticamente todos os tirantes ficaram com cargas abaixo da carga de projeto. Para os tirantes da Área B (Figura 135) as leituras ficaram entre 45tf e 40tf.

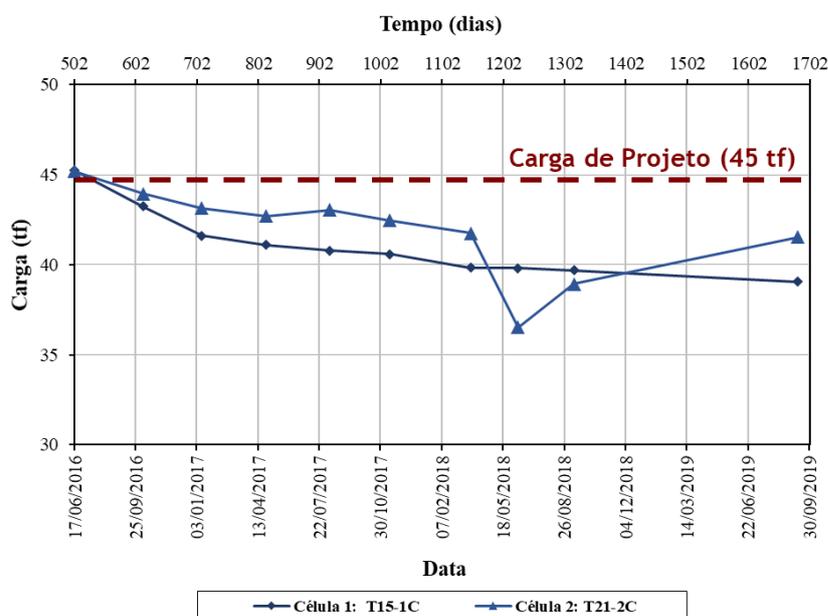
Figura 135 – Resultado das células de carga nos tirantes da Área B.



Fonte: Coutinho (2019), Rincen BTP Brasil (2019).

Nos tirantes da Área C (Figura 136) as leituras ficaram entre 45tf e 39tf, com exceção do tirante T21-2C que na leitura do dia 11/06/2018 teve um decréscimo para 36,50tf; mas retornando para o faixa de 45tf e 39tf. É importante destacar que, em torno dessa data (11/06/2018), a maioria dos instrumentos de deslocamentos (marcos superficiais e inclinômetros) apresentaram um aumento significativo, considerado como uma reativação da movimentação que estava estabilizada após a finalização da estrutura de contenção em vigas atirantadas. Contudo, posteriormente, os dados de deslocamentos apontam para uma nova estabilização do movimento.

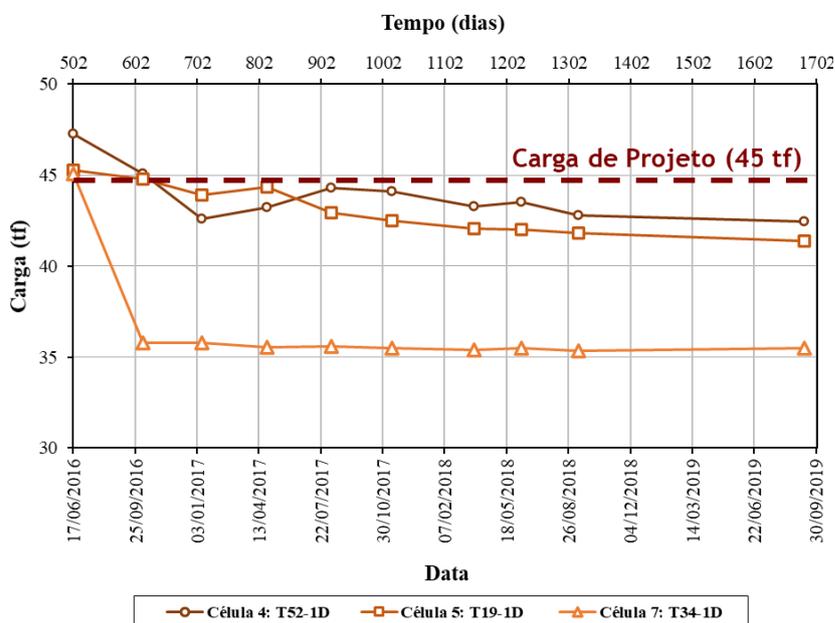
Figura 136 – Resultado das células de carga nos tirantes da Área C.



