



MONITORIZAÇÃO E CONTROLE GEOTÉCNICO EM OBRAS SUBTERRÂNEAS: APLICAÇÃO A UM CASO CONCRETO

DANIELA SOFIA RIBEIRO CANELHAS

Setembro de 2025

**MONITORIZAÇÃO E CONTROLO GEOTÉCNICO EM OBRAS
SUBTERRÂNEAS: APLICAÇÃO A UM CASO CONCRETO**

**GEOTECHNICAL MONITORING AND CONTROL IN UNDERGROUND
WORKS: APPLICATION TO A SPECIFIC CASE**

Daniela Sofia Ribeiro Canelhas

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geotécnica e Geoambiente**

Orientador: Professor José Augusto Fernandes

Júri

Presidente:

João Paulo Meixedo dos Santos Silva, Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes, Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

António Agostinho Martins Mendonça, Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Porto, setembro de 2025

[página propositadamente em branco]

Resumo

Os túneis são obras de engenharia de grande complexidade, desenvolvidas em meios com significativa variabilidade geológica, geotécnica e hidrogeológica. A execução destas estruturas implica lidar com elevados níveis de incerteza relativamente ao comportamento do maciço e às ações induzidas pelas escavações. Nesse contexto, a monitorização geotécnica torna-se essencial, permitindo reduzir a incerteza, avaliar as hipóteses de projeto e antecipar situações de risco ou instabilidade. O presente estudo centra-se no caso concreto de uma obra do Metro do Porto - Linha Rubi, mais especificamente no sistema de instrumentação e monitorização implementado na envolvente do Poço de Emergência e Ventilação (P1EV) e do respetivo Túnel de Ligação (TL1). A análise desenvolvida permitiu avaliar o desempenho do maciço e das estruturas adjacentes antes e durante a execução das escavações, evidenciando o impacto da obra em curso nas leituras registadas pelos dispositivos de monitorização, bem como a influência adicional de outra obra subterrânea em desenvolvimento nas imediações. Os resultados obtidos reforçam a relevância da monitorização geotécnica como ferramenta essencial para a gestão de risco em obras subterrâneas urbanas.

Palavras-chave: Túnel, Monitorização, Dispositivos de Instrumentação, Geotecnia

[página propositadamente em branco]

Abstract

Tunnels are highly complex engineering works, developed in environments with significant geological, geotechnical, and hydrogeological variability. The execution of these structures involves dealing with high levels of uncertainty regarding the behaviour of the rock mass and the actions induced by excavations. In this context, geotechnical monitoring becomes essential, reducing uncertainty, verifying design hypotheses, and anticipating risk or instability. This study focuses on the specific case of a Porto Metro project—the Ruby Line—more specifically on the instrumentation and monitoring system implemented in the vicinity of the Emergency and Ventilation Shaft (P1EV) and the respective Connection Tunnel (TL1). The analysis carried out enabled assessment of the rock mass and adjacent structures' performance before and during the excavations, highlighting the impact of the ongoing work on the readings recorded by the monitoring devices, as well as the additional influence of another underground project under development in the vicinity. The results obtained reinforce the importance of geotechnical monitoring as an essential risk-management tool for urban underground works.

Keywords: Tunnel, Monitoring, Instrumentation Devices, Geotechnics

[página propositadamente em branco]

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças ao contributo e ao apoio de várias pessoas e instituições, a quem expresso a minha sincera gratidão.

Em primeiro lugar, ao meu orientador, Professor José Fernandes (DEG|ISEP e LGM|ISEP), pela orientação científica, pela partilha de conhecimento e pela disponibilidade.

À minha supervisora, Geóloga Paula Carminé (Grupo ACA), pela atenção dedicada, pelo rigor profissional, pelos valiosos conselhos que enriqueceram o trabalho e pela disponibilidade constante, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto. Ao Engenheiro Gilberto Castro Alves (Grupo ACA), pelo contributo e pelas observações que ajudaram a aprimorar a qualidade deste trabalho.

Ao Grupo ACA, pela oportunidade concedida de integrar este estudo no âmbito da sua atividade, ao permitir o contato com a realidade da engenharia aplicada em obra.

À equipa de Instrumentação, a Applus+, pelo acompanhamento próximo no terreno, pela ajuda e pelo apoio para entender o sistema de monitorização aplicado na obra em estudo.

À minha família, pelo incentivo incondicional, pela paciência e pela confiança depositadas em todas as etapas do meu percurso. E ao meu namorado, Tiago Figueiredo, pelo apoio constante, pela compreensão e pela motivação, que foram determinantes para ultrapassar os momentos mais exigentes desta jornada.

[página propositadamente em branco]

Índice

1. Introdução.....	3
1.1. Enquadramento Geral.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Metodologias e Técnicas.....	4
1.4. Cronogramas de Trabalhos	6
1.5. Organização da Dissertação	7
2. Conceitos Fundamentais de Instrumentação/Monitorização e Controlo Geotécnico em Obras Subterrâneas	13
2.1. Introdução.....	13
2.2. Plano de Instrumentação.....	14
2.2.1. Características dos Dispositivos de Instrumentação	14
2.2.2. Tipos de Dispositivos de Instrumentação.....	19
2.2.2.1. Poropressão e Nível Freático	19
2.2.2.2. Deformações internas no solo ou na rocha e deslocamentos superficiais/do terreno - horizontais e verticais.....	26
2.2.2.3. Medição de tensões em estruturas de suporte e elementos de contenção- Células de Carga	37
2.2.2.4. Vibrações- Sismógrafo	39
2.2.3. Erros de Leitura.....	39
2.3. Plano de Monitorização	40
2.3.1. Tipos de Monitorização	42
2.3.2. Monitorização de Túneis Subterrâneos.....	44
2.4. Gestão de Risco em Túneis Subterrâneos.....	48
3. Enquadramento Geral da Obra em Estudo	55
3.1. Introdução.....	55
3.2. Localização da Obra em Estudo/Enquadramento Geográfico	56
3.3. Enquadramento da Obra em estudo: P1EV	57

3.3.1.	Solução Preconizada da Estrutura Definitiva	58
3.3.2.	Solução Preconizada da Contenção Provisória	59
3.3.2.1.	Faseamento Construtivo	59
3.4.	Enquadramento da Obra em estudo: Túnel de Ligação TL1	61
4.	Contexto Geológico, Hidrogeológico, Estrutural e Geotécnico da Obra em Estudo	65
4.1.	Enquadramento Geográfico	65
4.2.	Enquadramento Geológico	65
4.3.	Enquadramento Hidrogeológico	66
4.4.	Enquadramento Geológico e Geotécnico	67
4.5.	Enquadramento Geológico-Geotécnico do Poço P1-EV e TL1	68
5.	Instrumentação e Monitorização da Frente de Obra em Estudo	75
5.1.	Introdução.....	75
5.2.	Plano de Instrumentação do Projeto	76
5.2.1.	Poço de Ventilação e Emergência- P1EV	76
5.2.2.	Túnel de Ligação e Edificações.....	78
5.2.3.	Leituras e Limites de Referência	79
6.	Análise da Monitorização Instalada na Frente de Obra em Estudo – Gráficos e Variação de Valores	85
6.1.	Introdução.....	85
6.2.	Estruturas Envolventes (Edifícios)	87
6.2.1.	E05A.....	89
6.2.2.	E06A.....	94
6.2.3.	E07A e E08A.....	100
6.2.4.	E10A.....	106
6.3.	Maciço Envolvente	111
6.3.1.	Poço de Ventilação e Emergência 1 (PEV01)	111
6.3.2.	Túnel de Ligação (TL1)	118
6.4.	Seções de Convergência/Contenção.....	124

6.4.1.	Poço de Ventilação e Emergência 1 (PEV01)	124
6.4.2.	Túnel de Ligação 1 (TL1)	131
6.5.	Síntese de Limites de Alerta e de Alarme	138
7.	Interpretação da Monitorização da Frente de Obra e Riscos Associados	143
7.1.	Introdução.....	143
7.2.	Avaliação de Risco de Danos em Edifícios.....	144
7.3.	Síntese de Deslocamentos Relevantes.....	146
7.3.1.	Edifícios Envolventes	146
7.3.1.1.	Edifício E06A e Fissurómetros.....	146
7.3.1.2.	Edifício E05A	147
7.3.2.	Maciço Envolvente.....	148
7.3.2.1.	Prismas de Pavimento.....	148
7.3.2.2.	Inclinómetro- INC1.....	148
7.3.2.3.	Piezómetros	148
7.3.1.	Prismas de Convergência do TL1	149
7.4.	Contribuição da Monitorização de Obras Subterrâneas.....	149
8.	Conclusões e Interpretações Futuras	153
9.	Referências.....	157
10.1.	Relatórios de Projeto	163
10.1.1.	Sequência Construtiva do TL1- Revestimento Primário.....	163
10.1.2.	Monitorização e Instrumentação de Casa da Música a Campo Alegre.....	163
10.1.3.	Instrumentação e Observação de P1EV- Contenção Provisória	163
10.1.4.	Avaliação de Risco de Danos em Edifícios.....	163
10.2.	Classificação de <i>Hoek et al.</i> (1994, 2007)	163
10.3.	Gráficos de Análise de Dispositivos de Instrumentação	163
10.3.1.	Clinómetro do Edifício E05A.....	163
10.4.	Cronograma de Instalação de Dispositivos de Instrumentação.....	163
10.5.	Tabelas Comparativas de Limites de Alarme e de Alerta	163

10.5.1.	Comparação de Limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação dos edifícios.....	163
10.5.2.	Comparação de limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação dos prismas de contenção e respetivas cordas	163
10.5.3.	Comparação de limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação do maciço	163

Lista de figuras

Figura 1- Janela inicial da plataforma SIGTUN do desenho da obra da Linha Rubi, do Metro do Porto (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	6
Figura 2- Fluxograma da organização dos capítulos.	9
Figura 3- Representação gráfica da linearidade de um dispositivo de instrumentação. (Silveira, 2013)	17
Figura 4- Representação gráfica da histerese de um dispositivo de instrumentação. (Silveira, 2013)	17
Figura 5- Métodos de piezómetros de tubo aberto (Bassett, 2012).....	21
Figura 6- Sonda de nível de água- Modelo EPP- 10/6, na esquerda. Na direita, modelo usado em campo.....	21
Figura 7- Piezómetro VW Standart, modelo 4500 SH da <i>Geokon</i>	23
Figura 8- Instalação de um piezómetro de corda vibrante.	23
Figura 9- Representação esquemática de um piezómetro pneumático (GEOSENSE, 2021).	24
Figura 10- Estação Total manual, manobrada por um técnico especializado (Hexagon, s.d.)....	27
Figura 11- Estação Total automatizada instalada numa torre, com alimentação elétrica através de um painel solar.	27
Figura 12- Alvo topográfico numa estrutura.....	28
Figura 13- Prisma topográfico em habitação.	29
Figura 14- Prisma topográfico com <i>L-bar</i>	29
Figura 15- À direita, prisma de pavimento ao lado de uma tampa de extensómetro. Na esquerda, prisma de 17,8mm.	30
Figura 16- Fissurómetro manual.	31
Figura 17- Fissurómetros automatizados.....	32
Figura 18- Princípio da operação de um inclinómetro. (Dunnicliff, 1988).....	32
Figura 19- Bobina de Bluetooth, e respetiva sonda inclinométrica.....	33
Figura 20- Medição com o torpedo (esquerda). Tubos inclinométricos dentro da armadura metálica de estaca moldada <i>in situ</i> (direita).	34
Figura 21- Sensor de corda vibrante (direita). Extensómetro, caixas e cabeçal PVC (esquerda).	35
Figura 22- Exemplo de um modelo <i>Strain Gauge</i>	36
Figura 23- Clinómetro em edifício.....	37
Figura 24- Clinómetro na horizontal, na cobertura de um edifício.....	37
Figura 25- Célula de carga em estaca e respetivos recetores de sinal.....	38
Figura 26- Sismógrafos em estruturas de edifícios.	39
Figura 27- Monitorização de secção de túnel com recurso a prismas e estação total (Strauss, <i>et al.</i> , 2020).....	45
Figura 28- Esquema dos principais dispositivos instalados num túnel, no maciço circundante e à superfície (Setpoint Technologies, 2025).	46
Figura 29- Traçado da Linha Rubi, juntamente com as respetivas estações e poços e a assinalação da obra em estudo (PEV01) (excerto de documentos de projeto).....	56
Figura 30- Localização do Poço P1EV e Túnel de Ligação TL1, da Linha Rubi do Metro do Porto, à escala 1:7500 (retirado de Google Earth Pro, no dia 16-03-25).....	57
Figura 31- Disposição vertical do P1EV (excerto).....	58
Figura 32- Sequência de construção do Túnel de Ligação 1 (excerto de documento de projeto).	62
Figura 33- Excerto da Carta Geológica de Portugal- 9-C, Porto (Carrington da Costa & Teixeira, 1957). A zona em estudo encontra-se assinalada a vermelho.	66
Figura 34- Rede hidrográfica e bacias hidrográficas no concelho do Porto (PDMP, 2018).	67

Figura 35- Excerto da Carta Geotécnica do Porto (CMP, 2003). A zona em estudo encontra-se assinalado a preto.	68
Figura 36- Excerto do Estudo Geológico e Geotécnico- Poço de Ventilação e Emergência 1 (PEV1), da fase de Projeto de Execução.....	69
Figura 37- Excerto do Estudo Geológico-Geotécnico, em fase de Projeto de Execução, do perfil do Túnel de Ligação 1 (TL1).....	70
Figura 38- Excerto da cartografia do PEV01, até ao Nível 7.....	71
Figura 39- Plano de Instrumentação do Poço P1EV (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA): Representações de cortes e em planta.....	77
Figura 40- Plano de Instrumentação do túnel mineiro de ligação ao P1EV (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	78
Figura 41- Edifícios na envolvente da obra e respetiva localização dos Prismas de Edifícios, Fissurómetros e Clinómetros (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	88
Figura 42- Esquema representativo da disposição de Prismas de Edifícios na junta dos edifícios E05A e E06A.	89
Figura 43- Edifício E05A e respetivos Prismas de Edifícios (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	90
Figura 44 - Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y, de Prismas de Edifícios, do E05A.....	92
Figura 45 - Média diária do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y, dos Prismas de Edifícios- PE03, PE04 e PE05 do E05A.....	93
Figura 46- Média semanal do deslocamento do eixo X/Y do Fissurómetro do E05A.	94
Figura 47- Edifício E06A e localização dos respetivos Prismas de Edifícios e Fissurómetro (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).	95
Figura 48- Média semanal do deslocamento vertical dos Prismas de Edifícios PE6 e PE11, do E06A.	96
Figura 49 - Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifícios do E06A.	97
Figura 50- Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifícios PE05 e PE06, do edifício E06A.	98
Figura 51- Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifício PE05/PE5 e PE06/PE6, dos edifícios E05A e E06A, respetivamente.	99
Figura 52- Média semanal da variação de origem do Fissurómetro automático na junta de dilatação dos E05A e E06A.	100
Figura 53- Edifícios E07A e E08A, respetivos Prismas de Edifícios e Clinómetros.	101
Figura 54- Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifícios do E07A.	102
Figura 55- Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifícios do E08A.	103
Figura 56- Média semanal da variação angular X, Y e Z do Clinómetro, dos edifícios E07A e E08A.	105
Figura 57- Edifícios E10A, respetivos Prismas de Edifícios, Clinómetro e Sismógrafo (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	106
Figura 58- Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifícios, do edifício E10A.	107
Figura 59- Média semanal da variação angular X, Y e Z do Clinómetro, do edifício E10A.....	108
Figura 60- Velocidade dos eixos X, Y, Z e a média diária da velocidade C, do Sismógrafo do edifício E10A.....	110
Figura 61- Envolvente do PEV01 e respetivos Piezómetros, Inclínómetros e Prismas de Pavimento (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).	111
Figura 62- Média semanal do nível MSNM do PZVW e da profundidade absoluta do PZ Manual.	113

Figura 63- Média semanal da variação à origem dos Prismas de Pavimento, da envolvente do PEV01.	114
Figura 64- Esquema representativo do processo de leitura de um inclinómetro.	115
Figura 65-Deslocamentos em profundidade da direção A e B, do INC01 e INC02.	117
Figura 66- Envolvente do túnel de ligação e respetivos Prismas de Pavimento, Extensómetros e um Inclinómetro (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	118
Figura 67- Esquema representativo da zona de influência de um extensómetro e um prisma de pavimento.	119
Figura 68- Média semanal da variação à origem, em mm, de Prismas de Pavimentos e Extensómetros, na envolvente do TL1.	121
Figura 69- Deslocamentos em profundidade da direção A e B, do INC1.	123
Figura 70- Exemplo da secção de convergência na cota de 82,50 metros, do P1EV (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	125
Figura 71- Gráficos da média semanal dos deslocamentos dos Prismas de Contenção do Nível 1- cota 82,50 metros.	126
Figura 72- Gráficos da média semanal dos deslocamentos dos Prismas de Contenção do Nível 2- cota 76,00 metros.	127
Figura 73- Gráficos da média semanal dos deslocamentos dos Prismas de Contenção do Nível 3- cota 72,00 metros.	128
Figura 74- Gráficos da média semanal dos deslocamentos dos Prismas de Contenção do Nível 4- cota 65,50 metros.	129
Figura 75- Gráficos da média semanal dos deslocamentos das Cordas dos Prismas de Contenção, nos quatro níveis.....	130
Figura 76- Localização do TL1 e respetivas secções de avanço (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	131
Figura 77- Esquema representativo da disposição de Prismas de Contenção e respetivas Cordas, tanto para um túnel piloto, como para o respetivo alargamento (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	132
Figura 78- Gráficos da média diária dos deslocamentos dos Prismas de Convergência na secção do Túnel de Ligação 0+003).	133
Figura 79- Gráficos da média diária dos deslocamentos dos Prismas de Convergência na secção do Túnel de Ligação (0+014).	134
Figura 80- Gráficos da média diária dos deslocamentos dos Prismas de Convergência na secção do Túnel de Ligação (0+023).	135
Figura 81- Gráficos da média diária dos deslocamentos dos Prismas de Convergência na secção do Túnel de Ligação (0+033).	136
Figura 82- Gráficos da média diária dos deslocamentos das Cordas dos Prismas de Convergência nas quatro secções do Túnel de Ligação.	137
Figura 83- Planta de avaliação de risco de danos em edifícios (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	144

[página propositadamente em branco]

Lista de tabelas

Tabela 1- Causas e medidas corretivas para os erros de medição (Silveira, 2013).	40
Tabela 2- Instrumentos e respetiva aplicação para a estrutura do túnel.....	47
Tabela 3- Instrumentos e respetiva aplicação para o maciço envolvente.....	47
Tabela 4- Instrumentos e respetiva aplicação para a superfície e estruturas adjacentes.....	48
Tabela 5-Classificação de risco de danos de Burland <i>et al.</i> (1977), (adaptado de Portugal <i>et al.</i> , 2006).	51
Tabela 6- Classificação de risco de danos de Rankin (1988), (adaptado de Portugal <i>et al.</i> , 2006).	51
Tabela 7- Medidas a adotar relativamente ao tipo de dano (Portugal, et al., Julho de 2006). ..	52
Tabela 8- Características geométricas gerais do PEV01.	58
Tabela 9- Quantidade de dispositivos e respetiva simbologia no PEV01.	78
Tabela 10- Dispositivos de instrumentação, respectivas quantidades e simbologia.....	79
Tabela 11- Frequência de leituras para o túnel mineiro de ligação ao P1EV (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	80
Tabela 12- Limites de alerta e de alarme dos dispositivos de instrumentação dos edifícios, em projeto (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	81
Tabela 13- Limites de alerta e de alarme, em projeto (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	82
Tabela 14- Eventos relevantes da obra em estudo.....	87
Tabela 15- Limites de alarme e de alerta dos deslocamentos dos Prismas de Edifícios - PE03, PE04 e PE05, do E05A.....	91
Tabela 16- Limites de alerta e de alarme dos dispositivos de instrumentação dos edifícios. ..	138
Tabela 17- Limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação dos prismas de contenção e respetivas cordas.....	138
Tabela 18- Limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação do maciço.	139
Tabela 19- Categoria de dano, segundo o respetivo tipo e medidas a adotar, em projeto.	145
Tabela 20- Categoria e tipo de dano, definido em projeto (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).....	146

[página propositadamente em branco]

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

BRA	<i>Building Risk Assessment</i>
CLI	Clinómetro
EMI	<i>Eletromagnetic Induction</i>
EXT	Extensómetro
FISS	Fissurómetro
GSI	<i>Geological Strength Index</i>
HAE	<i>High Air Entry</i>
INC	Inclinómetro
NATM	<i>New Austrian Tunneling Method</i>
P1EV/PEV01	Poço de Emergência e Ventilação 1
PE	Prisma de Edifício
PC	Prisma de Convergência/Contenção
PP	Prisma de Pavimento
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
PZ	Piezómetro
PZVW	<i>Piezometer with Vibrating Wire</i>
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
SIS	Sismógrafo
TL1	Túnel de Ligação 1

[página propositadamente em branco]

Capítulo I

Introdução

[página propositadamente em branco]

1. Introdução

1.1. Enquadramento Geral

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito da unidade curricular de “Dissertação/Estágio/Projeto”, do 2º ano do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente (MEGG), do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). O presente trabalho tem como formato um estágio de curta duração de 4 meses, na empresa Grupo ACA, no âmbito da empreitada da Linha Rubi do Metro do Porto, no domínio da instrumentação geotécnica de uma frente de obra.

A presente análise partilha os dados adquiridos, no âmbito da referida empreitada, pela empresa de instrumentação e monitorização subcontratada, a Applus+.

Os túneis são grandes obras de engenharia que atravessam materiais naturais de grande diversidade geológica, geotécnica e hidrológica e que têm a particularidade de exigir a lidar com um grau de desconhecimento muito significativo das ações que a construção terá de suportar. Estes consistem numa das obras mais essenciais para o desenvolvimento de um país, pois aproximam pessoas, libertam a superfície para outras ocupações, encurtam distâncias, transpõem obstáculos e poupam vidas, tornando as estradas e as vias-férreas mais seguras.

Os túneis facilitam o transporte público nos grandes núcleos urbanos, podem ser ecológicos e melhoram a qualidade de vida das cidades. Têm igualmente um papel importante na distribuição da água potável e na recolha das águas pluviais e no saneamento, entre outras infraestruturas; potenciam o aproveitamento da energia hídrica; transportam a água para irrigação; permitem a ocupação do espaço subterrâneo para as mais diversas utilizações e contribuem para a exploração de recursos naturais (Pistone & Pinto da Cunha, 2014).

Para a otimização e segurança de qualquer operação que envolva obras subterrâneas em ambiente urbano é fundamental investir em programas de instrumentação e monitorização, pois permitem a verificação do comportamento estrutural, e aferir os pressupostos definidos em fase de projeto, em conformidade com os limites de referência e na emissão de alertas antecipados perante efeitos adversos induzidos pelas atividades construtivas (Dunnicliff, 1988).

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo aprofundar a análise da instrumentação e da monitorização geotécnica aplicadas a obras subterrâneas, com ênfase no respetivo papel como ferramenta fundamental para a verificação das hipóteses de projeto, a deteção precoce de comportamentos anómalos e a mitigação de riscos associados à instabilidade do maciço e das estruturas envolventes.

Sendo assim, os principais objetivos incluem: a compreensão dos critérios de seleção dos diferentes dispositivos de instrumentação, do seu posicionamento e da sua calibração; a interpretação das medições obtidas e a avaliação do impacto da qualidade dos dados na segurança e na eficiência de uma obra.

No contexto particular do presente trabalho, analisa-se o caso concreto da instrumentação e da monitorização da envolvente de um poço de emergência e de ventilação, integrado numa infraestrutura subterrânea, e do túnel de ligação entre o poço e o túnel de via. No que foi possível constatar, antes do início dos trabalhos de escavação e durante o impacto da obra em construção, que as leituras dos dispositivos da instrumentação instalados no local foram influenciadas por outra obra subterrânea em curso nas imediações.

1.3. Metodologias e Técnicas

A metodologia adotada pela empreitada na implementação de um plano de instrumentação geotécnica na frente de obra em análise segue uma abordagem sistemática e progressiva, desde a seleção dos dispositivos até à interpretação dos dados recolhidos. As etapas principais do plano são as seguintes:

- I. Análise do plano de instrumentação definido em Projeto e a sua adequabilidade à realidade:** conhecido o plano de instrumentação definido em projeto procede-se a uma

visita ao local no sentido de adequar os dispositivos pretendidos no local, definido às condições reais.

- II. **Propostas de fichas técnicas dos dispositivos de instrumentação:** esta fase inclui a recolha de fichas técnicas dos dispositivos de instrumentação selecionados, com base em parâmetros geotécnicos a monitorizar e nas especificações técnicas definidas no caderno de encargos.
- III. **Elaboração de um procedimento de instrumentação e monitorização:** é definido um procedimento técnico que descreve as características técnicas de cada dispositivo, o processo de instalação dos dispositivos, a sua localização específica, a frequência de leituras e a equipa responsável pela recolha e registo dos dados, bem como a apresentação dos resultados.
- IV. **Autorizações para dar início aos trabalhos de instrumentação:** nesta etapa, está prevista a coordenação com as várias entidades envolvidas, isto é, o dono da obra, a fiscalização, o projetista e a entidade executante, de modo a garantir as aprovações e/ou licenças necessárias para que a instrumentação se articule com o plano dos trabalhos em curso. Nesta fase são abordadas questões logísticas de acesso, segurança no trabalho e compatibilidade com outros equipamentos ou frentes de obra.
- V. **Instrumentação geotécnica:** na fase de instrumentação, procede-se à instalação dos dispositivos no terreno, de acordo com as respetivas especificidades técnicas e com o plano de instrumentação definido, previamente confirmado quanto à sua adequabilidade no local.
- VI. **Monitorização geotécnica:** após a instalação dos dispositivos, inicia-se a fase de recolha sistemática de dados, em que os registos poderão ser automatizados ou manuais, com frequência diária, semanal ou consoante os eventos de obra. Todos os dados são organizados em bases de dados e apresentados numa plataforma de gestão de dados concebida para o efeito.
- VII. **Análise e interpretação das leituras:** esta fase consiste na análise dos dados recolhidos e visualizados na plataforma. No caso em estudo, a análise dos dados é efetuada no SIGTUN (Figura 1) que se traduz num sistema de Informação Geográfica (SIG) e onde se encontram compilados, de forma numérica e gráfica, os dados resultantes das leituras dos dispositivos de instrumentação previamente instalados no terreno; e também onde está representado o traçado da obra e a localização dos dispositivos instalados, mediante a cartografia digitalizada (coordenadas UTM). Na interpretação dos dados

recolhidos, procede-se à comparação com valores teóricos, com os limites de referência definidos em fase de projeto e com os valores efetivamente medidos nos diferentes dispositivos.

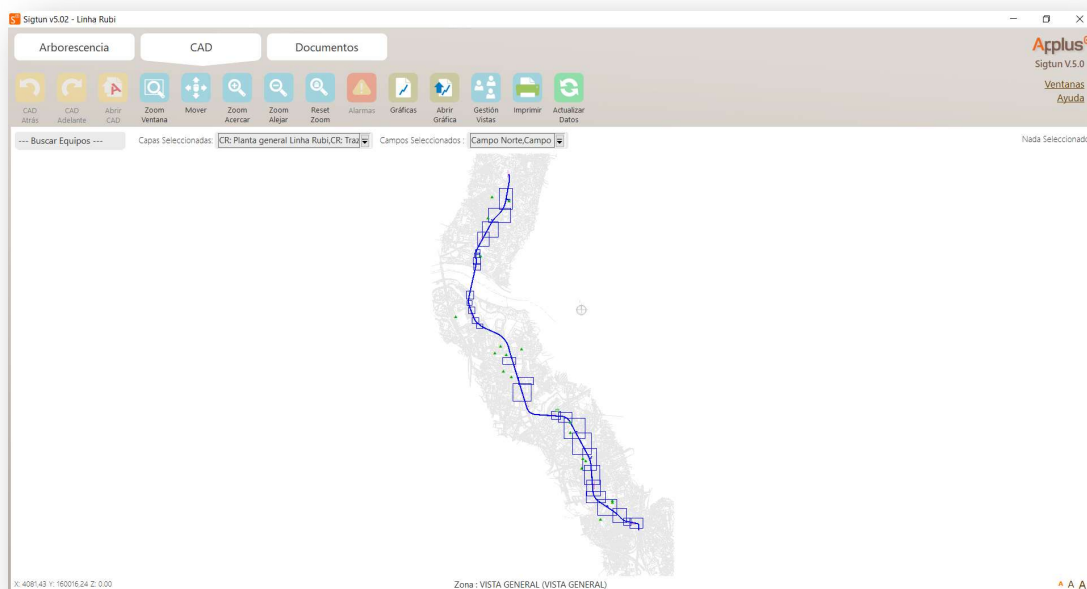


Figura 1- Janela inicial da plataforma SIGTUN do desenho da obra da Linha Rubi, do Metro do Porto (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

1.4. Cronogramas de Trabalhos

O presente trabalho iniciou-se formalmente em abril de 2025, com uma fase inicial dedicada à recolha e à compilação de bibliografia, bem como de documentação técnica, nomeadamente de elementos do projeto e da instrumentação geotécnica presentes na área de estudo em análise.

No mês de maio foi realizado o acompanhamento da equipa de instrumentação e a recolha de imagens dos trabalhos de instrumentação e monitorização da área em estudo, bem como da obra no geral, isto é, as frentes de obra da linha Rubi do Metro do Porto, em colaboração com a equipa de geólogos da ACA e a equipa especializada em instrumentação geotécnica da empresa Applus+.

Durante o período subsequente, os trabalhos foram realizados de forma remota, com o apoio da equipa técnica envolvida no projeto, com foco no tratamento e na organização da informação

compilada, para que fosse possível realizar a análise e a interpretação das leituras obtidas pelos dispositivos de instrumentação geotécnica e formular as respetivas conclusões fundamentadas.

1.5. Organização da Dissertação

Este subcapítulo apresenta a organização dos capítulos que compõem a presente dissertação, destacando os principais conteúdos e objetivos. Após a introdução e o enquadramento geral, o tema tratado prossegue da seguinte forma:

O **Capítulo 2 - (Conceitos Fundamentais de Instrumentação/Monitorização e Controlo Geotécnico em Obras Subterrâneas)** - aborda as generalidades da instrumentação geotécnica e as etapas do plano de instrumentação, desde os objetivos de monitorização até à seleção dos dispositivos mais adequados.

Os instrumentos são igualmente caracterizados por grandezas físicas (poropressão, deslocamentos, deformações, tensões, temperatura, entre outras) e, com isso, procede-se à enumeração e descrição dos tipos de instrumentação.

Posteriormente, são apresentados a caracterização de um plano de monitorização e os principais tipos e analisada a sua aplicação em diferentes fases de obra.

Neste capítulo, igualmente, é apresentada uma abordagem específica à monitorização de obras subterrâneas e, por fim, é referido o método de Avaliação de Risco de Danos em Edifícios.

O **Capítulo 3 - (Enquadramento Geral da Obra em Estudo)** - inclui a descrição genérica da obra geral em estudo no âmbito da futura Linha Rubi do Metro do Porto e com o respetivo enquadramento geográfico, tal como, a descrição geométrica e estrutural do Poço de Emergência e Ventilação (P1EV), entre o troço da Casa da Música e o Campo Alegre, e do Túnel de Ligação (TL1), entre o poço e o túnel de via.

No **Capítulo 4 - (Contexto Geológico, Hidrogeológico, Estrutural e Geotécnico da Obra em Estudo)** - tal como o título refere, é realizado um enquadramento geológico, hidrogeológico, estrutural e geológico-geotécnico da área em estudo.

O **Capítulo 5 - (Instrumentação e Monitorização da Frente de Obra em Estudo)** - foca na introdução da informação sobre a instrumentação do projeto, bem como a sua respetiva localização e quantidade.

O **Capítulo 6 - (Análise da Monitorização da Frente de Obra em Estudo- Gráficos e Variação de Valores)** – descreve o tratamento e representação gráfica dos dados recolhidos, apresentados

na plataforma SIGTUN. A análise é realizada segundo a frente de obra, o PEV01 e o Túnel de Ligação 1, em que são avaliados a envolvente, correspondendo aos edifícios adjacentes, o maciço e a própria obra em construção.

A análise temporal está relacionada aos eventos construtivos relevantes da obra (execução das estacas de contenção do poço, escavação do poço e escavação do túnel de ligação), permitindo avaliar a evolução dos parâmetros medidos ao longo de cada fase da obra.

O **Capítulo 7 – (Interpretação da Monitorização da Frente de Obra e Riscos Associados)** – introduz os riscos calculados pelo método de Avaliação de Risco de Danos em Edifícios aplicado em projeto. Também é realizada uma análise crítica dos resultados apresentados no capítulo anterior, relacionando-os às possíveis causas e às implicações para a segurança das estruturas envolventes e da obra. E, por fim, sintetiza-se a contribuição da monitorização em obras subterrâneas.

Por último, o **Capítulo 8 - (Conclusões)** – sintetiza os principais resultados obtidos ao longo do trabalho, ao evidenciar a relevância da monitorização geotécnica na gestão de risco em obras subterrâneas. São enunciadas as conclusões mais significativas da análise desenvolvida, bem como sugestões para trabalhos futuros ou melhorias na abordagem à instrumentação em projetos similares.

MONITORIZAÇÃO E CONTROLO GEOTÉCNICO EM OBRAS SUBTERRÂNEAS: APLICAÇÃO DE UM CASO CONCRETO



Figura 2- Fluxograma da organização dos capítulos.

[página propositadamente em branco]

Capítulo II

Conceitos Fundamentais de Instrumentação/Monitorização e Controlo Geotécnico em Obras Subterrâneas

[página propositadamente em branco]

2. Conceitos Fundamentais de Instrumentação/Monitorização e Controlo Geotécnico em Obras Subterrâneas

2.1. Introdução

A instrumentação e monitorização geotécnica na engenharia representa uma integração entre as capacidades técnicas dos instrumentos de medição e as competências analíticas e decisivas dos profissionais envolvidos no decorrer dos trabalhos e, por vezes, na fase de operação.

Podemos considerar nos dispositivos de instrumentação duas categorias gerais:

- Os que determinam *in situ* as propriedades da rocha ou do solo, como por exemplo: a força, compressibilidade e permeabilidade, propriedades determinadas na fase de elaboração do projeto;
- E os que monitorizam o desempenho nas fases de construção e de operação de um projeto, que compreendem as seguintes medições: pressão de água subterrânea, tensão total, deformação, carga ou tensão (Dunnicliff, 1988).

O desenvolvimento da instrumentação geotécnica como ferramenta de apoio às observações de campo teve origem entre as décadas de 1930 e 1940. Desde então, a evolução tecnológica tem desempenhado um papel fundamental na eficácia, na complexidade e na sofisticação dos sistemas de instrumentação geotécnica, destacando-se a crescente utilização de instrumentos equipados com transdutores elétricos e pneumáticos (Dunnicliff, 1988).

Em projetos geotécnicos, cada instrumento deve ser cuidadosamente selecionado e posicionado para responder a uma questão técnica específica. A instrumentação apenas se justifica quando há uma finalidade clara, frequentemente relacionada a desafios geotécnicos emergentes nas fases de projeto, construção ou operação (Dunnicliff, 1988).

2.2. Plano de Instrumentação

Segundo Dunnicliff (1988), o planeamento deve, se possível, antes que a instalação da instrumentação seja iniciada, contemplar as seguintes etapas:

- 1) Definição das condições do projeto;
- 2) Prever mecanismos que controlem o comportamento;
- 3) Definição das questões geotécnicas e dos objetivos da instrumentação;
- 4) Seleção dos parâmetros a serem monitorizados;
- 5) Prever magnitudes de mudanças;
- 6) Planeamento de ações corretivas;
- 7) Atribuição de tarefas nas fases de projeto, construção e operação;
- 8) Seleção de dispositivos de instrumentação;
- 9) Seleção da localização dos dispositivos de instrumentação;
- 10) Registo de fatores que influenciem os dados registados;
- 11) Estabelecimento de procedimentos básicos que assegurem a precisão das leituras;
- 12) Lista de especificações e materiais de cada instrumento;
- 13) Orçamento;
- 14) Planeamento da instalação;
- 15) Manutenção periódica e eventual calibração;
- 16) Planeamento de etapas desde a aquisição até os relatórios;
- 17) Orçamento Atualizado.

2.2.1. Características dos Dispositivos de Instrumentação

Neste subcapítulo estão apresentadas as principais características dos dispositivos de medição e o seu conceito básico (Dunnicliff, 1988).

a) Conformidade

Em condições ideais, um dispositivo não deve alterar o valor do parâmetro a ser medido. Se o dispositivo alterar o valor, refere-se a que o dispositivo apresenta baixa conformidade. Tendo como exemplo: os extensómetros fixos para furos de sondagem devem ser selados ao maciço, de modo que não inibam a deformabilidade do solo ou da rocha.

Para obter um alto grau de acuidade, deve haver conformidade.

b) Acuidade

A acuidade representa o grau de aproximação de uma medida em relação ao valor real (absoluto) da grandeza medida, ou seja, é sinónimo de grau de exatidão. A acuidade de um instrumento é avaliada durante a respetiva calibração, quando o valor verdadeiro é aquele indicado por um instrumento cuja acuidade é verificada e ajustada ao valor-padrão.

A acuidade é expressa como um valor $\pm$, tal como ± 1 mm ou $\pm 1\%$.

A acuidade especificada indica que o valor medido irá adequar-se ao valor absoluto dentro do intervalo estabelecido, ao longo do campo total de leitura, e das condições operacionais especificadas.

Quando se seleciona um dispositivo com uma acuidade apropriada, todo o sistema deve ser considerado, incluindo a acuidade de cada um dos componentes e de cada fonte de erro.

c) Precisão

A precisão representa a aproximação de cada número de uma série de medições similares em relação à média aritmética.

É expressa como $\pm$ um (número), desse modo $\pm 1,00$ indica maior precisão do que $\pm 1,0$. Se o dispositivo permite uma medida com três algarismos não garante que tenha acuidade, logo o registo de uma medida deve refletir a precisão do dispositivo.

d) Resolução

A resolução é a menor divisão no mostrador do dispositivo de instrumentação. É a menor variação do parâmetro medido, que pode ser detetada pelo dispositivo, sendo muitas vezes menor que a precisão e a acuidade do dispositivo. Nunca deve ser expressa como $\pm$ um valor.

Em alguns casos, pode ser possível e conveniente se interpolar entre divisões do mostrador, mas dever-se-á considerar que essa interpolação é subjetiva e não aumenta a resolução do dispositivo de instrumentação.

e) Campo de Leitura

O campo de leitura especifica o maior e o menor valor que o dispositivo de instrumentação está projetado para medir. Os valores a serem medidos devem estar contidos no campo-limite do instrumento.

Caso o limite seja ultrapassado, implica o risco de danificação imediata do dispositivo, o que deve ser evitado num projeto bem concebido.

f) *Span* (Amplitude)

O *span* representa a diferença algébrica entre a leitura mínima e máxima que pode ser realizada pelo dispositivo de instrumentação, isto é, entende-se pela diferença aritmética entre o menor e o maior valor-limite.

Por exemplo:

- Campo de leitura: -25°C a +70°C, span= 95°C.
- Campo de leitura: 0 kPa a 110 kPa, span= 110 kPa.

g) Repetibilidade

A repetibilidade é o ajuste na concordância de um número de medições consecutivas, uma com a outra, sob as mesmas condições de operação.

É expressa em unidades de engenharia, tal como 1 mm, ou como uma percentagem de amplitude (*span*).

h) Linearidade

Um dispositivo de instrumentação é classificado como linear se os valores indicados pelas medições forem diretamente proporcionais à quantidade que é medida.

A representação gráfica da correlação entre os valores indicados e os valores atuais é ligeiramente curva, devido às limitações do dispositivo, conforme se constata na Figura 3.



Figura 3- Representação gráfica da linearidade de um dispositivo de instrumentação. (Silveira, 2013)

i) Histerese

A histerese ocorre quando a medida está sujeita a variações cíclicas, em que o valor depende, algumas vezes, da correspondência com o ramo ascendente ou descendente do ciclo de carga. Normalmente, é causada pelo atrito ou condições de deformação de um material não elástico, como, por exemplo, um maciço rochoso, cujo resultado poderá refletir-se nas leituras de uma célula de carga para tirantes, no deslocamento de um pêndulo direto, etc. Dispositivos de instrumentação com grande histerese não são apropriados para a medição de parâmetros submetidos a variações cíclicas ou frequentes de carga.

A separação entre as duas curvas é a medida da histerese, como se verifica na Figura 4.



Figura 4- Representação gráfica da histerese de um dispositivo de instrumentação. (Silveira, 2013)

j) Sinal de Saída (*Output Signal*)

O sinal de saída representa o sinal eletrônico produzido pelo dispositivo de instrumentação e determina como será lido.

O sinal analógico mais comum e resistente é do tipo voltagem DC (tensão de corrente contínua, a um valor fixo de 12 V ou 5 V), corrente elétrica DC e frequência.

k) Constante de Tempo

Para o sinal de saída de um sistema de primeira ordem, ao qual é aplicado um incremento no sinal de entrada, a constante é o tempo necessário para completar 63,2% da elevação ou queda do sinal.

l) *Bias*

Bias representa a média indicada pela medição de uma variável, resultante de um número infinito de medições subtraído o valor atual da variável.

m) Curva de Calibração

A curva de calibração é uma representação gráfica dos valores medidos em função dos valores teóricos da grandeza medida.

n) Fator Escala

O fator de escala é o número pelo qual o sinal de saída (output signal), medido em milivolts (mV), é polinomial, etc.