Fonte: Coutinho (2019), Rincen BTP Brasil (2019).

Já para os tirantes da Área D (Figura 137) as leituras ficaram entre 45tf e 41tf, com exceção do tirante T34-1D que apresentou carga em torno de 35tf.

Figura 137 – Resultado das células de carga nos tirantes da Área D.



Fonte: Coutinho (2019), Rincen BTP Brasil (2019).

De maneira geral, nota-se que as cargas nas ancoragens permanecem razoavelmente estáveis, apresentando em alguns momentos um relaxamento que podem estar associados com os deslocamentos observados nos marcos superficiais e inclinômetros.

9 CONCLUSÕES

A seguir estão apresentadas as principais conclusões obtidas no presente estudo.

- Pluviômetros

Foram analisados dados de dois pluviômetros, o pluviômetro instalado na própria obra e o pluviômetro Estação Alto do Céu monitorado pelo CEMADEN. Os dados do pluviômetro Estação Alto do Céu, medidos entre 2015 e 2021, mostraram que o período de chuvas mais intensas é observado, em geral, entre os meses de abril a julho, já o período seco fica, em geral, entre os meses de setembro a novembro. Os dados coletados exibiram que ocorreu um pico de precipitação em 24/07/2019 que correspondeu a 195 mm, sendo esse o maior pico de chuva durante o intervalo de execução da obra. O pluviômetro instalado no local da obra realizou leituras entre 01/08/2015 até 10/01/2016, devido as diferenças de leitura, há pequenas discrepâncias em valores de precipitação diária para os dois pluviômetros. Contudo, pode-se observar que os valores de precipitação acumulada são bem similares em ambos os pluviômetros instalado.

- Medidores de Nível D'água

Foram instalados seis medidores de nível d'água (MNA) na área de estudo. De modo geral, foi observado uma variação crescente do nível d'água em virtude da chuva conforme registra o MNA-A1.1, MNA-C1.1, MNA-C3.1. Os resultados indicam que os sucessivos volumes precipitados no período em análise tenham saturado o material após infiltração e percolação e que a precipitação máxima ocorrida no período tenha contribuído diretamente para recarga freática gerando com isso o aumento do nível d'água. Porém, em alguns equipamentos (MNA-B1.1, MNA-C2.1, MNA-C3.1) é observado o rebaixamento do nível de água em períodos de precipitações significativas, indicando possíveis erros de leituras em campo, não justificando o rebaixamento do nível freático. No MNA-D2.1 não fica claro a influência das precipitações na variação do nível freático, conforme o observado nas demais seções monitoradas.

- Piezômetros

A fim de medir a coluna de água em pontos específicos, foram instalados 5 piezômetros (PZ) de Casagrande na área de estudo. As leituras mostraram que a

variação da coluna de água ao longo do tempo apresenta uma tendência a estabilização dos valores, evidenciando que a precipitação não influenciou de forma significativa para que se ocorresse um aumento da coluna de água e conseqüentemente da carga piezométrica, sendo registrados apenas aumentos sutis da coluna de água. Esse comportamento é verificado em todos os piezômetros analisados (PZ-B1.1, PZ-C1.1, PZ-C2.1, PZ-C3.1, PZ-D2.1).

- Marcos Superficiais

Foram instalados 27 marcos superficiais (MS) na área de estudo. De modo geral, a análise dos deslocamentos verticais evidencia um comportamento progressivo das leituras para ambos os instrumentos até o registro do ano de 2017, após esse período ocorreu uma redução dos valores, seguidos por uma reativação do movimento. A velocidade demonstrou um padrão de comportamento com poucas oscilações durante período de reativação da movimentação.

- Inclinômetros

O programa de monitoramento, com base nos resultados fornecidos pelos 15 inclinômetros instalados, possibilitou identificar quais deles apresentaram valores elevados e quais deles não foi percebido deslocamento significativo. O comportamento do solo após a instalação dos tirantes, demonstrou um nítido processo de estabilização do aterro. Algumas mudanças de direção foram observadas no contato entre o aterro e o terreno natural, sobretudo, antes da execução dos tirantes, após a obra, observou-se poucas e na maioria dos casos, nenhuma mudança de direção dos deslocamentos da massa de solo nesta interface. Com relação as direções desses vetores, em superfície e profundidade, observam-se comportamento similares nos seguintes instrumentos: I-B1.1 / I-B1.2 / I-C1.2 / I-C2.1 / I-C3.1 / I-C3.2 / I-D1.2 / I-D2.1 / I-D2.2 / I-D2.3, nos demais aparelhos monitorados, não foi observado similaridade nas direções desses deslocamentos.