Número que deverá ser multiplicado para obter a ordem de grandeza real da variável medida.

o) Ruído

O ruído é um termo usado para designar variações de medida incertas causadas por fatores externos, o que gera falta de precisão e acuidade.

A resolução de um dispositivo de instrumentação, ou seja, a menor variação do parâmetro que pode ser medida pelo dispositivo, depende do campo de leitura, por isso, quanto maior o campo de leitura, menor será a sua resolução.

O campo de leitura dos dispositivos de instrumentação nunca deve ser inferior aos valores máximos previstos, para evitar risco de danificação do dispositivo. Porém, não deve ser muito superior aos valores máximos medidos, para que pequenas variações sejam relatadas com maior precisão.

2.2.2. Tipos de Dispositivos de Instrumentação

Os dispositivos de instrumentação podem ser caracterizados segundo as grandezas que se pretende observar e monitorizar, as quais devem ser cuidadosamente definidas durante a fase de projeto (Dunnicliff, 1988), sendo que as principais grandezas a considerar incluem:

- Poropressão;
- Deslocamentos superficiais/do terreno, horizontais e verticais;
- Deformações internas no solo ou na rocha;
- Tensões em estruturas de suporte e elementos de contenção;
- Nível freático;
- Vibrações.

Cada uma das grandezas referidas acima requer o uso de dispositivos específicos, cuja seleção deve corresponder a critérios de precisão, fiabilidade, robustez e compatibilidade com as condições de campo.

2.2.2.1. Poropressão e Nível Freático

A medição da pressão neutra, da poropressão ou da pressão intersticial constitui um dos elementos essenciais na instrumentação geotécnica, dado que representa um papel determinante na avaliação de estabilidade de taludes, fundações, estruturas de contenção e escavações subterrâneas.

A poropressão corresponde à pressão exercida pela água nos poros do solo ou da rocha, sendo um fator crítico para a definição da tensão efetiva (σ'), de acordo com a seguinte equação:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

Onde:

- σ' é a tensão efetiva;
- σ é a tensão total;
- u é a pressão neutra.

A tensão efetiva é responsável pela resistência ao corte do solo, pelo que alterações que ocorrem nos níveis de poropressão podem influenciar diretamente a estabilidade de uma obra geotécnica.

A medição desta grandeza é realizada através de piezómetros, concebidos para registar variações de pressão de água nos poros do solo.

Para escolher o tipo de piezómetro é necessário ter em conta os seguintes elementos: leituras automáticas ou manuais, performance, comprimento do cabo, duração das medidas e da preferência do técnico.

Segundo o guia técnico *Piezometers In-Depth*, da GEOSENSE (2021), estes dispositivos podem ser classificados, tendo em conta o sistema, em duas grandes categorias:

- Piezómetro Aberto: a água está em contacto direto com a atmosfera. O tubo piezométrico é usado para ter acesso ao nível de água e o dispositivo de medição é um medidor de nível de água e um transdutor de pressão dentro do tubo;
- Piezómetro Fechado: a água não está em contacto direto com a atmosfera. O dispositivo de medição é, normalmente, um transdutor de diafragma enterrado no solo. A deflexão do diafragma é medida por meio de piezómetros elétricos, pneumáticos, de fibra ótica ou hidráulicos.

a) Piezómetro de Tubo Aberto ou Casagrande

O piezómetro de Casagrande ou *Standpipe Piezometer*, consiste num tubo plástico, com uma extremidade inferior perfurada e rodeada por um filtro, instalado num furo em contacto com o terreno (Figura 5).

O nível da água que se estabiliza no interior do tubo reflete a pressão de poros no ponto de medição. A leitura é feita com dispositivos manuais, como sondas de nível de água (Figura 6).

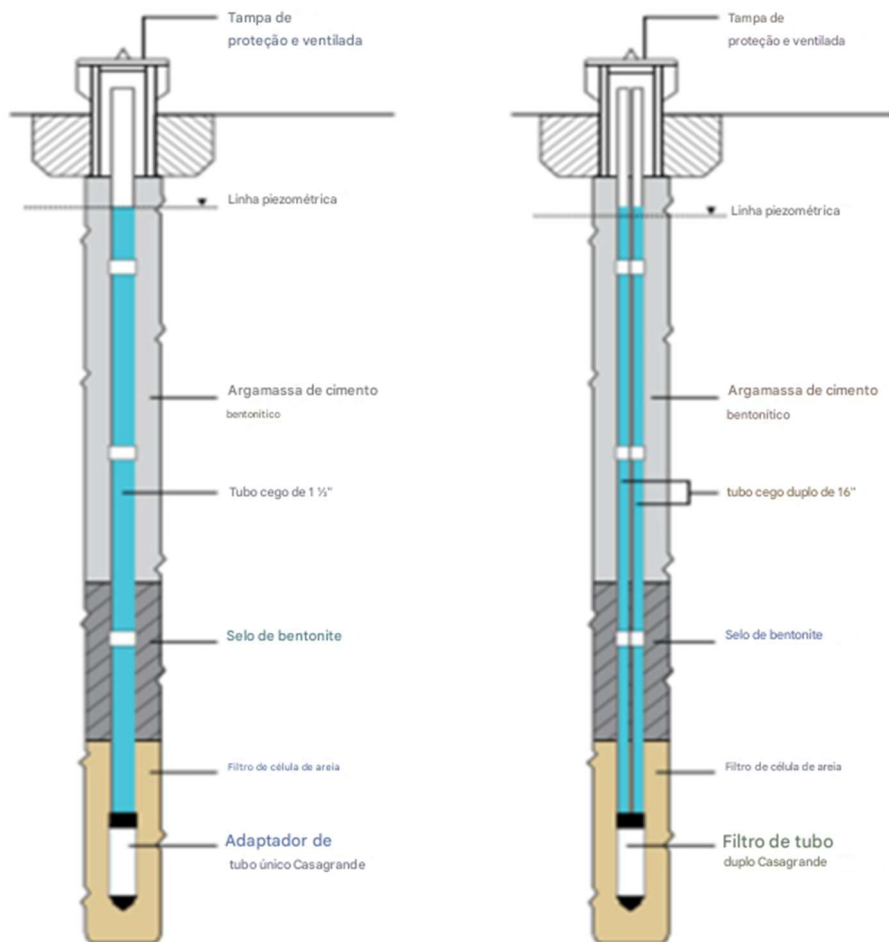


Figura 5- Métodos de piezômetros de tubo aberto (Bassett, 2012).



Figura 6- Sonda de nível de água- Modelo EPP- 10/6, na esquerda. Na direita, modelo usado em campo.

Caraterísticas:

- Baixo preço, seguro e preciso;
- Fácil leitura, com áudio ou sinais visuais de LED verdes;
- Portátil, leve e fácil de transportar;
- Cabo plano com fita graduada de aço, sendo assim, de alta resistência à tração, praticamente não expansível, à prova de água e resistente à corrosão;
- Graduações de fita disponíveis em metros com resolução de 1 mm ou em pés com resolução padrão de 0,1”.

Aplicação:

- Medição do nível de água em tubos verticais, piezómetros de Casagrande, furos de sondagem e poços;
- Medição do nível de água subterrânea em furos de sondagem próximos a barragens, rios, edifícios altos, fábricas e áreas residenciais;
- Ideal para a monitorização simples do nível de água subterrânea.

b) Piezómetro de Corda Vibrante (VW- *Vibrating Wire*)

O piezómetro de corda vibrante funciona através de um mecanismo que consiste num fio de aço tensionado, um diafragma e uma bobina eletromagnética. Corresponde ao piezómetro mais amplamente utilizado atualmente na engenharia geotécnica (Figura 7).

O sensor (Figura 8) é constituído por uma cápsula com diafragma instalada no solo e ligada à superfície por tubagem dupla. Quando há um aumento de pressão, o diafragma deflete reduzindo a tensão no fio, que se encontra tracionado. De seguida, a bobina induz a vibração do fio, cuja frequência gerada é transmitida por cabos elétricos até ao aparelho de leitura. Este sinal pode ser enviado a distâncias até 2km, sem perdas de qualidade nem influência da resistência do cabo. Além disso, o sinal é totalmente imune à presença de humidade.

A corda vibrante presente nos sensores pode também ser instalada em vários conjuntos a profundidades distintas no mesmo furo de sondagem, designado assim por *piezómetro Multi-Point* (VW), que permite o registo simultâneo de pressões ao longo de um perfil vertical.



Figura 7- Piezômetro VW Standart, modelo 4500 SH da Geokon.



Figura 8- Instalação de um piezômetro de corda vibrante.

Benefícios:

- Elevada estabilidade a longo prazo;
- Leitura digital de elevada precisão;

- Resistência a interferências eletromagnéticas;
- Compatível com leituras automáticas (*data loggers*);
- Adequado para grandes profundidades e ambientes agressivos;
- Permite instalação pelo método *fully grouted*.

Limitações:

- Requer a leitura com um equipamento específico;
- Necessidade de calibração com folha técnica, por fatores de conversão;
- Pode ser afetado por variações térmicas se não forem compensadas.

c) Piezômetro Pneumático

O piezômetro pneumático funciona na base do equilíbrio de pressões entre o fluido do solo e um gás, geralmente azoto ou ar comprimido.

O tubo é selado com uma rolha de bentonite num furo. Os tubos gémeos fazem a ligação entre o piezômetro e o terminal à superfície. As leituras são obtidas através de um manómetro pneumático.

Tal como se observa no esquema representativo da Figura 9, o dispositivo é constituído por um diafragma, que funciona como uma válvula que é acionado com a pressão da água e do gás, o qual se encontra dentro dos tubos gémeos.

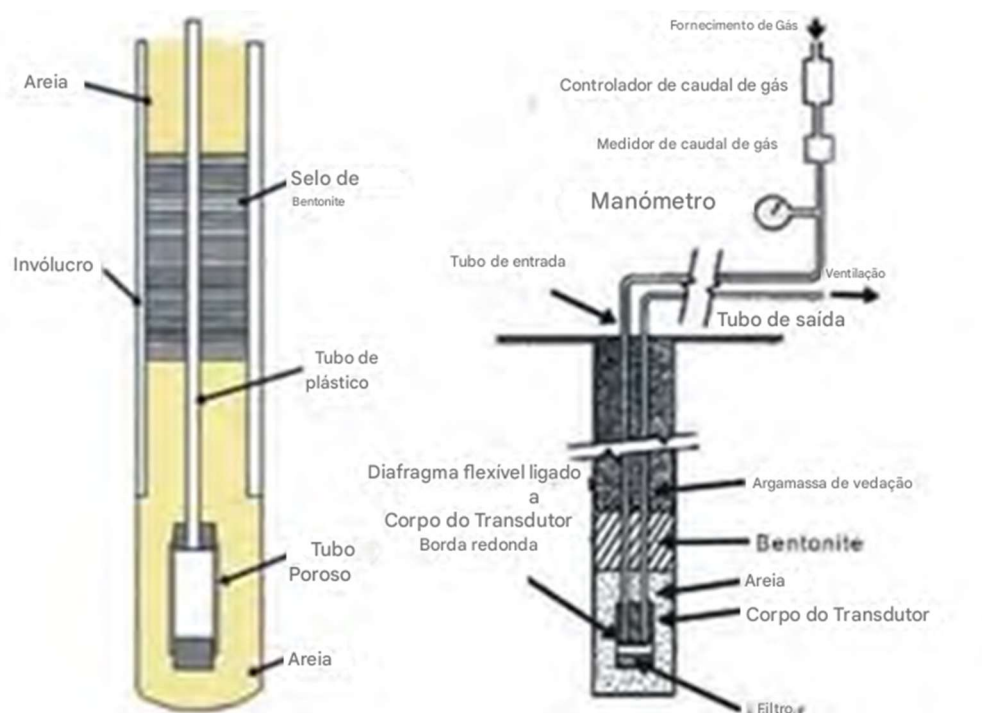


Figura 9- Representação esquemática de um piezômetro pneumático (GEOSENSE, 2021).

Vantagens:

- Resposta rápida, adequada para solos de baixa permeabilidade;
- Boa resistência em ambientes difíceis;
- Leitura independente de cablagem elétrica, imune a interferências eletromagnéticas (EMI).

Limitações:

- Requer equipamento específico para pressurização;
- Mais trabalhoso para leituras manuais frequentes;
- A precisão pode ser afetada por variações de temperatura ou fugas na tubagem.

d) Piezómetro Hidráulico

O piezómetro hidráulico consiste num sistema fechado em que há um sensor cerâmico poroso (célula de medição), ligado à superfície por dois tubos cheios com água desareada, isto é, água com gases dissolvidos removidos.

A pressão da água no solo é transmitida através do sensor para o líquido no tubo, sendo lida com manómetros de coluna líquida ou transdutores.

Vantagens:

- Alta sensibilidade;
- Útil para solos muito coesivos;
- Permite a medição de pressões negativas, com filtros HAE (*High Air Entry*).

Desvantagens:

- Instalação complexa e sensível à presença de ar;
- Pouco uso atual, devido à exigente manutenção;
- Requer total saturação do sistema e cuidados de desareação.

e) Piezómetro de Fibra Ótica

Este piezómetro baseia-se na variação da intensidade ou do tempo de propagação da luz dentro de fibras óticas sensíveis à deformação causada pela pressão.

É um piezómetro que tecnologicamente tem vindo a crescer, para ambientes onde se exige resistência à interferência eletromagnética e leituras distribuídas ao longo de grandes extensões.

Vantagens:

- Ideal para ambientes com elevados níveis de ruído eletromagnético;
- Possibilidade de leitura em tempo real;
- Tecnologia promissora para monitorizações distribuídas, como por exemplo, em longos túneis, barragens, etc.

Desvantagens:

- Custo elevado;
- Menor disponibilidade no mercado;
- Requer equipamento de leitura especializado e técnico altamente qualificado.

2.2.2.2. Deformações internas no solo ou na rocha e deslocamentos superficiais/do terreno - horizontais e verticais

I. Métodos topográficos

Os métodos topográficos são utilizados para as seguintes medições: deformações horizontais, isto é, deslocamentos laterais em taludes ou estruturas de contenção; deformações verticais, associadas a fenómenos de assentamentos ou levantamento do terreno; e deformações superficiais, correspondentes a alterações medidas à superfície do terreno ou da estrutura.

a) Estação Total

Para executar as medições topográficas são usados equipamentos do tipo Estação Total que tem como objetivo alcançar a melhor precisão possível. As medições devem ser executadas com o método de estação fixa com três pontos de referência ou com o método de estação com cinco pontos de referência, localizados fora da zona de influência da obra. As leituras podem ser executadas manualmente (Figura 10) ou de forma automatizada (Figura 11).



Figura 10- Estação Total manual, manobrada por um técnico especializado (Hexagon, s.d.).



Figura 11- Estação Total automatizada instalada numa torre, com alimentação elétrica através de um painel solar.

b) Alvo Topográfico

Os alvos topográficos (Figura 12) permitem a identificação de possíveis deslocamentos/assentamentos ocorridos em paredes e estruturas adjacentes durante a execução da obra ou da escavação, bem como das deformações dos edifícios adjacentes através das suas fachadas. As leituras são realizadas segundo as direções X, Y e Z de uma estrutura.



Figura 12- Alvo topográfico numa estrutura.

c) Prisma Topográfico

Os prismas topográficos (Figura 13), também conhecidos e utilizados como prismas de nivelamento e prismas de convergência, apresentam o mesmo objetivo dos alvos topográficos, mas têm como suporte estruturas fixas.

Estes prismas possibilitam a leitura em três direções ortogonais entre si e consistem num alvo feito de um material refletor, um prisma ótico de 25,4 mm de diâmetro, que devolve o sinal enviado pela estação total e, geralmente, apresenta uma caixa exterior em alumínio e a fixação mediante resina epóxi ou parafusos.

As barras de verificação são colocadas mediante a perfuração e consequente cimentação com resina ou caldas de cimento nas vigas de coroamento.

Os prismas de convergência são instalados através de perfuração e ancoragem mecânica.



Figura 13- Prisma topográfico em habitação.

No caso de montagens em fachadas de metal é recomendável utilizar na instalação um prisma com *L-bar* (Figura 14). O deslocamento deste prisma depende da posição da montagem, tem um formato circular de diâmetro de 25,4mm e é recoberto de cobre e uma amplitude altimétrica de 2000 metros.



Figura 14- Prisma topográfico com *L-bar*.

Nas secções de convergência de escavações subterrâneas, a instalação dos prismas deve ocorrer imediatamente após a execução do revestimento. No caso de contenções em obras a céu aberto, os prismas devem ser colocados após se atingir a cota prevista no projeto.

As leituras das secções de convergência e dos prismas instalados nas contenções das obras a céu aberto deverão ser efetuadas antes do início da escavação. Para os prismas instalados nos edifícios existentes, as leituras iniciais deverão ser realizadas no mês anterior ao início das obras com um mínimo de quatro unidades, em diferentes dias, com intervalos divididos o mais uniformemente possível (Vieira da Silva, 2022).

d) Prisma de Pavimento

Os prismas de pavimento ou marcas de superfície (Figura 15) permitem registar deslocamentos verticais à superfície ou assentamentos com a evolução do tempo, que deverão estar relacionados com movimentos no maciço.

Uma marca de superfície é constituída por um apoio metálico fixo a um maciço de betão cúbico moldado no terreno, com 0,30m de lado, fundado a uma profundidade mínima de 0,80m e 1,00m no caso de escavações/contenções. O erro máximo para as leituras deste equipamento deverá rondar $\pm 0,5\text{mm}$. As leituras são efetuadas a partir de estações topográficas (estações totais), que têm como ponto de referência os *bench-marks*, isto é, pontos designados fora da área de influência da obra.



Figura 15- À direita, prisma de pavimento ao lado de uma tampa de extensómetro. Na esquerda, prisma de 17,8mm.

II. Fissurómetro

O fissurómetro permite avaliar o desenvolvimento das fissuras em superfícies de estruturas e corresponde a um equipamento com a possibilidade de leitura manual ou automatizada.

Nos fissurómetros manuais, também conhecidos como fissurómetro *Tell-Talle*, as respectivas leituras são realizadas como se verifica na Figura 16, através de uma régua graduada, que irá medir deslocamentos na horizontal e na vertical.

Este fissurómetro é posicionado de maneira que fique sobreposto aos traços de referência e o reticulado fique centrado. As leituras são listadas em tabelas com indicação à abertura ou ao fecho das fissuras ao longo do tempo de obra.

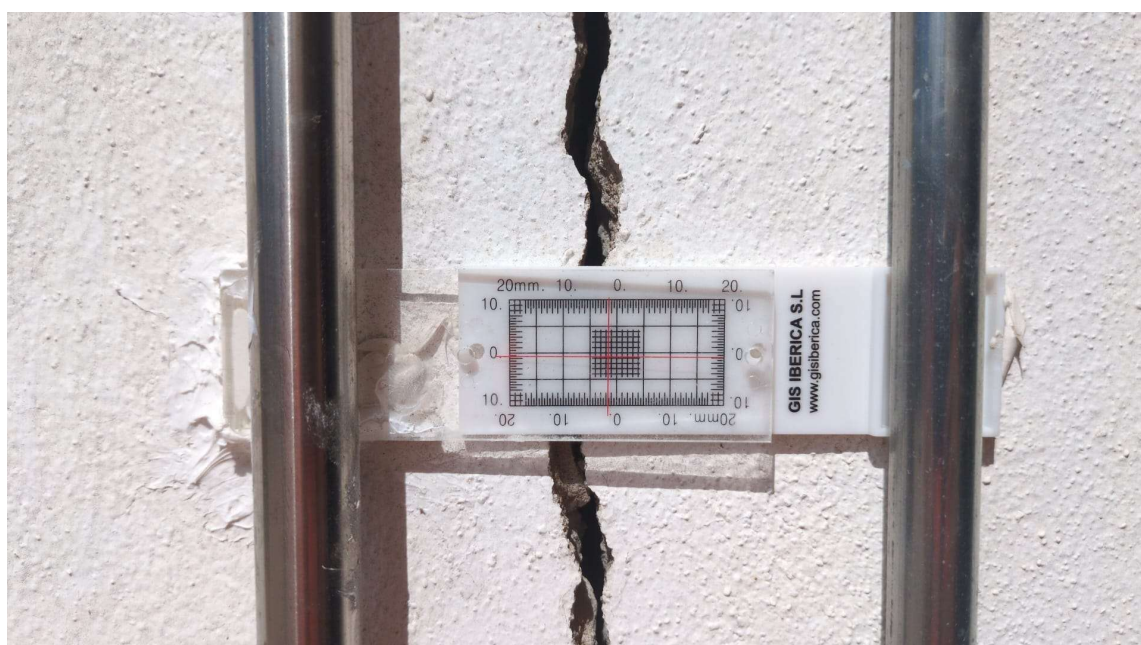


Figura 16- Fissurómetro manual.

O fissurómetro automatizado corresponde a um transdutor indutivo com um elemento integrado (Figura 17). É um equipamento com capacidade de alongamento até 20mm.



Figura 17- Fissurômetros automatizados.

III. Inclínómetro

Os inclinómetros (Figura 18) (também designados por inclinómetros de talude ou indicadores de inclinação) têm como objetivo permitir a deteção atempada de deformações excessivas da estrutura de contenção, durante a fase construtiva que possam afetar a estabilidade da escavação ou induzir nas secções mais solicitadas. Um acréscimo de esforços não expectáveis em fase de cálculo. Tal situação poderá obrigar à retificação de troços que não se encontrem de acordo com o previsto.

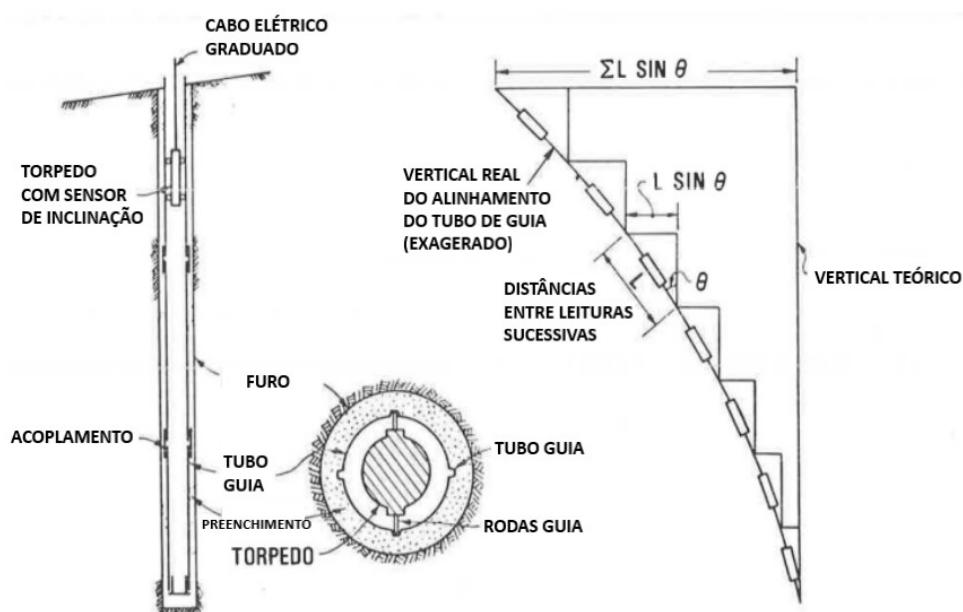


Figura 18- Princípio da operação de um inclinómetro. (Dunnicliff, 1988)

Um inclinómetro permite o controlo das inclinações e dos deslocamentos horizontais da contenção e terrenos adjacentes e subsuperficiais, correspondentes a movimentos que ocorrem em profundidade.

Segundo Dunnicliff (1988), os tipos de inclinómetros mais comuns são os seguintes:

- *Poor Man's Inclinometer* (Sonda de Corte Simples);
- Inclinómetro Sueco;
- Sistema moderno com guia interna e sensor elétrico de inclinação.

No entanto, os mais utilizados atualmente baseiam-se em sondas digitais com sensores elétricos, tipicamente MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*). Este sistema proporciona uma elevada precisão relativamente aos métodos mais antigos, como o inclinómetro sueco com leitura ótica ou a sonda de corte simples, que têm nos dias atuais aplicação em contextos específicos.

O sistema com tubo guia ranhurado e sonda digital (Figura 19), consiste num tubo guia, de ABS *Plastic*, com ranhuras segundo eixos ortogonais, instalado verticalmente, cujas ligações devem ser devidamente seladas com mástique, por forma a garantir a sua estanqueidade. Nesse tubo insere-se a sonda inclinométrica (torpedo) equipada com transdutores, geralmente MEMS ou servo-acelerómetros, que acompanha a deformação da calha. O torpedo é posicionado com o controlo de rodas que encaixam nas ranhuras, o que garante o alinhamento, no qual são realizadas leituras segundo dois eixos ortogonais entre si.



Figura 19- Bobina de Bluetooth, e respetiva sonda inclinométrica.

De forma a garantir a integridade do topo dos tubos inclinométricos e não permitir a entrada de impurezas, deve-se colocar uma tampa nessa extremidade, Figura 20 à esquerda. Esta tampa extraí-se apenas no período de leituras e é substituída por outra tampa com uma abertura de nome comum de “bolacha” para garantir a entrada da sonda digital e a respetiva estabilidade durante a leitura.



Figura 20- Medição com o torpedo (esquerda). Tubos inclinométricos dentro da armadura metálica de estaca moldada *in situ* (direita).

IV. Extensómetro

Os extensómetros são usados para medir deformações verticais. É um equipamento constituído por um cabeçal em PVC, no qual é instalado o sensor de corda vibrante, onde é acoplada a extensão de varas metálicas definida, com proteção plástica, que permite o deslizamento.

No fundo da furação é acoplado um varão nervurado de 0,5m para ancoragem. A furação tem um diâmetro de 70mm e profundidade superior a 1m de comprimento da vara. Poderá haver a

instalação de mais que uma vara, e nesses casos o extensómetro designa-se por extensómetro multiponto, pois detetam deslocamentos em pontos distintos.

A zona de ancoragem, de 0,5m, é injetada com calda. Após a injeção, o restante espaço até ao cabeçal é preenchido com material de escavação. O cabeçal é fixo a uma base de argamassa e, de seguida é colocada uma caixa de proteção com o mesmo material.

Sendo assim, na caixa encontra-se o cabeçal, o sensor de corda vibrante e instalado o nodo que envia as leituras (Figura 21). Por fim, tapa-se com a tampa de proteção de resina, de modo a fechar a caixa.



Figura 21- Sensor de corda vibrante (direita). Extensómetro, caixas e cabeçal PVC (esquerda).

Vantagens:

- Fios de ligação longos e efeitos mínimos de ligação;
- Histerese muito baixa, alta sensibilidade;
- Possui função de equilíbrio *in situ*;
- Histórico de utilização consolidado e amplitude de medição elevada;

- Fácil de instalar, de desmontar e reutilizar.

Limitações:

- Complexo e dispendioso;
- Alcance limitado, influência dos fios de ligação e efeito de alongamento dos fios.

V. *Strain Gauges* (Extensómetro)

Este tipo de extensómetro permite o controlo das deformações axiais das escoras, ou seja, avaliar a variação de deslocamento e de tensão da estrutura em que estão instalados.

Os *Strain Gauges* correspondem a extensómetros de corda vibrante (Figura 22), com um campo de leitura não inferior a $3000\mu\epsilon$ e precisão de ordem inferior a 0,5% FS.

Os resultados obtidos são apresentados sob a forma gráfica do tipo variação tensão/tempo.



Figura 22- Exemplo de um modelo *Strain Gauge*.

VI. Clinómetro

Os clinómetros (Figuras 23 e 24), também conhecidos como *Tiltmeters*, permitem detetar variações angulares e variações de deslocamentos horizontais nos edifícios vizinhos. Podem ser do tipo fixo ou amovível, em que a altura da instalação varia em função da altura do respetivo edifício que se pretende instrumentar e, principalmente, do acesso.

Para leituras a longo prazo, os sensores de leitura poderão ser servo-acelerométricos. No entanto, para leituras a curto prazo, os sensores podem ser magnetorresistentes. Os respetivos gráficos de leitura fornecem a informação da variação de ângulo e a variação de deslocamento horizontal, com o tempo e sobre o deslocamento horizontal, em relação à altura do respetivo edifício instrumentado.



Figura 23- Clinómetro em edifício.



Figura 24- Clinómetro na horizontal, na cobertura de um edifício.

2.2.2.3. Medição de tensões em estruturas de suporte e elementos de contenção- Células de Carga

As células de carga permitem avaliar a carga instalada na ancoragem e a sua evolução relativamente ao respetivo comportamento.

A célula de carga deverá ser instalada entre pratos de apoio e de distribuição de carga, com espessura inferior a 40mm e com um orifício central de diâmetro adequado à passagem livre de armadura da ancoragem. Os pratos deverão ter limitados para permitir a centragem da célula com o furo central.

Sendo assim, os materiais a utilizar são: placas de apoio e de distribuição, cabo de ligação, ficha de conexão do cabo à célula, tubos e PVC para proteção dos cabos elétricos.

Nas células de carga com leitura remota, a carga é medida por um transdutor conectado à câmara elétrica (Figura 25). Com os transdutores do tipo corda vibrante (VW), a leitura pode ser efetuada de forma remota, recorrendo-se a uma unidade de leitura conectada à extremidade do cabo de ligação da célula.



Figura 25- Célula de carga em estaca e respetivos recetores de sinal.

2.2.2.4. Vibrações- Sismógrafo

Os sismógrafos têm como objetivo avaliar o impacto das vibrações na estrutura dos edifícios, em que os valores das leituras medidas têm de ter como referência a Norma NP2074, 2015.

As medições das vibrações são obtidas através de um geofone triaxial de 2-250Hz, com janela de calibração mínima de 1-160Hz.

Na instalação deste dispositivo é recomendável que a respetiva posição seja na horizontal e num dos cantos inferiores dos edifícios (Figura 26), pois esta localização minimiza os efeitos de amplificação estrutural e fornece uma medição mais representativa do movimento sísmico do solo, ao reduzir a interferência de oscilações induzidas à própria estrutura do edifício.

Pode também ser necessário, como se observa no sismógrafo à direita da Figura 26, a proteção do instrumento com a colocação de uma caixa de proteção.



Figura 26- Sismógrafos em estruturas de edifícios.

2.2.3. Erros de Leitura

A instrumentação é utilizada para medições e cada medida realizada envolve erros e incertezas. Neste subcapítulo estão apresentados os vários tipos de erros que afetam a realização das respetivas leituras.

Segundo Silveira (2013), o erro constitui o desvio entre o valor medido e o valor real. Assim, é matematicamente igual à precisão.

Os erros surgem em função de várias causas distintas, apontando-se as respectivas medidas corretivas, como se indica na Tabela 1:

Tabela 1- Causas e medidas corretivas para os erros de medição (Silveira, 2013).

<i>Tipo de erro</i>	<i>Causas</i>	<i>Medidas corretivas dos instrumentos</i>
Erro grosseiro	Inexperiência Falha na leitura Falha no registro Erro computacional	Mais cuidado/atenção Treinamento Leituras duplicadas Dois observadores Comparação com as leituras prévias
Erro sistemático	Calibração imprópria Falta de calibração Histerese Não linearidade	Uso de calibração correta Recalibração Uso de padrões Uso de procedimentos de leitura consistentes
Erro de conformidade	Detalhes de instalação incorretos Limitações do instrumento de medição	Seleção de instrumento apropriado Modificação dos procedimentos de instalação Aprimoramento do projeto de instrumentação
Erro ambiental	Clima Temperatura Vibração Corrosão	Registrar as variações ambientais e introduzir correções Fazer escolha apropriada dos materiais dos instrumentos
Erro observacional	Variação entre observadores	Treinamento Uso de sistemas de aquisição automática de dados
Erro de amostragem	Variabilidade nos parâmetros medidos Técnicas incorretas de amostragem	Instalação de um número suficiente de instrumentos nos locais representativos
Erro randômico	Ruído Atrito Efeitos ambientais	Seleção correta dos instrumentos Eliminação temporária de ruídos Leituras múltiplas Análises estatísticas
Lei de Murphy	Se alguma coisa pode dar errado, com certeza, dará	Nenhuma – qualquer tentativa de remediar a situação irá piorá-la

Fonte: Dunncliff, 1993.

2.3. Plano de Monitorização

Segundo Glisic & Inaudi (2002), o plano de monitorização consiste nas seguintes atividades:

1) Seleção da estratégia de monitorização

- i) Identificação dos parâmetros a serem monitorizados;
- ii) Avaliação da monitorização e calendarização;
- iii) Seleção do sistema de monitorização entre outros;

iv) Seleção da topologia e rede de sensores.

A monitorização de estruturas envolve o registo de parâmetros dependentes do tempo, durante certos períodos, quer sejam na fase de obra e/ou na fase de operação.

Para iniciar um projeto de monitorização é importante, em primeiro lugar, definir o objetivo da respetiva monitorização. Este objetivo pode estar relacionado com a avaliação do desempenho estrutural ao longo do tempo, à deteção de anomalias físicas, químicas ou térmicas ou com o controlo da interação entre a estrutura e o solo adjacente.

O conjunto de dispositivos e meios usados para a monitorização é denominado de sistema de monitorização. Os principais componentes desse sistema são os sensores, os dispositivos de aquisição de dados, as interfaces de comunicação e os suportes de armazenamento de dados.

Quando se seleciona um sistema de monitorização é essencial considerar o tipo de informação pretendida, o que depende da frequência de leitura desejada, da precisão necessária, da acessibilidade ao local de instalação e do ambiente em que os sensores serão colocados.

Os sistemas de monitorização podem ser concebidos como redes centralizadas ou distribuídas. Nos sistemas centralizadas, os sensores estão ligados a uma única unidade de aquisição. Nos sistemas distribuídos, a aquisição pode ocorrer localmente em vários pontos da estrutura.

A seleção da topologia dos sensores e da rede de aquisição de dados depende do tipo de estrutura a ser monitorizada, do comportamento esperado e da localização dos pontos de interesse.

2) Instalação e manutenção dos dispositivos de instrumentação

Na instalação dos dispositivos de instrumentação é fundamental ter em atenção que estes e os respetivos trabalhos de instalação não afetem o desempenho da estrutura, como por exemplo, sensores embebidos reduzem a área da secção transversal na colocação de caixa de ligações ou de cabos de extensão na superfície, no qual é necessária a furação e a instalação de fixações, etc.

A instalação consome tempo e pode atrasar os trabalhos quando é realizada durante a construção da estrutura. Sendo assim, o planeamento do calendário de instalação dos dispositivos deve considerar o cronograma da obra e a duração estimada das atividades de instalação, mantendo simultaneamente a necessária flexibilidade para acomodar eventuais alterações no planeamento dos trabalhos da obra.

Após o término da instalação, os dispositivos devem ser monitorizados *in locu*, para evitar danos acidentais durante a obra, bem como, assegurar a durabilidade do instrumento. Sendo assim, é necessário serem considerados alguns fatores externos (vandalismo, fatores meteorológicos, etc.).

3) Recolha e armazenamento de dados recolhidos

Os dados recolhidos pelos dispositivos de instrumentação podem ser recolhidos manualmente ou automaticamente, em obra ou remotamente, com ou sem intervenção humana, de forma periódica ou contínua.

Os dados podem ser armazenados sob a forma de relatórios, tabelas, diagramas, entre outros, e em diferentes tipos de suportes, como ficheiros eletrónicos ou em formato físico. O método de armazenamento deve garantir que não ocorra perda de dados e que seja rapidamente acessível.

4) Pós-processamento de dados recolhidos (visualização, interpretação e análise).

O pós-processamento de dados consiste na sua visualização, interpretação e análise. Os dados recolhidos correspondem a um grande volume de valores numéricos, datas e magnitudes dos parâmetros recolhidos, que necessitam de serem transformados em informação útil relativamente ao comportamento estrutural.

O planeamento do pós-processamento deve ser efetuado em simultâneo com a definição da estratégia de monitorização, ao assegurar a seleção de algoritmos e com ferramentas adequadas e compatíveis com o plano de monitorização adotado.

2.3.1. Tipos de Monitorização

A instrumentação deve desempenhar uma série de funções e responder em momentos apropriados, sendo assim sugeridas que essas funções se dividam nas seguintes três categorias (Bassett, 2012):

- a) Monitorização passiva, para fins de registo e, idealmente, análise retrospectiva;
- b) Monitorização quase em tempo real, para o controlo da obra;
- c) Monitorização para segurança, quando uma ação durante a construção pode potencialmente conduzir a um resultado inaceitável ou, até mesmo, a uma situação perigosa.

a) Monitorização Passiva

A monitorização passiva consiste em registar e armazenar o deslocamento e tensões medidos, com o propósito de validar que os limites de segurança previstos não foram ultrapassados.

Desta forma, trata-se de uma função passiva, em que os padrões reais observados são comparados com os padrões previstos com base em padrões de projetos anteriores, anteriormente experimentados em condições mais ou menos semelhantes, sendo assim pouco prováveis que ultrapassem limites que causem danos (Bassett, 2012).

A instrumentação é, essencialmente, um registo que fornece ao engenheiro, ao proprietário, ao empreiteiro e a outros intervenientes provas do comportamento da estrutura.

O comportamento observado é então comparado com as previsões. Se os dados estiverem dentro dos limites, não se considera necessário tomar alguma ação.

Sendo assim, a monitorização passiva é uma resposta na qual os dados devem ser publicados, porque constituem um registo de experiência.

A análise retrospectiva dos dados pode melhorar significativamente as previsões teóricas (Bassett, 2012).

b) Monitorização quase em tempo real

A instrumentação neste tipo de monitorização é usada quando é necessário registar e posicionar os dados em tempo quase real, em trabalhos de compensação ou injeção e quando os deslocamentos ou tensões previstas estão próximos de exceder os limites aceitáveis.

Os equipamentos devem ser instalados, idealmente, de forma que os dados recolhidos possam ser acedidos e lidos com rapidez.

O operador deve acompanhar os resultados quase em tempo real para tomar decisões informadas, tais como iniciar uma ação corretiva ou interromper os trabalhos (Bassett, 2012).

Este tipo de monitorização (Terzaghi, 1945; Newmark, 1959; Peck, 1969) está relacionada com o método “observacional”, em que o projeto é ajustado com base em dados de campo recolhidos durante a execução da obra.

A monitorização torna-se progressivamente mais significativa à medida que a construção avança.

c) Monitorização para segurança

A monitorização para segurança é utilizada quando há risco de falhas significativas, tornando-se essencial avaliar a medição de pressões de poros e deslocamentos antes e durante as obras, bem como a resposta do solo que poderá indicar uma condição crítica.

A taxa de variação pode ser tão importante quanto o valor absoluto. Para medir essa taxa, é essencial utilizar uma instrumentação de alta qualidade.

A taxa de variação da deformação assume maior relevância, enquanto que a taxa de variação de pressões neutras pode ser crítica em termos de valor absoluto.

Os dados devem ser registados e analisados com elevada exatidão para que haja tomada de decisões em tempo real com confiança e precisão, sendo assim apresentados de forma a permitir a avaliação da taxa de encerramento em milímetros por minuto ou da taxa de variação da tensão/deformação.

Para cumprir a exigência da monitorização em tempo real, em que o operador deve tomar decisões cruciais sem hesitação, o sistema de instrumentação deve ser capaz de captar e processar os dados em tempo real (Bassett, 2012).

2.3.2. Monitorização de Túneis Subterrâneos

A monitorização em túneis subterrâneos, e de um modo geral, em obras geotécnicas urbanas, constitui um elemento fundamental no controlo de riscos e na optimização de comportamento estrutural ao longo das várias fases de construção e operação.

A escolha criteriosa da instrumentação deve-se relacionar com o método construtivo adotado, com as condições geológico-geotécnicas locais e com os objetivos de monitorização definidos no projeto.

No método de escavação convencional, isto é, o método de escavação por secções, também designado por NATM (*New Austrian Tunneling Method*), a monitorização adota uma abordagem observacional ao ajustar o dimensionamento e a aplicação de suporte conforme os dados obtidos sobre o comportamento *in situ* do maciço.

Neste contexto, dispositivos como prismas topográficos, extensómetros, células de carga e piezómetros são amplamente utilizados para monitorizar a deformação da secção do túnel e avaliar tensões nos suportes e variações na pressão intersticial.

A medição de convergências em túneis é uma técnica amplamente adotada para detetar deformações na secção transversal ao longo do tempo. Este tipo de monitorização de deslocamentos em 3D é frequentemente realizado com recurso a uma estação total e prismas topográficos, conforme esquematizado na Figura 27.