- Células de Carga

A partir dos resultados das células de carga instaladas em sete tirantes da obra de estabilização, notou-se que as cargas nas ancoragens permanecem razoavelmente estáveis, apresentando em alguns momentos um relaxamento que podem estar associados com os deslocamentos observados nos marcos superficiais e inclinômetros.

- Conclusão Final

Por fim, de maneira geral, verificou-se que, após a implantação da estrutura de contenção, houve uma tendência à estabilização do movimento, notada pela redução dos deslocamentos verticais e horizontais.

É importante destacar que os inclinômetros instalados antes da solução da estabilização indicavam velocidade na ordem de 0,3mm/dia. Logo após a conclusão da obra de estabilização os valores foram reduzidos a velocidades próximas a 0, aumentando apenas no mês de julho de 2018, onde houve uma reativação dos movimentos, tendo posteriormente retornado ao comportamento estabilizado.

REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, A. M. G. **Estudo de séries de leituras obtidas através do monitoramento da instrumentação geotécnica implantada em uma encosta litorânea**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil. 2013.
- ALHEIROS, M. M., SOUZA, M. A. A.; BITOUN, J.; MEDEIROS, S. M. G. M.; AMORIM JÚNIOR, W. M. **Manual de ocupação dos morros da região metropolitana de Recife**. Programa Viva o Morro, Fundação de Desenvolvimento Municipal. Recife, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D-5778: Standart test method for performing eletronic fricion cone and piezocone testing of soils**. 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.682: Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12069: Solo - Ensaio de penetração de cone in situ (CPT)**. Rio de Janeiro, 1991
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5629: Tirantes ancorados no terreno – Projeto e execução**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7250: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos**. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas**. Rio de Janeiro, 1986
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR. 6484: solo - sondagens de simples reconhecimentos com SPT - método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1996
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR. 7182: Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade De Encostas. **Anais...** Rio de Janeiro, 1992. v. 2. p. 721-733.
- AZEVEDO, A. M. G. **Estudo de séries de leituras obtidas através do monitoramento da instrumentação geotécnica implantada em uma encosta litorânea**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil. 2013.

BARTORELLI, A.; HARALYI, N. **Geologia do Brasil**. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, cap. 4, p. 57-67. 1998.

BASSANELI, H. R. et al. **Estabilidade de taludes**. [S. l.: s. n., 2015]. Disponível em: <http://www.revista.unisal.br/lo/index.php/revistajornada/article/view/484/214>. Acesso em: 25 nov. 2020.

BASTOS, I.G. **Estabilização de encostas através de drenagem profunda: estudo de um caso de estabilização com túnel de drenagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). USP, São Carlos, 2006.

CAPUTO, H.P.; CAPUTO, A.N.; RODRIGUES, J.M.A. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. Volume 2: Mecânica das Rochas, Fundações e Obras de Terra. 7.ed. São Paulo: LTC. 2015.

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (Org.). **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2007.

CERQUEIRA, H. **Critérios de Projeto para Instrumentação Piezométrica de Diversas Estruturas Geotécnicas em Mineração**. Dissertação (Mestrado) Apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geotecnia, UFOP, Ouro Preto, 166p, 2017.

CHIODINI, M.; PARIZOTTO, R.; SOUZA, A.; ZANDAVALLI, B. **Teste de Integridade em Estacas: PIT - um ensaio não destrutivo**. In: 11º Encontro Científico Cultural Interinstitucional. Paraná – PR, 2013. Disponível em: <<https://www.fag.edu.br/upload/ecci/anais/55952a3edc722.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2022.

COSTA, D. P. **Comportamento de uma massa coluvial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 304 p. 2017.

COUTINHO, R. Q. **Características Geológicas - Geotécnicas da Formação Barreiras no Nordeste e Aplicações Práticas**. 1ª Palestra Pelópidas da Silveira. ABMS – NE, Recife. 2019.

COUTINHO, R. Q.; BANDEIRA, A. P. N.; ALHEIROS, M. M (orgs.) Guia do Encostas Ocupadas do Recife” In: II COBRAE. **Anais...** Rio de Janeiro – RJ, pp. 919- 927. 2008.

COUTINHO, R. Q. Módulo 9: Ações Estruturais para Redução de Riscos. In: Ministério das Cidades; UFPE. (Org.). **Livro do Curso de Capacitação de Gestão e Mapeamento de Riscos Socioambientais**. Recife: UFPE, v. 1, p. 130-155. 2008.

COUTINHO, R. Q. **5º Relatório: Projetos Básicos de Engenharia para Estabilização de Áreas de Riscos de Deslizamentos em Encostas – Volume 2: Vale das Pedreiras**. Recife: FADE/UFPE. 2008b.

COUTINHO, R. Q.; BELLO, M. I. M. C. V. Analysis and Control of the Stability of Embankments on Soft Soils: Juturnaíba and Others Experiences in Brazil. **Soils and Rocks**, v. 34:4, p. 331-351, 2011.

COUTINHO, R. Q. et al. Relatório de instrumentação dos inclinômetros. UFPE-PE, 260p. 2015.

COUTINHO, R. Q. et al. Investigação de campo e laboratório de um aterro em Pernambuco. In: XVIII COBRAMSEG. **Anais...** Belo Horizonte – MG. 2016.

COUTINHO, R. Q.; SOUZA NETO, D. P.; CASTRO, B. P. F.; BARBALHO, T. F. **Relatório de campanha e análise de resultados de ensaios**. UFPE-PE, 233p. 2015.

CRUZ, P.T. **100 Barragens brasileiras**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2004.

CURRAN, P.J., ATKINSON, P.M. Geostatistics and remote sensing. **Progress in Physical Geography**, v. 22, n. 1, p. 61-78, 1998.

DANA. J. D. **Manual of Geology Treating of the Principles of the Science with Special Reference to American Geological History for the Uses of Colleges**. Academics and Schools of Scienoet Theodore Bliss, Philadelphia. 1864. 800 p.

DO VAL Engenharia Consultiva. **Relatório de progresso: análise da instrumentação geotécnica**. 34p. 2016.

DREHMER, J.A.B. **Análise de encosta situada na rodovia BR 116 – RJ, km 29, monitorada por instrumentação geotécnica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. John Wiley & Sons, Inc., New York. 1988.

EFFGEN, J. F.; ROCHA, P. A.; PIRES, P. J. M.; MARCHIORO, E. Parametrização geotécnica para modelagem de suscetibilidade a escorregamentos translacionais em Fradinhos, Vitória-ES. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, MG, v.32, p.711-727. 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-52656

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de Massa: uma abordagem geológico geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 10. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T. E CUNHA, S. B. (org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, cap. 3, p. 123-194. 2003.

FERNANDES, T. P. R. L. **A Influência da infiltração das chuvas na estabilidade de um talude natural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. P. 7-8. 2014.

FISHER, R. A. Statistical methods for research workers. In: **Breakthroughs in statistics**. Springer, New York, NY, p. 66-70. 1992.

FONSECA, A. R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFOP, Ouro Preto, 2003.

FONSECA, J. **Riscos associados à instabilidade de talude**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. p. 10. 2014.

FORMOSO, M.T. **Desenvolvimento de um inclinômetro para monitorar o comportamento de taludes instáveis de solos**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRGS, Porto Alegre, 1999.

FRANKLIN, J. A., DENTON, P. E. **The Monitoring of Rock Slopes**. Q. J. Eng. Geol., v. 6, n. 3, p. 259-286. 1973.

FREIRE, E. P. **Estabilidade de Taludes Naturais em Solos nos Morros da Cidade de Santos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 1995.

FUSARO, T.C. **Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) UFOP, Ouro Preto, 2007.

GARROUX, G.O.; LEÃO, M.; BRANDT, J. INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA EM OBRAS SUBTERRÂNEAS. **Revista Fundações & Obras Geotécnicas**. p. 76-83. 2016

GARZON, Y. E. P. **Retroanálise da Cortina Instrumentada da Ferrovia São Paulo - Santos (FEPASA - KM 74)**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil. Dissertação. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 161 p. 2015.