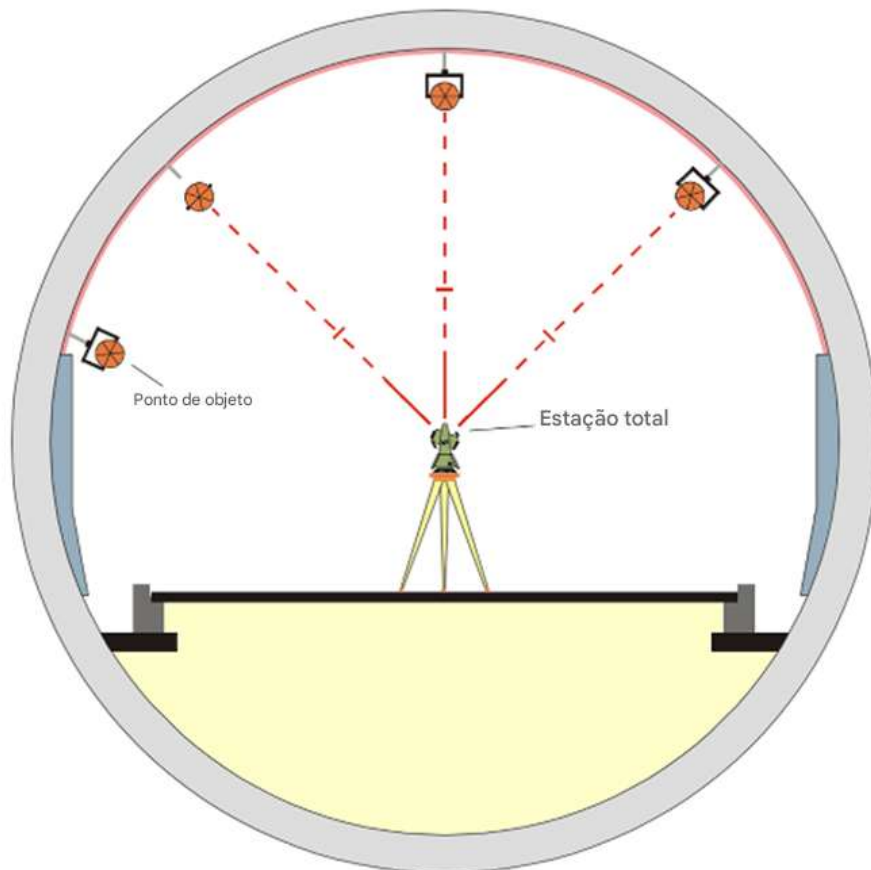


Figura 27- Monitorização de secção de túnel com recurso a prismas e estação total (Strauss, *et al.*, 2020).

Nesta abordagem convencional de monitorização, as secções transversais são equipadas com 5 a 7 prismas, distribuídos ao longo da secção, cujas posições espaciais, em termos de coordenadas tridimensionais (segundo os eixos X, Y e Z), são determinadas repetidamente por meio de medições com estação total.

Para a determinação de deslocamentos, as medições são obtidas a partir de estações implantadas ao longo do eixo longitudinal do túnel, ao abranger tanto os pontos de referência como os pontos da secção transversal.

A primeira categoria de medições é usada para transferir as coordenadas tridimensionais dos pontos de referência para a estação do dispositivo. Já a segunda categoria, corresponde à transferência de coordenadas obtidas para os pontos da secção transversal.

A configuração do sistema de medição, bem como a seleção dos dispositivos de instrumentação, deve assegurar a obtenção de desvios-padrão adequados para as coordenadas dos pontos de interesse.

A repetição deste procedimento ao longo de “épocas” consecutivas permite calcular os deslocamentos com base nas diferenças de coordenadas observadas nos pontos da secção transversal (Strauss, *et al.*, 2020).

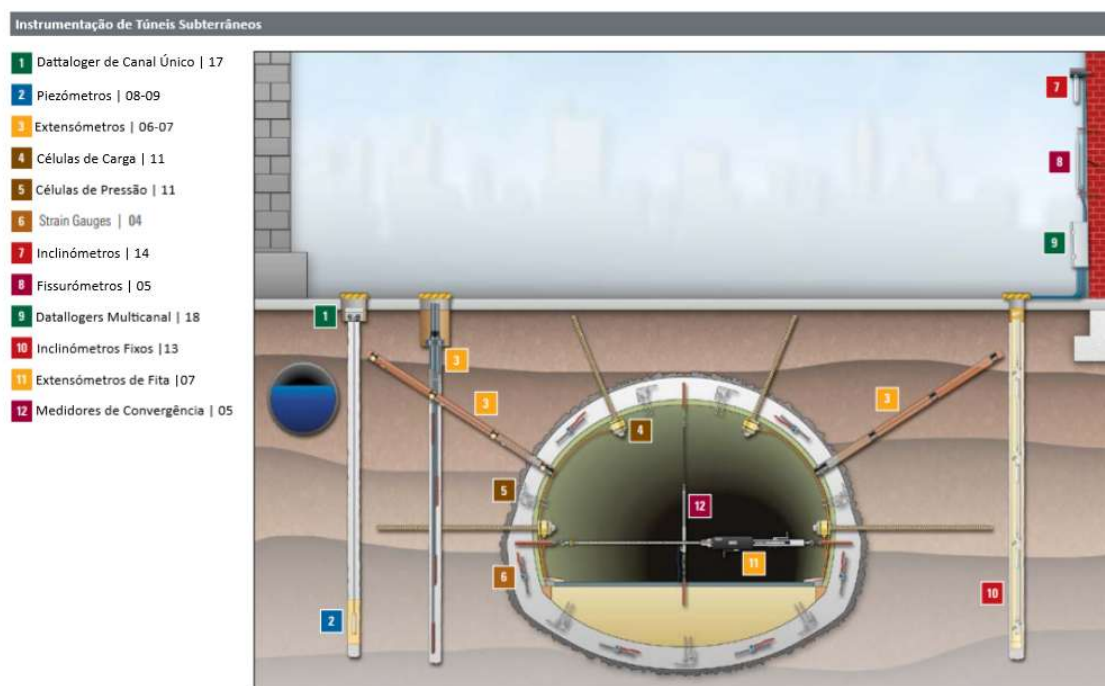


Figura 28- Esquema dos principais dispositivos instalados num túnel, no maciço circundante e à superfície (Setpoint Technologies, 2025).

A Figura 28 apresenta um exemplo abrangente de dispositivos utilizados em túneis urbanos escavados por métodos convencionais, em que a instrumentação se pode agrupar de acordo com os elementos estruturais ou geotécnicos onde é aplicada, como se verifica nas Tabelas 2, 3 e 4:

- I. Estrutura do Túnel (Revestimento, abóboda, hastes);
- II. Maciço Envolvente (Solo, Rocha);
- III. Superfície e Estruturas Adjacentes.

Tabela 2- Instrumentos e respetiva aplicação para a estrutura do túnel.

I. ESTRUTURA DO TÚNEL (REVESTIMENTO, ABÓBADA, HASTES)	
CÉLULAS DE CARGA (LOAD CELLS)	Medição de forças em elementos estruturais
CÉLULAS DE PRESSÃO (NATM PRESSURE CELLS)	Monitorização da pressão de contato entre o maciço e o revestimento primário
MEDIDORES DE CONVERGÊNCIA	Avaliação da deformação diametral da secção do túnel
PRISMAS PARA TOPOGRAFIA COM ESTAÇÃO TOTAL	Controlo de deslocamentos
TELLTALES (TAPE EXTENSOMETERS) E EXTENSÓMETROS	Medição de deslocamentos internos em pontos de fácil acesso
FISSURÓMETROS	Monitorização da evolução de fissuras em elementos de suporte
STRAIN GAUGES	Quantificação de deformações unitárias em elementos estruturais

Tabela 3- Instrumentos e respetiva aplicação para o maciço envolvente.

II. MACIÇO ENVOLVENTE (SOLO/ROCHA)	
PIEZÓMETROS	Controlo da pressão intersticial
INCLINÓMETROS	Monitorização de deslocamentos horizontais no terreno
EXTENSÓMETROS DE PROFUNDIDADE	Medição de movimentos axiais em diferentes profundidades
TILTMETERS	Deteção de inclinações em elementos estruturais em rocha

Tabela 4- Instrumentos e respetiva aplicação para a superfície e estruturas adjacentes.

III. SUPERFÍCIE E ESTRUTURAS ADJACENTES	
SENSORES DE DESLOCAMENTOS E ASSENTAMENTO INSTALADAS EM FACHADAS E PAVIMENTOS	Controlo de assentamentos
<i>DATALOGGERS</i>	Registo e transmissão em tempo real das leituras registadas nos vários dispositivos
PIEZÓMETROS E INCLINÓMETROS VERTICAIS PERIFÉRICOS	Controlo de efeitos induzidos pela escavação no solo envolvente
FISSURÓMETROS INSTALADOS EM ESTRUTURAS VIZINHAS	Verificação de patologias existentes e com eventual desenvolvimento induzido por deformações

2.4. Gestão de Risco em Túneis Subterrâneos

A execução de obras subterrâneas está associada a fenómenos de descompressão do maciço escavado, os quais conduzem ao aparecimento de uma bacia de subsidência na superfície do terreno afetado (Portugal, et al., Julho de 2006).

A magnitude e a forma destes movimentos superficiais variam consoante a proximidade da escavação e a deformabilidade do terreno, sendo relevantes em situações de escavações confinadas entre paredes, quando os solos constituem o meio predominante.

No caso de túneis subterrâneos, os deslocamentos na superfície tendem a ser mais pronunciados, quanto menor for a espessura da cobertura sobrejacente da escavação. Em meio urbano, este fenómeno é extremamente importante, uma vez que se coloca a necessidade de avaliar os impactos destes movimentos sobre o património edificado aí existente, de forma a prevenir danos estruturais e garantir a segurança.

Neste contexto, destaca-se o método de Avaliação de Risco de Danos em Edifícios (BRA- *Building Risk Assessment*), desenvolvido por Burland (1997). Este método fornece uma base metodológica para estimar o grau de vulnerabilidade e os potenciais danos no património edificado, sendo amplamente utilizado em estudos e práticas de engenharia.

Sendo assim, a avaliação de riscos pode ser organizada nas seguintes etapas:

1) Estimativa dos movimentos superficiais induzidos pela escavação;

Os movimentos diferenciais superficiais traduzem-se em assentamentos, deslocamentos horizontais e rotações diferenciais, configurando a denominada bacia de subsidência.

A previsão destes movimentos é realizada com recurso a:

- Modelos empíricos, baseados em observações de obras semelhantes (método de Peck, 1969);
- Modelos semiempíricos, que utilizam formulações ajustadas à realidade local (métodos de correlação geotécnica);
- Modelos numéricos, baseados em elementos finitos ou diferenças finitas, capazes de simular a resposta tridimensional do terreno.

A amplitude e a forma da bacia dependem de fatores como a profundidade da escavação, a espessura da cobertura, a rigidez do maciço e a sequência construtiva adotada (NATM, escavação mecanizada ou convencional).

2) Análise dos efeitos sobre as estruturas existentes;

Uma vez previstos os movimentos superficiais, é necessário correlacioná-los com as estruturas afetadas pela zona de influência. A resposta de cada edificação ou infraestrutura dependerá de:

- Tipologia estrutural (edifícios em alvenaria, betão armado, fundações superficiais ou profundas, etc.);
- Idade e estado de conservação (estruturas antigas são mais frágeis face a deformações diferenciais);
- Rigidez relativa entre a estrutura e o terreno (quanto mais rígida a estrutura, maior a probabilidade de fissuração localizada).

As consequências possíveis incluem fissuração, assentamentos diferenciais, rotações e, em casos extremos, perda de estabilidade parcial ou total de elementos estruturais. Assim, a caracterização da vulnerabilidade estrutural é essencial para compreender o grau de risco associado.

3) Metodologia de avaliação de risco.

A ligação entre os movimentos previstos e as respostas estruturais esperadas é consolidada através de metodologias de avaliação de risco. Esta abordagem assenta em três pilares fundamentais:

- Magnitude dos movimentos induzidos (obtida na etapa 1);
- Vulnerabilidade da estrutura existente (analisada na etapa 2);

— Classificação do risco, normalmente, por matrizes que cruzam a probabilidade de ocorrência com gravidade das consequências.

Na abordagem do método de Avaliação de Risco de Dano em Edifícios de Burland (1997), os danos em edifícios distinguem-se em três grandes categorias:

- i) danos estéticos (ou de aparência visual) – associam-se a fenómenos de fissuração ligeira em elementos não estruturais (panos de enchimentos, rebocos, revestimentos de piso, etc.), reparáveis com intervenções pouco onerosas;
- ii) danos funcionais (ou de funcionalidade) – manifestam-se sob a forma de fissuras e rachadelas e outros pontos de vista da sua utilização, mas que não envolvam a segurança última da edificação (perda de impermeabilidade de panos de enchimento, deformação excessiva de guarnições de vãos, canalizações danificadas ou não utilizáveis, etc.). Este tipo de danos requer intervenções de reparação demoradas e onerosas;
- iii) danos estruturais (ou de estabilidade) – incluem-se todos os que conduzem à possibilidade de ocorrência de um estado limite último da estrutura ou parte dela, como a perda apreciável da capacidade resistente de elementos estruturais, a perda de equilíbrio de parte ou do conjunto da estrutura do seu todo, etc. Neste caso, aos danos associam-se reparações pesadas e muito onerosas, que requerem intervenções de reconstrução parcial ou total da estrutura.

A classificação de Burland (1977) (Tabela 5) é um procedimento simplificado e conservativo, baseado em isolinhas de assentamento (S) e distorção angular (β), no qual se aplica a estruturas em alvenaria de granito ou de tijolo, às construções porticadas de betão armado dotadas de fundações contínuas, bem como, a construções porticadas de betão armado com fundações indiretas por grupos de estacas.

Para a classificação de Rankin (1988) (Tabela 6), aplica-se a estruturas porticadas de betão armado dotadas de funções isoladas, quer sapatas ou estacas isoladas.

Para a aplicação destas classificações, às deformações eventualmente introduzidas pela obra subterrânea acrescem deformações previamente existentes.

Tabela 5-Classificação de risco de danos de Burland *et al.* (1977), (adaptado de Portugal *et al.*, 2006).

Categoria de risco	Tipo de dano	Descrição do Ano	Abertura aproximada das fissuras (mm)	Limite para o dano arquitectónico	Parâmetro de controlo ε_{im} (%)
0 (estético)	Irrelevante (não visível)	Pequenas fissuras muito finas e insignificantes, que podem ser desprezadas.	< 0,1		0 – 0,05
1 (estético)	Muito ligeiro	Eventuais fissurações isoladas no interior da edificação. As fissuras na alvenaria de pedra (ou de tijolo) no exterior da edificação só podem ser percebidas através de uma inspecção muito cuidadosa.	< 1,0	Paredes rebocadas: 0,4 mm Paredes em bruto (de betão, pedra ou tijolos): 0,8 mm	0,05 – 0,075
2 (estético)	Ligeiro	Muitas fissurações no interior da edificação. As fissuras são visíveis também no exterior. Portas e janelas podem apresentar dificuldades em ser movimentadas.	< 5,0	Juntas dos revestimentos cerâmicos dos soalhos: 1,6 mm	0,075 – 0,15
3 (estético / funcional)	Médio	Danos em portas e janelas. Danos ligados à infiltração de humidade. A tubagem pode ser danificada.	5 – 15 (ou várias >3 mm)		0,15 – 0,3
4 (funcional)	Elevado	Distorção das caixilharias, soalhos inchados, paredes com ondas e inchadas. Alguma perda da capacidade portante das vigas. Tubagem danificada, não utilizável.	15 – 25 em função do número de fissuras		>0,3
5 (estrutural)	Muito elevado	Perda notável da capacidade resistente das vigas. Paredes inchadas e instáveis. Janelas deformadas e partidas. Perigo de instabilidade das estruturas.	> 25 em função do número de fissuras		

Tabela 6- Classificação de risco de danos de Rankin (1988), (adaptado de Portugal *et al.*, 2006).

Categoria de risco	Tipo de dano	Descrição do Ano	Parâmetros de controlo	
			$\beta_{\max}$	$S_{\max}$ (mm)
1 (estético)	Irrelevante (não visível)	Há uma probabilidade muito baixa de as edificações sofrerem danos superficiais.	< 1/500	< 10
2 (estético)	Ligeiro	As edificações podem ser danificadas de forma superficial, sem consequências em termos estruturais.	1/500 - 1/200	10 - 50
3 (funcional)	Médio	Edificações danificadas de forma superficial. Podem ocorrer danos estruturais. Tubagem rígida pode sofrer danos.	1/200 - 1/50	50 - 75
4 (estrutural)	Elevado	As edificações sofrem danos estruturais. Tubagem rígida sofre danos, a menos rígida pode sofrer danos.	> 1/50	> 75

A classificação de risco de danos tem como objetivo a avaliação de risco a previsão do tipo de danos que cada uma das edificações poderá sofrer devido às escavações a realizar e, como tal, é necessário indicar as medidas a tomar durante a execução dos trabalhos de escavação.

Sendo assim, as categorias 0 e 1 não necessitam de quaisquer medidas de proteção preventivas, não sendo menos relevante incluir a monitorização constante dos edifícios.

As medidas a serem adotadas para as categorias 3 a 5, constam da Tabela 7.

O resultado fundamental é distinguir de forma explícita os casos em que o risco de dano é maior, e, assim, apoiar a decisão de adotar medidas corretivas, seletivas e adaptadas a cada uma das estruturas efetuadas. Contudo, a primeira aproximação a esse resultado deve ser obtida logo na fase de projeto.

Os resultados da avaliação de risco podem ser ponderados para estabelecer os limites de alarme e alerta, e dos sistemas de observação, como a frequência de leituras.

Os resultados permitem relacionar a evolução dos valores de grandezas monitorizadas em obras com os níveis de risco que lhes são inerentes, assim, é não só possível analisar previamente cenários de evolução pessimistas, mas também preconiza, desde logo, medidas a adotar na eventualidade desses cenários se confirmarem em fase de obra.

Sendo assim, conclui-se que a atualização da avaliação de risco em função dos resultados da observação da obra se revela fundamental para que se adotem eventuais medidas corretivas.

Tabela 7- Medidas a adotar relativamente ao tipo de dano (Portugal, et al., Julho de 2006).

Categoria de Risco		Tipo de Danos	Descrição de Medidas:
Burland (1977)	Rankin (1988)		
2 (Estético)	2 (Estético)	Ligeiro	— Monitorização corrente; — Fixação ou remoção de elementos soltos existentes nos edifícios.
3 (Estético/ Funcional)	3 (Funcional)	Médio	— Monitorização corrente; — Fixação ou remoção de elementos soltos existentes nos edifícios; — Indicação da necessidade de obras de consolidação e/ou reforço; — Evacuação prévia de edifícios, etc.
4 (Funcional)	4 (Estrutural)	Elevado	— Alteração da solução adotada para a execução da escavação.
5 (Estrutural)	-	Muito elevado	

Capítulo III

Enquadramento Geral da Obra em Estudo

[página propositadamente em branco]

3. Enquadramento Geral da Obra em Estudo

3.1. Introdução

O seguinte capítulo tem como objetivo a descrição geral da obra em estudo, a qual corresponde ao Poço de Emergência e Ventilação (P1EV) e o respetivo Túnel de Ligação (TL1), inseridos na futura Linha Rubi do Metro do Porto, situado entre a Estação Rotunda da Boavista/Casa da Música e a Estação do Campo Alegre.

A Linha Rubi (Figura 29), ou Linha H, será uma infraestrutura ferroviária com aproximadamente 6,4 km de extensão. O traçado será de tipologia mista, englobando secções em túnel e em via à superfície, e incluirá oito estações e uma nova ponte sobre o rio Douro, de nome Ponte D. Antónia Ferreira (Ferreirinha), que se estende por 835 metros a uma cota de 70 metros acima do rio, com mobilidade adicional de ciclovias e caminhos pedonais.

Esta intervenção visa aumentar a capacidade da rede de transportes públicos no sentido de otimizar a acessibilidade intermunicipal e fomentar uma mobilidade urbana mais sustentável entre os concelhos do Porto e de Vila Nova de Gaia.

As estações projetadas para esta linha são: Casa da Música, Campo Alegre, Arrábida, Candal, Rotunda VL8, Devesas, Soares dos Reis e Santo Ovídio. As estações terminais Casa da Música e Santo Ovídio, correspondem a interfaces já existentes, prevendo-se a sua adaptação funcional e estrutural de modo a assegurar a compatibilidade e integração com a nova linha do Metro.