GEO-RIO. (2014). **Manual Técnico de Encostas** - Volume I.

GEO-RIO. (2014). **Manual Técnico de Encostas** - Volume II.

GERSCOVICH, D. **Estabilidade de Taludes**. Oficina de Textos: São Paulo, 2016.

GILI, J. A., COROMINAS, J.; RIUS, J. Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. **Engineering Geology**, v. 55, n. 3, p. 167–192. 2000. doi:10.1016/s0013-7952(99)00127-1.

GOMES, J. H. O. S.; BARRETO, G. A. S. L.; NÓBREGA, N. C. F. **Geomantas Impermeabilizantes na Cidade do Recife: Implementação, Aplicações e Desafios**. In: IX CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA POLÍTICA, Montevideu. 2017.

GOMES, J. H. O. S.; BARRETO, G. A. S. L.; NÓBREGA, N. C. F. **Geomantas Impermeabilizantes na Cidade do Recife: Implementação, Aplicações e Desafios**. In: IX CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA POLÍTICA, Montevideu. 2017.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 194p.,1984.

GUILART, M. H. **Metodologia para a interpretação do monitoramento de escavações subterrâneas**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia Mineral. São Paulo. 2007.

GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T.; FERNANDES, N.F. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 159-184. 2008.

GUSMÃO FILHO, J. A.; ALHEIROS, M. M.; GUSMÃO, A.D.; BANDEIRA, A. P. N.; CAMPELO, F. M. A. C. **Plano Municipal de Redução de Riscos em Assentamentos Precários do Município de Camaragibe - PE - Mapeamento de Risco e Avaliação Preliminar das Ações Estruturais e Não Estruturais**. Gusmão Eng. Associados. Relatório Técnico Nº 2 – V. 1, Camaragibe - PE, 57p. 2005.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. O Manual do Deslizamento: um guia para a compreensão de deslizamentos. Reston, Virginia: U.S. **Geological Survey**, 2008.

HUTCHINSON, I. N. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hidrology: Gen. Report. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM. LANDSLIDES. **Proceeding**. Lausanne, v.1 p.3-35. 1988.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico nº 97765-205**. São Paulo. 2007

JOPPERT JUNIOR, I. **Fundações e Contenções de Edifícios**: qualidade total na gestão do projeto e execução. São Paulo: PINI, 2007.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTs, J.C.H. **Mining geostatistics**. 7ed. Academic Press. New York, 1997.

KENDALL, M. G. **The advanced theory of statistics**. Vols. 1. The advanced theory of statistics. v. 1., n. 1, ed. 4, 1948.

LACERDA, W. A. **Stability of Natural Slopes along the Tropical Coast of Brazil**, Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, COPPEUFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, p. 17-40. 1997.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5ª. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LANDIM, P. M. B. **Sobre geoestatística e mapas**. Terrae Didatica, v. 2, n. 1, p. 19-33. 2006.

LPC LATINA. **Relatório de instrumentação**. 154p. 2019.

MACHADO, G. F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia de Minas e Petróleo. São Paulo, 155f. 2007.

MALKO, J. A. C.; TOÉ, M. D.; SALES, L. F. P.; FOLLE, D.; DILDA, V. Avaliação da Estabilidade de um Talude Rodoviário através de Dados Provenientes de Instrumentação Geotécnica. **Revista de Engenharia Civil IMED**, n.1, v.2, p. 15-22, 2014. doi: <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v1n2p15-22>

MCGRAW-HILL, S.; SPIEGEL, M. R. Análise das séries temporais. Estatística. 3. **Makron Books**, Rio de Janeiro. P. 423-474. 1994.

MELLIA, D. P. **Interpretação de ensaios de piezocone em solos intermediários compactados**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE. 170f. 2017.

MELLO, P.F. **Influência da face na estabilidade de taludes em solo grampeado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UERJ, Rio de Janeiro, 2018.

MELO, C. R. **Utilização de informações espaciais de alta resolução para análise de suscetibilidade de deslizamento sob situação de precipitações**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 159f. 2021.

NAGALI, A. **Estabilidade de Taludes em Rocha com Aplicação de Escâner a Laser** – Caso da Mina Saivá, Rio Branco do Sul, PR. Tese (Doutorado em Geologia). UFPR, Curitiba, 2010.