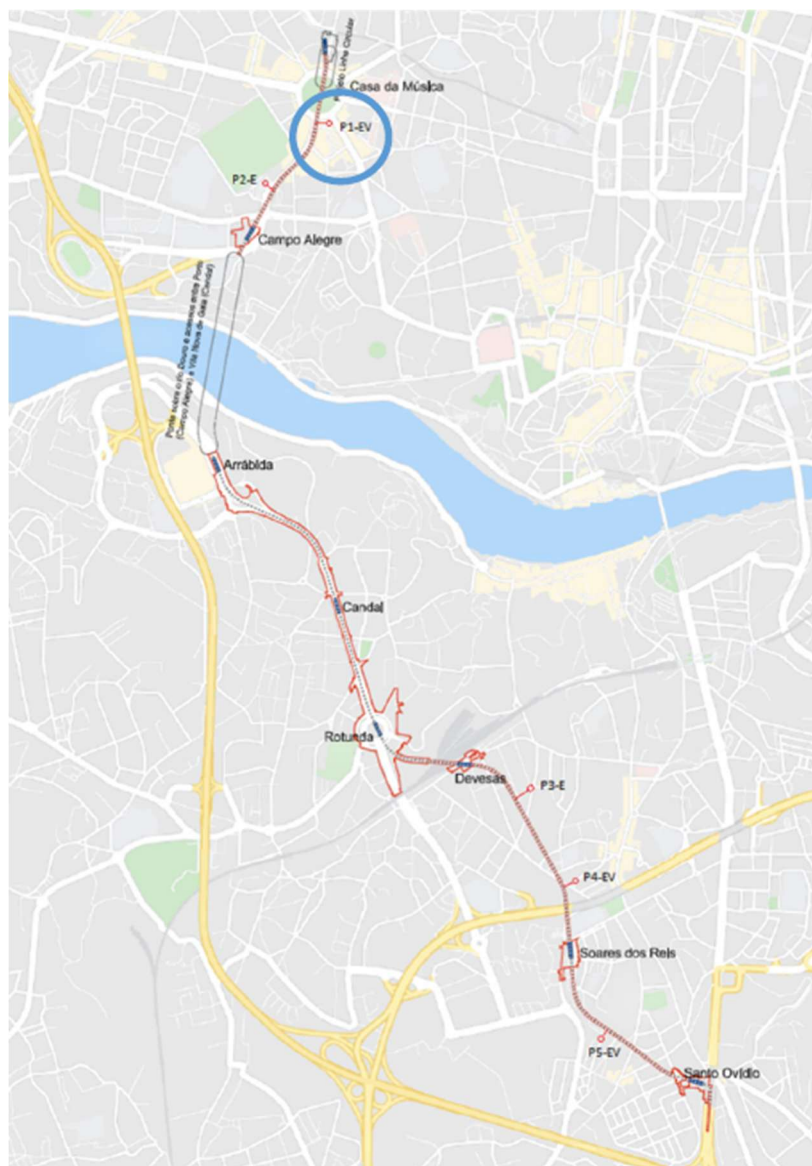


Figura 29- Traçado da Linha Rubi, juntamente com as respetivas estações e poços e a assinalação da obra em estudo (PEV01) (excerto de documentos de projeto).

3.2. Localização da Obra em Estudo/Enquadramento Geográfico

A empreitada encontra-se segmentada em dois lados, correspondentes aos diferentes concelhos: Lado Norte refere-se ao Porto e o Lado Sul a Vila Nova de Gaia.

No âmbito do estágio, o foco incidirá sobre as intervenções previstas no Lado Norte, no qual se encontra o Poço P1EV e o respetivo Túnel de Ligação (TL) (Figura 30).



Figura 30- Localização do Poço P1EV e Túnel de Ligação TL1, da Linha Rubi do Metro do Porto, à escala 1:7500 (retirado de Google Earth Pro, no dia 16-03-25).

A implantação do Poço P1EV será no Largo de Ferreira Lapa, correspondente à freguesia de Massarelos, do concelho e distrito do Porto. O largo contém uma zona de estacionamento e passeio e a Norte encontra-se edifícios habitacionais com pisos entre 6 e 7 pisos, um dos quais com cave de 3 pisos, e a Sul o Mercado do Bom Sucesso.

3.3. Enquadramento da Obra em estudo: P1EV

O poço P1EV é um poço de emergência integrado no sistema de ventilação e desenfumagem do tramo e saída de emergência do túnel de metro, com uma profundidade de aproximadamente 24 metros. O poço servirá de trecho do traçado Casa da Música- Campo Alegre, com uma ligação ao túnel mineiro de via ao Pk 0+362805, bem como, servirá de ataque para a escavação do túnel mineiro de via, através de um túnel de ligação (TL1), de aproximadamente 45 metros.

A escavação do poço foi realizada a céu aberto de forma faseada, cujas características geométricas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8- Características geométricas gerais do PEV01.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS GERAIS DO PEV01	
ALTURA DA CONSTRUÇÃO TOTAL	26,70 metros
ALTURA DE PROFUNDIDADE	22 metros
DIÂMETRO	15 metros

3.3.1. Solução Preconizada da Estrutura Definitiva

A estrutura do poço (Figura 31) assenta numa solução em betão armado moldado *in situ*, em forma de casca cilíndrica estanque, com paredes de 0,80m de espessura ao longo de toda a sua estrutura.

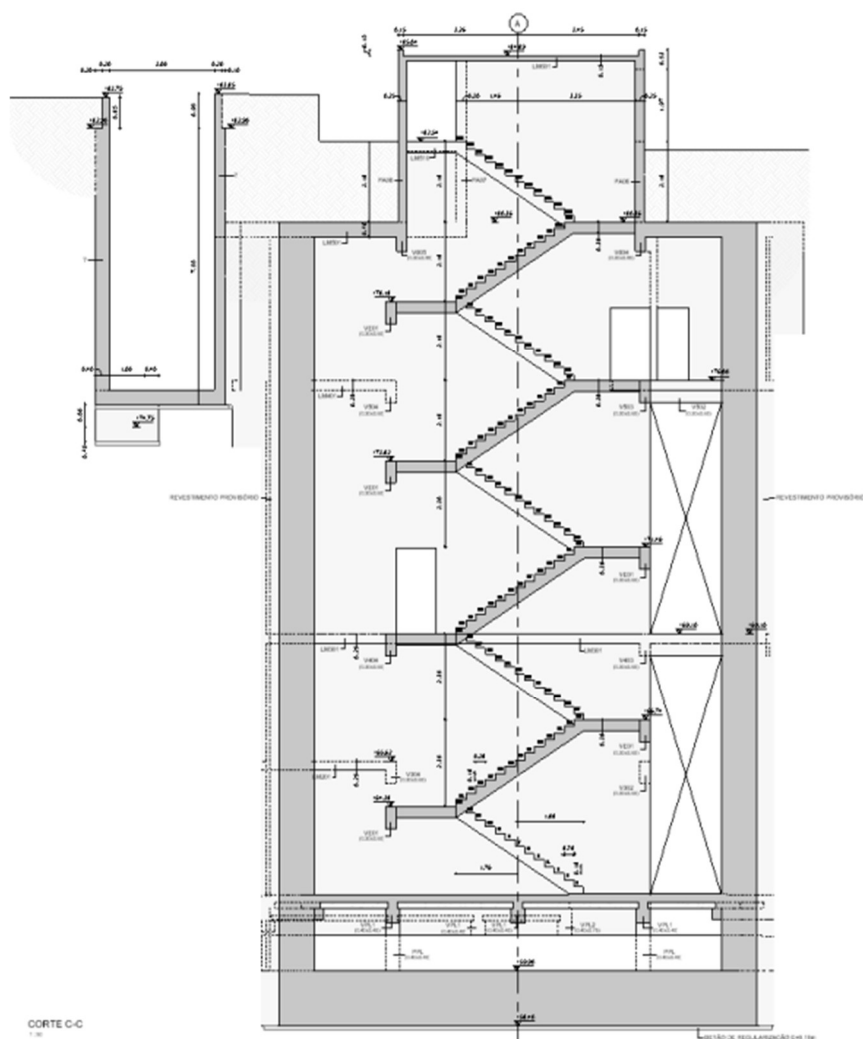


Figura 31- Disposição vertical do P1EV (excerto).

O nível inferior de evacuação, que estabelece a ligação entre a galeria em túnel e a coluna vertical do poço, é constituído por uma malha de pilares espaçados a 1,50m e vigas de apoio para pré-lajes, com 0,16m de espessura.

Superiormente, o poço é encerrado por uma laje vigiada, apoiada em vigas, que assegura a transição para a superestrutura de geometria quadrangular emergente à superfície, destinada ao acesso.

O poço integra uma escada vertical de emergência e uma sala de ventiladores com o respetivo ducto vertical, garantindo o cumprimento dos requisitos de segurança contra incêndios e das normas de ventilação e desenfumagem. A escada assegura a ligação entre a galeria em túnel e a saída à superfície, no Largo Ferreira Lapa, sendo dotada de uma câmara corta-fogo e permitindo o acesso operacional e de manutenção às infraestruturas técnicas.

Adicionalmente, da coluna vertical diverge a tomada de ar à superfície, executada em estrutura *Cut and Cover*.

3.3.2. Solução Preconizada da Contenção Provisória

A solução de contenção provisória preconizada consiste na execução de uma cortina de estacas em betão armado, com 800 mm de diâmetro e 1,40m espaçadas entre eixos. Estas estacas serão encabeçadas por uma viga de coroamento de 0,80 x 1,00m (largura x altura), localizada à cota +82,50m, com a função de uniformizar o comportamento estrutural do conjunto.

A escavação do poço será faseada, com rebaixos máximos de 3,00m, podendo essa altura ser ajustada em obra, consoante as condições geológico-geotécnicas observadas e as deformações registadas.

Após cada fase de escavação, será aplicado betão projetado com fibras metálicas, de 30 kg/m³, numa espessura de 15cm até à cota +70,80m.

De forma a minimizar a instalação de pressões hidrostáticas no tardo da contenção, prevê-se a execução de uma malha de drenos sub-horizontais em PEAD canelado crepinado, com 80mm de diâmetro envoltos em geotêxtil.

3.3.2.1. Faseamento Construtivo

No projeto para a execução das contenções provisórias do Poço P1EV é proposta a divisão em duas fases: secção cilíndrica e secção retangular.

À semelhança da secção cilíndrica, a escavação retangular é realizada por rebaixos, sendo estes compatibilizados com a aplicação de betão projetado, de 15 cm de espessura, e deverá ser iniciada após a estrutura definitiva do poço, que se encontra à cota +76,00m.

Fase 1 (Secção Cilíndrica/Corpo Central):

- 1ª Etapa – Sondagem da localização de infraestruturas enterradas nas imediações da obra;
- 2ª Etapa – Execução de desvios de tráfico e infraestruturas necessárias;
- 3ª Etapa – Limpeza, nivelamento e execução da escavação em taludes, de carácter provisório, até à cota de topo da viga de coroamento (+82,50);
- 4ª Etapa – Execução de um muro guia para execução das estacas com a profundidade necessária. Inclui operações de furação, limpeza de fundo do furo, colocação da armadura e betonagem;
- 5ª Etapa – Saneamento da cabeça das estacas;
- 6ª Etapa – Escavação e execução da viga de coroamento, que solidariza todas as estacas;
- 7ª Etapa – Instalação de dispositivos de instrumentação (alvos, prismas e marcas topográficas, piezómetros e inclinómetros, com realização de zeragem e duas leituras iniciais);
- 8ª Etapa – Aplicação de geodrenos radiais, onde aplicável;
- 9ª Etapa – Escavação da secção circular do poço e aplicação de betão projetado, em camadas de 5cm. A escavação será realizada por níveis, com rebaixos de máximos de 3m;
- 10ª Etapa – Repetição das etapas 8 e 9, até à cota +69,80m;
- 11ª Etapa – Execução do anel de reforço em betão armado;
- 12ª Etapa – Repetição das etapas 8 e 9, até à cota de fundo de escavação prevista em projeto. Na zona de reforço apresentada nas peças desenhadas, execução de duas camadas adicionais de betão projetado;
- 13ª Etapa – Demolição do betão projetado e das estacas na zona de abertura da galeria de ligação ao túnel de via;
- 14ª Etapa – Início da escavação da galeria de ligação.

Fase 2 (Secção retangular/Corpo adjacente):

- 1ª Etapa – Instalação das escoras metálicas de travamento ao longo da viga de coroamento;
- 2ª Etapa – Execução da escavação da secção retangular e aplicação de betão projetado, em camadas de 5cm. A escavação será realizada por níveis, com rebaixos de 3m, até atingir a cota +75,25m;
- 3ª Etapa – Demolição parcial das estacas definitas nas peças desenhadas para ligação entre o poço e abertura à superfície;
- 4ª Etapa – Execução do restante sistema de impermeabilização e da estrutura definitiva.

3.4. Enquadramento da Obra em estudo: Túnel de Ligação TL1

O Túnel de Ligação 1 é um túnel que faz a ligação do poço P1EV ao túnel de via do traçado Casa da Música- Campo Alegre, com um comprimento de, aproximadamente 45 metros e uma altura de, aproximadamente 9 metros.

A escavação do túnel de ligação segue a seguinte sequência construtiva, representada na Figura 32:

- 1) Execução dos tratamentos, a partir do poço de ataque, PEV1;
- 2) Escavação e revestimento do túnel piloto e secção plena, num avanço de 0,8m;
- 3) Escavação da calota, num avanço de 0,8m, com a devida demolição do túnel piloto;
- 4) Remoção dos blocos soltos e aplicação da camada inicial e betão projetado na abóboda e nos hasteais;
- 5) Instalação das cambotas;
- 6) Aplicação de betão projetado com fibras até atingir a espessura final do revestimento projetado com fibras;
- 7) Repetição dos itens 1 a 6 para os próximos avanços;
- 8) Escavação do rebaixo, num avanço de 0,8m, e execução dos tratamentos do solo, segundo colunas *jet-grouting* e projecção da viga de distribuição;
- 9) Remoção dos blocos soltos e aplicação da camada de betão projetado no arco invertido;
- 10) Repetição dos itens 8 e 9, sequencialmente, até terminar a escavação das secções definidas (Xi e Xii);

- 11) Aplicação de camada interior de betão projetado sem fibras de aço, de 20mm, uma vez que cada secção definida tenha sido executada. No entanto, antes da aplicação da mesma o revestimento projetado deve ser lavado a alta pressão (*jet washing*), de modo a promover uma adesão da camada final;
- 12) Execução do sistema de impermeabilização;
- 13) Montagem das armaduras e colocação da cofragem;
- 14) Execução do revestimento secundário em betão moldado;
- 15) Execução dos elementos de fundação internos e de instalações.

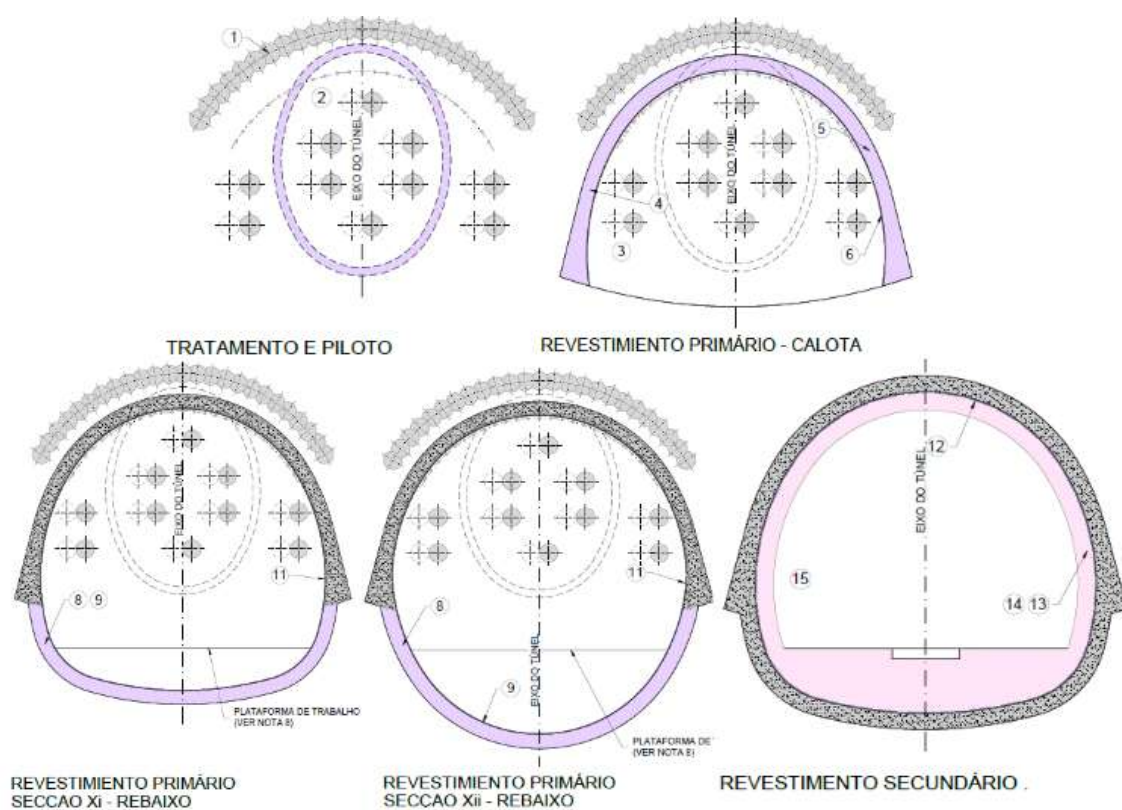


Figura 32- Sequência de construção do Túnel de Ligação 1 (excerto de documento de projeto).

Capítulo IV

Contexto Geológico, Hidrogeológico, Estrutural e Geotécnico da Obra em Estudo

[página propositadamente em branco]

4. Contexto Geológico, Hidrogeológico, Estrutural e Geotécnico da Obra em Estudo

4.1. Enquadramento Geográfico

A obra em estudo encontra-se localizada na antiga freguesia de Massarelos, concelho e distrito do Porto, agora integrada na União das Freguesias de Lordelo do Ouro e Massarelos desde 2013. Segundo o Censo de 2021, a população corresponde a 27 911 habitantes, distribuídos por uma área de 5,34 km². É uma zona urbana consolidada com forte densidade edificada e importante presença de infraestruturas de transporte. A intervenção insere-se numa área de relevo acidentado, com cotas que variam significativamente ao longo de curtas distâncias, refletindo a proximidade ao vale do Douro.

4.2. Enquadramento Geológico

A região (Figura 33) encontra-se principalmente na Zona Centro-Ibérica (ZCI) do Maciço Ibérico (Almeida, 2006). O maciço encontra-se frequentemente fraturado, com orientação preferencial NW-SE, compatível com a tectónica regional.

O Granito do Porto (γm) é um granito alcalino de grão médio a grosseiro leucocrata, de duas micas, representado em extensas áreas na região do Porto, no qual forma numerosas manchas rodeadas pelos xistos metamórficos, que se distingue pela cor mais clara e pela granularidade, geralmente menos grosseira (Carrington da Costa & Teixeira, 1957; Almeida, 2006). Segundo Lacroix (1933), trata-se de um granito alcalino, com moscovite e turmalina. O feldspato

predominante é a albite. No entanto, também se observa ortose. Possui alguma biotite, mas predomina a moscovite. Apresenta cristais de granada almandina e numerosos cristais de turmalina, com inclusões de zircão, rodeados de auréolas pleocróicas. O quartzo forma grandes plagas, que envolvem outros minerais (Carrington da Costa & Teixeira, 1957).

A região é caracterizada por rochas graníticas do período Varisco e por um substrato de rochas metassedimentares do Proterozóico Superior e do Paleozóico (Almeida, 2006). A alteração resulta em arenização que pode atingir profundidades superiores a 30 metros (e.g., Begonha & Sequeira Braga, 2002; Afonso et al., 2009).



Figura 33- Excerto da Carta Geológica de Portugal- 9-C, Porto (Carrington da Costa & Teixeira, 1957). A zona em estudo encontra-se assinalada a vermelho.

4.3. Enquadramento Hidrogeológico

O Plano Diretor Municipal do Porto de 2018 (PDMP, 2018) apresenta uma caracterização biofísica no qual aborda que a bacia de Massarelos tem cerca de 2,2 km² e existem dois setores de linha de água a céu aberto, da ribeira de Vilar, junto à rua dos Burgães e próximo da rua dos Burgães. A bacia hidrográfica de Massarelos, como se verifica na Figura 34, assenta predominantemente em granito de grão médio a fino, por vezes como solo residual.

[illegible]

4.4. Enquadramento Geológico e Geotécnico

Em termos geotécnicos a zona da obra em estudo, Figura 35, insere-se principalmente em solos residuais graníticos medianamente compactos (G4-G), podendo incluir solos residuais compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade (G8).

67

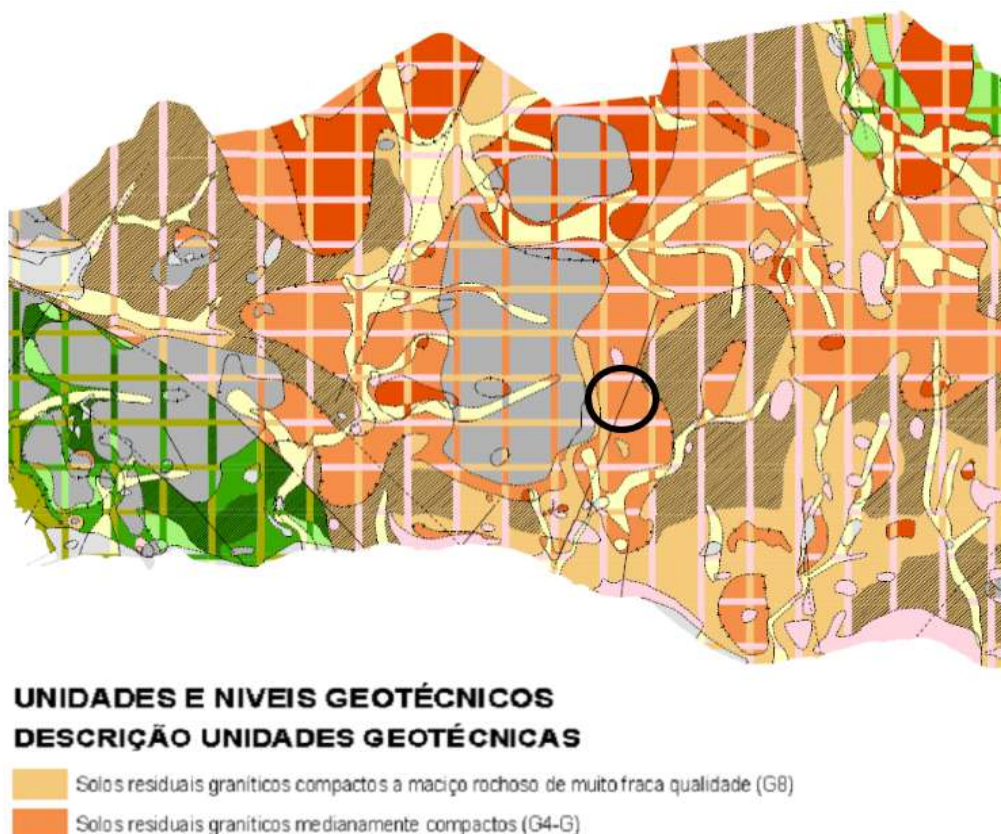


Figura 35- Excerto da Carta Geotécnica do Porto (CMP, 2003). A zona em estudo encontra-se assinalado a preto.

4.5. Enquadramento Geológico-Geotécnico do Poço P1-EV e TL1

Segundo o relatório da sondagem S101, realizada em fevereiro de 2022, o poço P1-EV está essencialmente assente sobre um solo residual granítico, (W_5), de grão fino a médio, silto-argiloso, a uma profundidade entre 5,5 e 17,5 metros. Na profundidade de 17,5 a 22,5 metros há um contacto geológico entre o Granito do Porto com o Complexo Xisto-Gnáissico-Migmatítico, de um migmatito decomposto a muito alterado, numa zona geotécnica X3/X4, argiloso, de grão fino de cor castanha. Até aos 30 metros de profundidade a área em estudo apresenta um granito decomposto a muito alterado, na zona geotécnica G4, de grão fino a médio, siltiloso, de cor acastanhada.

Sendo assim, o poço (Figura 36) encontra à superfície uma camada de aterro com 2 a 4 metros de altura. Um migmatito muito alterado (W_4) com fraturas muito próximas (F_5), em que as condições das descontinuidades são maioritariamente boas (d2-d5), um GSI compreendido no

intervalo de [30-40] e um RMR_{89} entre [35-45], o que indica um maciço fraco a razoável, segundo Hoek *et al.*, 1994, 2007.

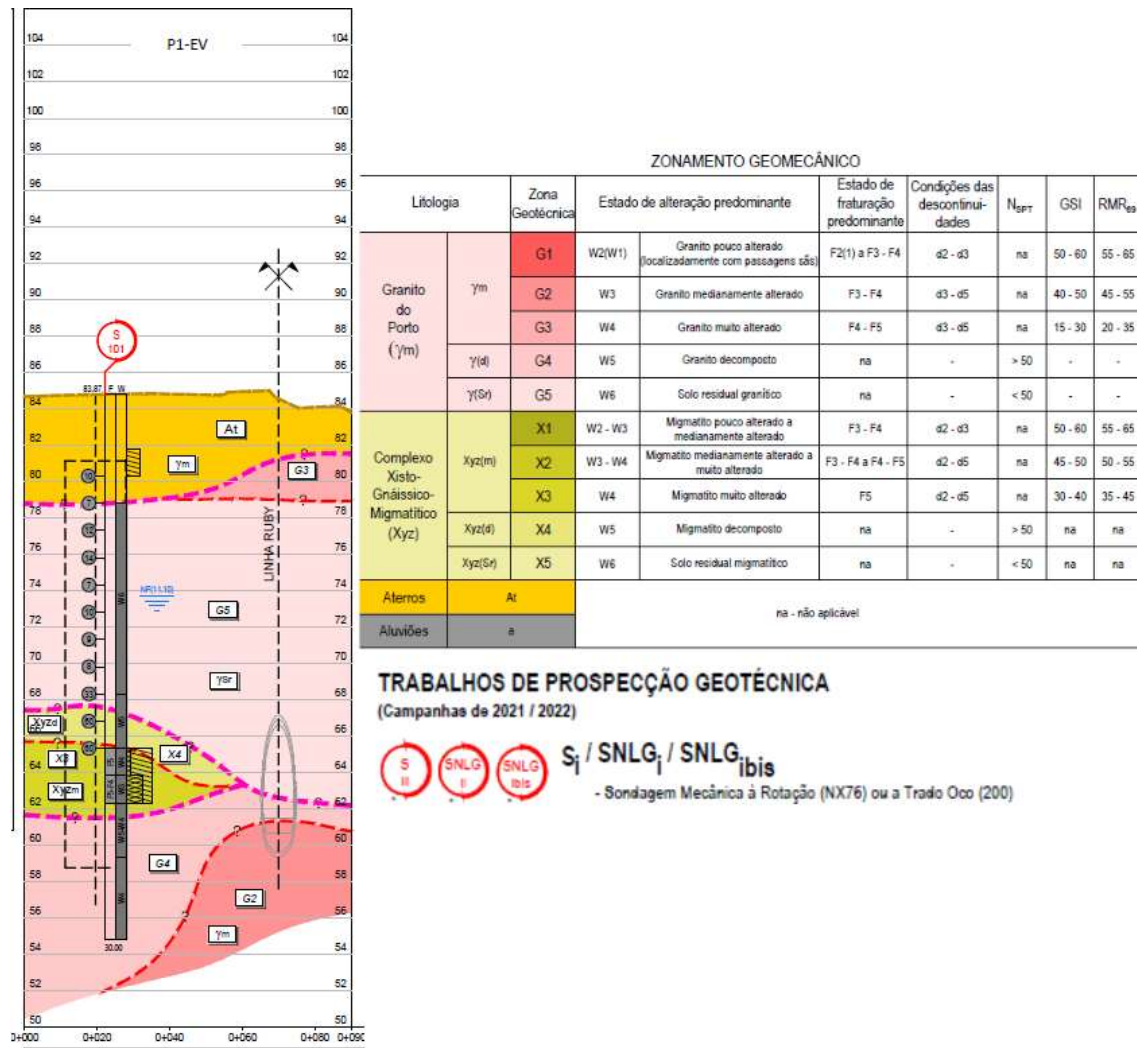


Figura 36- Excerto do Estudo Geológico e Geotécnico- Poço de Ventilação e Emergência 1 (PEV1), da fase de Projeto de Execução.

Relativamente ao túnel de ligação, segundo o estudo geológico-geotécnico (Figura 37) o túnel encontra, maioritariamente, na entrada (emboquilhamento do túnel) um migmatito decomposto a muito alterado, na zona geotécnica X3/X4, juntamente com solo residual granítico (W6), e termina num granito decomposto (W5), mas pode, eventualmente, encontrar granito medianamente alterado (W3), numa zona geotécnica (G2), com um GSI compreendido no intervalo de [40-50] e um RMR_{89} entre [35-45], o que indica um maciço fraco a razoável, segundo Hoek *et al.*, (1994, 2007).

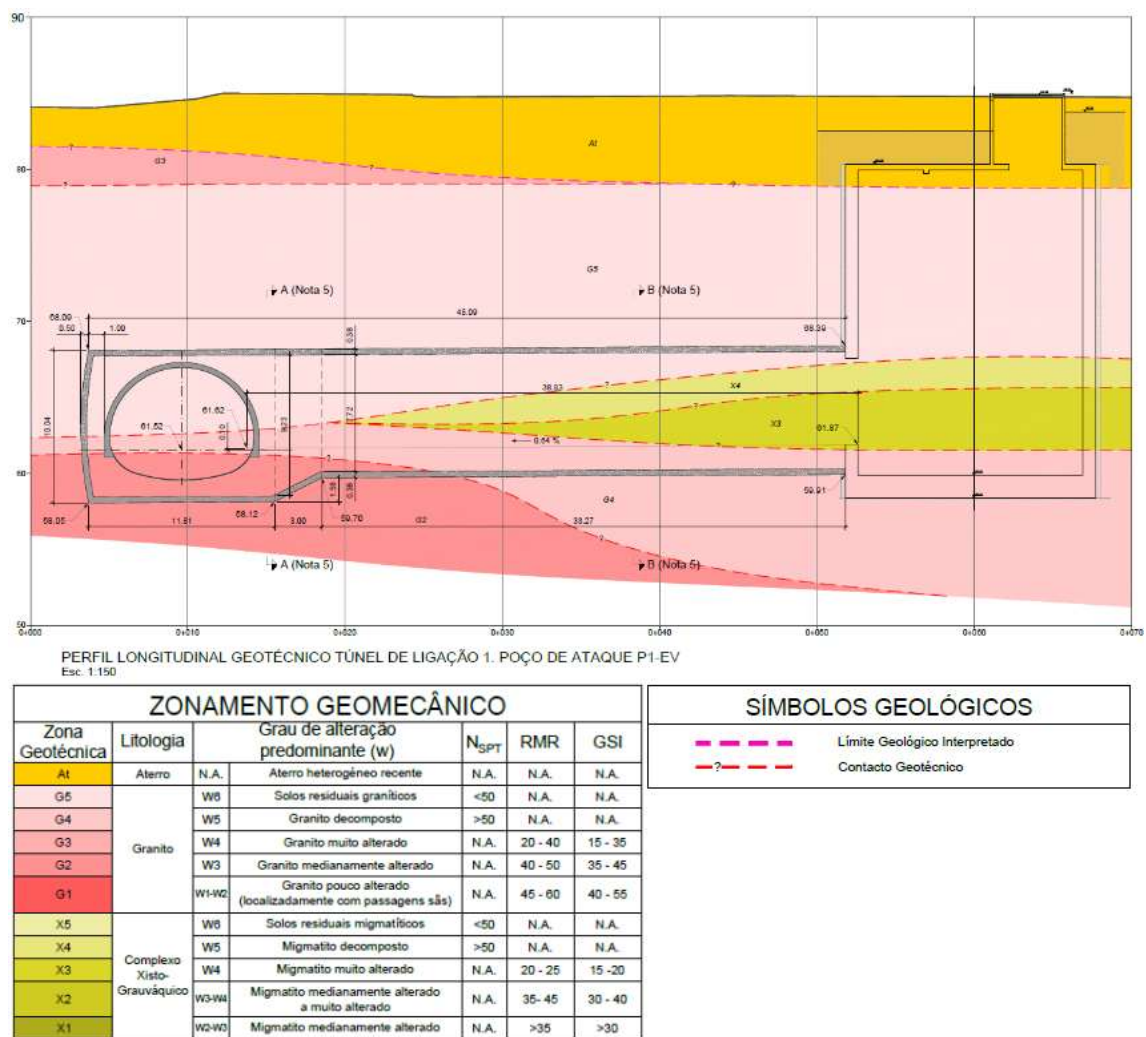


Figura 37- Excerto do Estudo Geológico-Geotécnico, em fase de Projeto de Execução, do perfil do Túnel de Ligação 1 (TL1).

Entretanto, na escavação do poço P1EV foi intersetado, a cotas superiores, aterro sobrejacente e solo residual de granito. Em profundidade e no decorrer da escavação verificou-se a presença de granito decomposto (W_5) com “bolas” de granito medianamente alterado (W_3).

Foram igualmente identificadas surgências pontuais de água, tendo-se a cota aproximada de 64 m, num dreno, medindo-se um caudal de 11 L/min.

Em termos de estruturas, foi identificada a presença de duas zonas de falha, com as seguintes orientações médias:

- F1: N020°, 80°NW;
- F2: N005°, 70°NW.

As zonas de falha são constituídas por material desagregado, ou decomposto, e argila, tal como se observa na Figura 38.

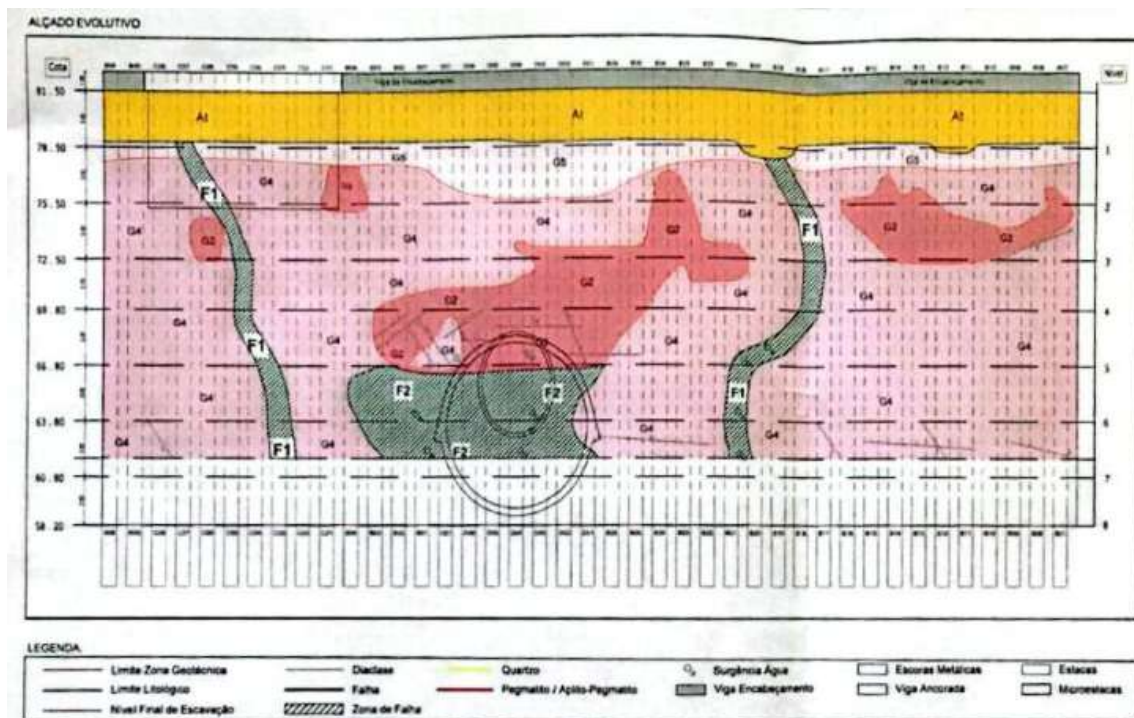


Figura 38- Excerto da cartografia do PEV01, até ao Nível 7.

A escavação do Poço P1EV foi interrompida no final do Nível 7 para se proceder ao avanço da escavação do Túnel de Ligação (TL1), fase de túnel piloto.

Embora no decorrer da escavação do túnel de ligação se tenha procedido ao acompanhamento e cartografia das condições geológico-geotécnicas das frentes de escavação, quer na fase do túnel piloto e, posteriormente, quer na fase de alargamento ao nível da calota e do rebaixo. À data de finalizar este trabalho, esta informação ainda não estava processada e, por essa razão, não serão tecidas quaisquer considerações.

[página propositadamente em branco]

Capítulo V

Instrumentação e Monitorização da Frente de Obra em Estudo

[página propositadamente em branco]

5. Instrumentação e Monitorização da Frente de Obra em Estudo

5.1. Introdução

O plano de monitorização do caso em estudo foi definido com base em princípios fundamentais com o objetivo de garantir a segurança e a eficácia da obra subterrânea em todas as fases de execução.

O projeto considerou a identificação de possíveis deslocamentos e deformações que possam ocorrer ao nível da envolvente, do maciço e da própria estrutura em construção, e que possam conduzir a movimentos nas estruturas vizinhas.

Posteriormente, procedeu-se à identificação das respetivas causas e consequências, isto é, possível rebaixamento dos níveis freáticos, acréscimo de esforços, características de resistência e deformabilidade do solo de qualidade fraca, ocorrência de condições geológico-geotécnicas não suscetíveis de serem identificadas em fase de projeto, etc.

Com base nesta avaliação, definiram-se os parâmetros a controlar nos edifícios vizinhos da obra, no maciço e nas contenções, nomeadamente a medição de deslocamentos verticais e horizontais, entre outros.

A seleção dos dispositivos de instrumentação a utilizar baseia-se nos parâmetros a controlar, na localização das estruturas e na acessibilidade para instalação e leitura.

Por fim, definiu-se a metodologia de recolha e registo a utilizar para as leituras, que inclui a periodicidade, os equipamentos de aquisição de dados, o armazenamento e a apresentação da informação, e os critérios de referência para alerta/alarme.

5.2. Plano de Instrumentação do Projeto

De acordo com as boas práticas de engenharia, os equipamentos de monitorização, como alvos e prismas topográficos, entre outros, deverão ser instalados o mais cedo possível nos locais previamente definidos, acompanhando o avanço das estruturas de contenção e dos trabalhos de escavação.

Todos os dispositivos a instalar à superfície e em edifícios adjacentes, cuja colocação não dependa do início dos trabalhos, devem estar instalados e operacionais antes do início das atividades de construção.

Deve ser efetuada uma leitura inicial de referência (zeragem) de todos os instrumentos, acompanhada do registo preciso das coordenadas iniciais, garantindo uma base fiável para a comparação e análise das leituras subsequentes ao longo da execução da obra.

5.2.1. Poço de Ventilação e Emergência- P1EV

No projeto de execução do P1EV, foram propostas as seguintes quantidades de elementos de monitorização (Tabela 9), sendo que nem toda a instrumentação definida no projeto foi aplicada, pois foi necessário ajustá-la às condições locais, bem como foi adotada instrumentação adicional considerada relevante face ao contexto da obra.

A Figura 39 apresenta, em planta e em cortes, a localização dos diferentes dispositivos de instrumentação.

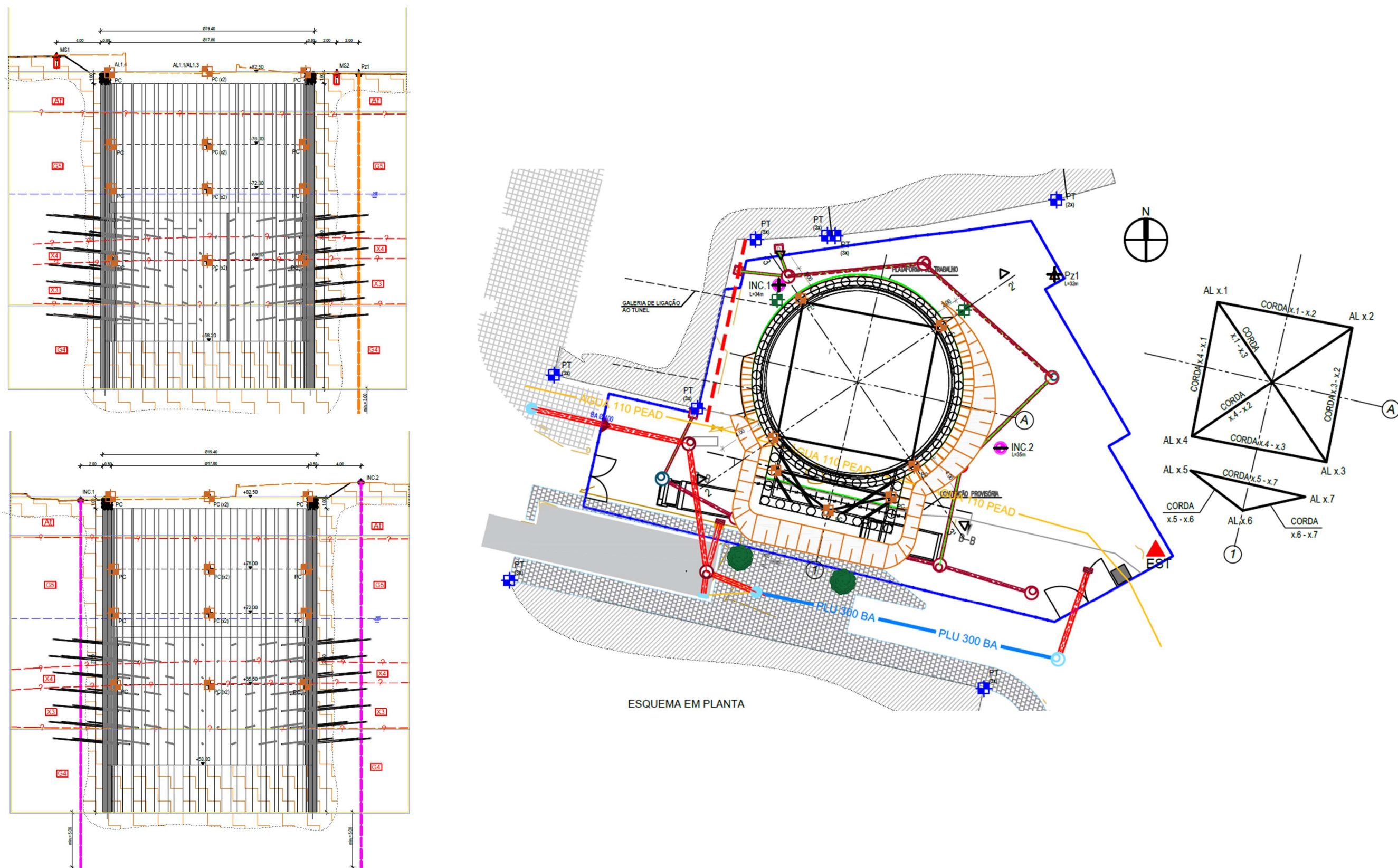


Figura 39- Plano de Instrumentação do Poço P1EV (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA): Representações de cortes e em planta.