OLIVEIRA, T.; BONETTI, V. L. Influência da vegetação na estabilidade de encostas naturais – estudo de caso para córregos de parques urbanos. In: II Circuito Regional do XXVII Seminário de Iniciação Científica. E, XIV Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão / Universidade do Oeste de Santa Catarina. – Joaçaba, SC. **Anais eletrônicos**: Editora Unoesc, 2021.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Mapa de Susceptibilidade a Deslizamentos na Região Metropolitana do Recife**. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PINTO, R.C.; PASSOS, P.; CANEPARO, S. Geoinfórmica: **Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia Maringá**, v. 4, n. 1, p. 3-27. 2012. ISSN 2175-862X (online)

REGINATTO, A. R.; FERRERO. **Collapse Potential of Soils and Water Chemistry**. Proceedings of the VIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, v. 2, p 177-183. 1973.

RINCENT BTP BRASIL. **Relatório de ensaios não-destrutivos: auscultação de 11 Tirantes**. 48p. 2019.

RINCENT BTP BRASIL. **Relatório de instrumentação de tirantes com células de carga**. 31p. 2018

ROJAS, K.R.C. **Estudo dos Deslizamentos Superficiais Deflagrados por Chuvas Implementando a Análise não Saturada e Transiente em Escala Regional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UnB, Brasília, 2017.

SANTOS, I. G. **Estabilização de taludes em colúvio com o uso de cortinas ancoradas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

SHARPE, C. F. S. **Landslide and Related Phenomena**. Oxford: University Press, 1938, 451p.

SILVA, M. M. **Estudo geológico-geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no Município de Camaragibe – PE**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 402 p. 2007.

SILVA, R.C. **Comportamento de uma Escavação com Cortina Ancorada e Grampeamento em Solo Residual com Camadas Reliquiarias**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2017.

SOILMOISTURE. **Guelph Permeameter 2800**. Operating Instructions. Soilmoisture Equipment Corp. Santa Bárbara, USA. 1991.

SOUZA NETO, D. P. **Estudos geotécnicos de um aterro de solos da formação barreiras na região metropolitana do Recife**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE. 168f. 2016.

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar energy**, v. 51, n. 4, p. 289-291, 1993.

TEIXEIRA, W. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

TIRANTES. **Solotrat Engenharia Geotécnica Eireli**. Disponível em: <
<http://www.solotrat.com.br/assets/pdf/tirantes.pdf> >.

TORRES, R. T. C.; BARROS, M. R. S.; CHISSOLUCOMBE, I. Estabilidade de taludes. In: CONGRESSO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO DA UEG, 4., 2018. **Anais eletrônicos...** Disponível em:
<https://www.anais.ueg.br/index.php/cepe/article/view/10600>. Acesso em: 25 nov. 2020.

VALENÇA, L. M. M. **Geologia e recursos minerais da Folha Itamaracá, SB.25-Y-C-VI Estados de Pernambuco e da Paraíba: texto explicativo / Lúcia Maria Mafra Valença, Natália Gomes Alves de Souza (Orgs.) - Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2017. 50p.**

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. Universidade de São Paulo e McGraw-Hill do Brasil Ltda. 1977.

VARNES, D. J. Slope movement types and process. In: SCHUSTER, R. L. KRIZEK, R. J. (Eds). **Landslides-analysis and control**. Washington: National Academy of Sciences 1978 p.12-33. (Transportation Research Board Special Report 176)

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. John Wiley & Sons, 2007.

WILSON, S. D., MIKKELSEN, P. E. **Field Instrumentation**. SCHUSTER, R. L., KRIZEK, R. J. (eds.), Landslides, Analysis and Control. Transportation Research Board, Special Report 176. National Academy of Sciences, Washington DC, p. 112-138, 1978.

WOLLE, C. M. **Taludes Naturais – Mecanismos de Estabilização e Critérios de Segurança**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

WOODCOCK, C.E.; STRAHLER, A.H., JUPP, D.L.B. The use of variograms in remote sensing: I. Scene models and simulated images. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 323-348, 1988.

YAO, L.; HUO, Z.; FENG, S.; MAO, X.; KANG, S.; CHEN, J.; XU, J.; STEENHUIS, T.S. Evaluation of spatial interpolation methods for groundwater level in an arid inland oasis, northwest China. **Environmental earth sciences**, v. 71, n. 4, p. 1911-1924, 2014.