Tabela 9- Quantidade de dispositivos e respectiva simbologia no PEV01.

DISPOSITIVO DE INSTRUMENTAÇÃO	SÍMBOLO	QUANTIDADE (UN)
PRISMA DE EDIFÍCIOS (PE)		23
PRISMAS DE PAVIMENTO (PP)		2
PRISMA DE CONTENÇÃO (PC)		19
INCLINÓMETROS (INC)		2
PIEZÓMETROS (PZ)		1

5.2.2. Túnel de Ligação e Edificações

Tal como no P1EV, na envolvente do poço, isto é, nas edificações, no túnel de ligação e na galeria principal, foram propostas as quantidades de dispositivos apresentadas na Tabela 10.

A Figura 40 apresenta um esquema em planta da localização da instrumentação apresentada na Tabela referida anteriormente.

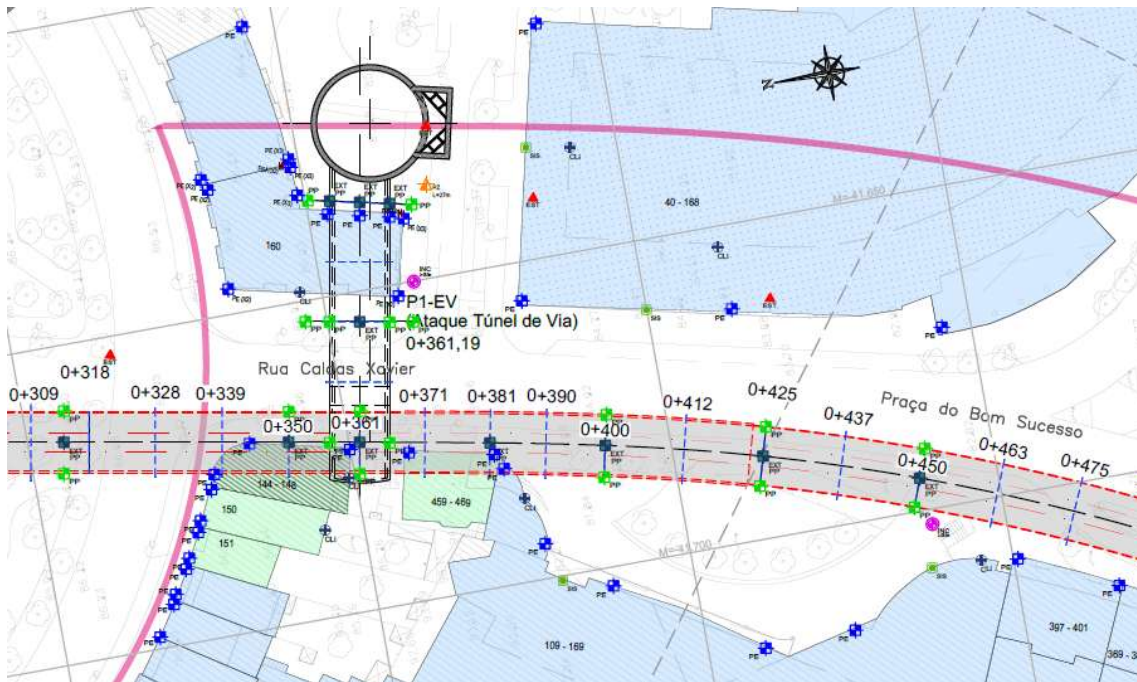


Figura 40- Plano de Instrumentação do túnel mineiro de ligação ao P1EV (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

Tabela 10- Dispositivos de instrumentação, respectivas quantidades e simbologia.

DISPOSITIVO DE INSTRUMENTAÇÃO	SÍMBOLO	QUANTIDADE (UN)
ESTAÇÃO TOTAL (EST)		4
PRISMA DE REFERÊNCIA (PR)		22
PRISMA DE EDIFÍCIOS (PE)		35
INCLINÓMETROS FURAÇÃO (INC)		2
PIEZÓMETROS (PZ)		1
EXTENSÓMETROS (EXT)		11
PRISMAS DE PAVIMENTO (PP)		31
CLINÓMETROS (CLI)		7
SISMÓGRAFOS (SIS)		4
FISSURÓMETROS MANUAIS/AUTOMATIZADOS (FISM/FISMA)	 FIS M/A	3

5.2.3. Leituras e Limites de Referência

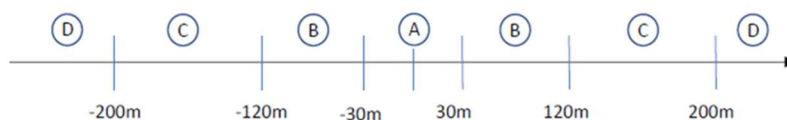
Neste subcapítulo, são apresentadas as frequências de leitura e os limites de referência, que servem de base de comparação com os valores medidos, ou seja, os valores de alerta e de alarme.

A leitura inicial (zeragem) define-se como a leitura de referência para avaliar a evolução das grandezas medidas ao longo da execução da obra. A zeragem deve ser obtida através da média de, pelo menos, três leituras efetuadas em dias distintos, antes do início dos trabalhos e num prazo mínimo de 30 dias.

A frequência das leituras dos diferentes dispositivos de instrumentação, em cada uma das frentes de obra é a seguinte:

- No Poço P1EV os instrumentos: prismas de edifícios, fissurômetros, prismas de pavimento, inclinômetros, piezômetros e prismas de contenção, são lidos com a seguinte frequência:
 - Leituras de referência: 2 leituras antes de serem iniciados os trabalhos;

- Leituras durante os trabalhos: 2x por semana;
 - Após o término dos trabalhos: 1x por mês até adquirir estabilidade.
- No Túnel de Ligação (TL1), os instrumentos: prismas de edifícios, fissurômetros, clinômetros, sismógrafos, prismas de pavimento, extensômetros, inclinômetros, piezômetros e prismas de convergência/contenção são lidos de acordo com a frequência a seguir indicada (Tabela 11):



Instrumentação	Pre-zona de influencia (D) (>200m)	Pre Zona de influencia (C) (200m ≤ e >120m)	Pre Zona de influencia (B) (120m ≤ e >30m)	Zona de influencia (A) (<30m)
Marca topografica	A cada 15 dias	1 vez por semana	Diário	2 vezes ao dia
Extensometro	A cada 15 dias	1 vez por semana	Diário	Diário
Piezometro	A cada 15 dias	1 vez por semana	2 vezes por semana	3 vezes por semana
Inclinometros	A cada 15 dias	1 vez por semana	Diário	Diário
Alvo Topografico	A cada 15 dias	1 vez por semana	Diário	2 vezes ao dia
Fissuometro	A cada 15 dias	1 vez por semana	Diário	Diário
Clinometro	A cada 15 dias	1 vez por semana	Diário	Diário
Sismografo	A cada 15 dias	1 vez por semana	Diário	Diário

Tabela 11- Frequência de leituras para o túnel mineiro de ligação ao P1EV (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

É de salientar que os dispositivos de instrumentação de leitura automatizada apresentam leituras com frequência superior à prevista no projeto, nomeadamente prismas, clinômetros, sismógrafos, alguns fissurômetros, extensômetros e alguns piezômetros.

No decorrer das leituras, caso se identifique alguma anomalia, a periodicidade das leituras poderá ser adaptada, de forma mais ou menos temporária, tendo em conta a situação detetada.

Os valores de referência são definidos em projeto e correspondem aos deslocamentos considerados normais ou aceitáveis, que permitem avaliar o comportamento da obra à luz dos pressupostos do projeto.

O valor de alerta corresponde a cerca de 100% do valor de cálculo esperado e indica se o deslocamento pode estar a aumentar além do esperado, sendo, assim, uma indicação de comportamento que exige atenção e consequente monitorização intensificada.

O valor de alarme corresponde a cerca de 125% do valor de cálculo esperado e indica uma situação potencialmente de risco para a estabilidade e/ou segurança da estrutura ou da envolvente monitorizada e, assim, será necessário tomar medidas imediatas.

Na eventualidade de dois níveis de alerta sucessivos serem atingidos no mesmo instrumento de medição, os vários interlocutores serão informados num prazo máximo de 48 horas, identificando quais são os pontos em que tal se verifica e os valores atingidos.

Caso seja atingido um nível de alarme, a leitura deverá ser imediatamente reconfirmada. Em situação de confirmação da mesma, os vários interlocutores serão informados num prazo máximo de 24 horas, havendo lugar à abertura de um processo de análise do ocorrido, com a elaboração obrigatória, por parte do empreiteiro, de um relatório para apreciação e parecer do projetista, o qual deverá indicar as medidas a adotar.

Os valores de referência, de alerta e de alarme, segundo o projeto, são apresentados nas Tabelas 12 e 13. No entanto, estes valores de referência poderão não corresponder aos valores usados em fase de execução.

Na Tabela 12, os edifícios são identificados pelos códigos numéricos das fichas do levantamento patrimonial, presentes no plano de instrumentação do túnel mineiro de ligação ao P1EV, das Figuras 39 e 40.

Tabela 12- Limites de alerta e de alarme dos dispositivos de instrumentação dos edifícios, em projeto (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

DISPOSITIVO DE INSTRUMENTAÇÃO	EDIFÍCIOS	LIMITES	
		ALERTA	ALARME
PRISMAS DE EDIFÍCIOS (PE)	40_168	3	4
	160	1	2
	144_148	60	75
	459_469	3	4
CLINÓMETROS (CLI)	40_168; 160; 150; 109_169	1/3000	1/2500
SISMÓGRAFOS (SIS)	40_168; 109_169	NP 2074: 2015 **	

**norma que estabelece limites de vibração, de frequência e de métodos de fixação e registo para a monitorização de vibrações via sismógrafos.

Tabela 13- Limites de alerta e de alarme, em projeto (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

DISPOSITIVO DE INSTRUMENTAÇÃO		LIMITES	
		ALERTA	ALARME
INCLINÓMETROS (INC)		5	7
PIEZÓMETROS (PZ)		ND	ND
POÇO			
PRISMAS DE CONTENÇÃO (PC)	DESLOCAMENTO HORIZONTAL	18	22
	DESLOCAMENTO VERTICAL	21	25,5
TÚNEL			
PRISMAS DE PAVIMENTO (PP)		1-3*	2-4*
EXTENSÓMETROS (EXT)		1-6*	2-7*
PRISMAS DE CONTENÇÃO (PC)		1 (mm)	2 (mm)

*intervalo em que se prevê maior deformação.

Capítulo VI

Análise da Monitorização Instalada na Frente de Obra - Gráficos e Variação de Valores

[página propositadamente em branco]

6. Análise da Monitorização Instalada na Frente de Obra em Estudo – Gráficos e Variação de Valores

6.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar, organizar e interpretar os dados obtidos através das leituras dos diversos dispositivos de instrumentação apresentados no capítulo anterior, com o objetivo de avaliar a evolução temporal dos parâmetros relevantes à estabilidade das estruturas envolventes, do maciço e das estruturas em construção.

Os dados recolhidos são apresentados na plataforma SIGTUN, disponibilizados em formato numérico e gráfico. Nos gráficos, o eixo horizontal (x) representa o tempo, expresso em data e o eixo vertical (y) representa a grandeza do parâmetro monitorizado.

A variação do parâmetro monitorizado ao longo do tempo e no decorrer da fase construtiva da obra permitirá avaliar se os valores medidos correspondem ao comportamento esperado para o tipo de estrutura e o dispositivo monitorizados.

Sendo assim, nos subcapítulos seguintes, proceder-se-á à análise de cada dispositivo, referindo-se o procedimento de leitura para cada dispositivo, as tendências observadas e eventuais desvios face aos valores de referência definidos em projeto.

Os respetivos gráficos de cada dispositivo são apresentados tendo em consideração a estrutura relevante dentro da zona de influência, isto é, analisam-se as eventuais consequências no maciço

circundante, nas estruturas (edifícios) envolventes e nas estruturas em construção, quer ao nível do poço de ventilação e emergência, quer ao nível do túnel de ligação.

É importante assinalar que a plataforma SIGTUN é utilizada para gerir os dados que dão origem aos gráficos apresentados neste capítulo.

Os símbolos dos dispositivos são apresentados com a coloração verde quando apresentam valores espectáveis e laranja e vermelha quando atingem os limites de alerta e alarme, respetivamente.

Quando são atingidos os limites de alerta e alarme não implica necessariamente uma situação de perigo real, ou seja, deslocamentos significativos que prejudiquem a estrutura, podem representar leituras anómalas ou até interferências na aquisição dos dados.

Adicionalmente, é possível encontrar dispositivos representados a cinzento, o que significa que já não estão ativos, mas as suas leituras continuam disponíveis para consulta e análise retrospectiva.

Nos gráficos, os limites encontram-se representados em formato de linhas horizontais, paralelas ao eixo x, correspondentes ao valor de alarme e alerta. A linha laranja corresponde ao limite de alerta e a linha vermelha ao limite de alarme.

Pode também, haver a representação de uma linha azul tracejada que permite balizar os valores quando não estão definidos valores limites que possibilitam o acompanhamento e a evolução das leituras.

Na apresentação dos gráficos optou-se por considerar médias semanais ou até médias diárias dos dados registados em cada um desses dispositivos, pois há registo de várias leituras por dia porque a maioria dos dispositivos são de leitura automatizada.

Complementarmente e de maneira a contextualizar os dados temporais, procede-se à identificação dos principais eventos construtivos relevantes que possam influenciar diretamente os valores registados pelos dispositivos. Estes eventos (Tabela 14) servem de referência para a interpretação de variações ou tendências observadas nas leituras dos vários dispositivos de instrumentação.

Tabela 14- Eventos relevantes da obra em estudo.

EVENTOS	INÍCIO	FIM
TRABALHOS DAS ESTACAS	30/08/2024	31/10/2024
ESCAVAÇÃO DO POÇO (ATÉ AO NÍVEL 7)	07/12/2024	04/03/2025
ESCAVAÇÃO DO TL1	22/04/2025	30/06/2025

Os dispositivos podem ser compilados segundo a estrutura na qual vão proceder medições:

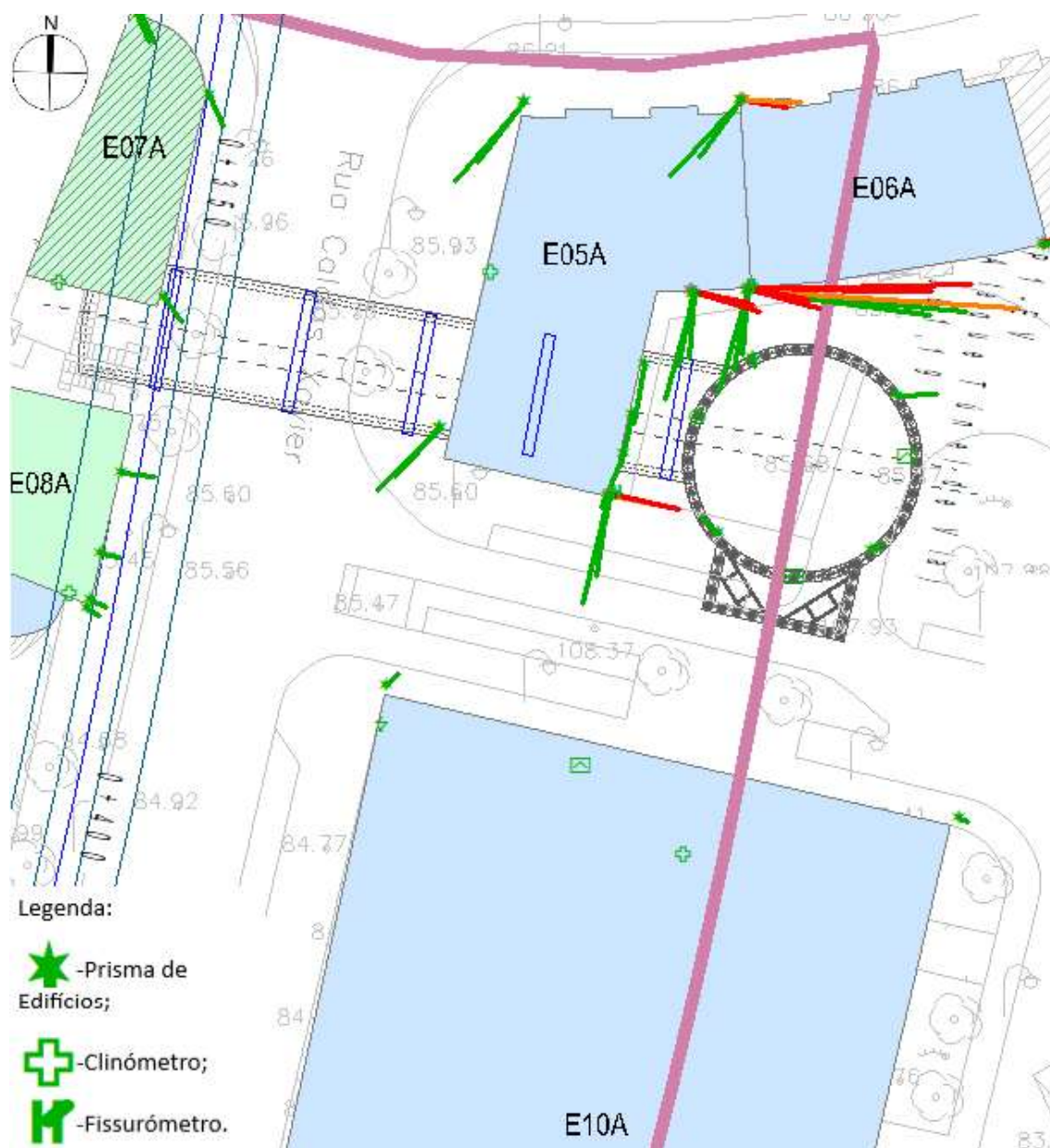
- Estruturas Envolventes (Edifícios): Prismas de Edifícios, Clinómetros, Fissurómetros e Sismógrafos;
- Maciço Envolvente: Prisma de Pavimento, Extensómetros, Inclínómetros e Piezómetros;
- Seções de Convergência/Contenções: Prismas nas estruturas de contenção em construção (Poço P1EV/Túnel TL1) e respetivas cordas (distância entre prismas).

6.2. Estruturas Envolventes (Edifícios)

Os edifícios da envolvente da obra do poço/túnel foram monitorizados com prismas de edifícios, fissurómetros, clinómetros e sismógrafos.

Tal como se observa na Figura 41, os edifícios mais relevantes da envoltória das frentes de obra (Poço e Túnel de Ligação) são os seguintes:

- **E05A:** dezassete prismas de edifícios, um clinómetro e dois fissurómetros;
- **E06A:** sete prismas de edifícios e na junta de dilatação, na junta do E05A foram instalados dois fissurómetros;
- **E07A:** encontram-se instalados quatro prismas de edifícios e um clinómetro;
- **E08A:** foram instalados quatro prismas de edifícios e um clinómetro;
- **E10A:** foram instalados dois sismógrafos, quatro prismas de edifícios e dois clinómetros.



- **Prismas de Edifícios**

Os Prismas de Edifícios (PE) dos edifícios E05A e E06A foram instalados em três unidades, de cada lado na junta de dilatação, com a sequência que se verifica no esquema representativo da Figura 42. Foram igualmente instalados três prismas no canto da fachada do E05A e apenas um ou dois prismas, em outros cantos das fachadas de edifícios, como se verifica na Figura 41.



Figura 42- Esquema representativo da disposição de Prismas de Edifícios na junta dos edifícios E05A e E06A.

Sendo assim, irá analisar-se deslocamentos do módulo (X/Y) correspondentes a movimentos de rotações; deslocamentos verticais, isto é, assentamentos; deslocamentos segundo X e Y de fissuras; e juntas de dilatação, variações angulares X, Y e Z.

6.2.1. E05A

No edifício E05A (Figura 43) é de notar que alguns prismas de edifícios (PE05, PE04, PE03, PE8, PE9 e PE10) foram instalados antes da escavação do poço, em meados de novembro de 2024. Os prismas PE05, PE04 e PE03 encontram-se identificados a cinzento.

Outros prismas foram instalados durante a escavação do poço (PE13 e PE14). Durante o término e após a escavação do poço foram instalados os restantes prismas (PE4, PE5, PE3, PE32).

O mês de instalação irá ser relevante neste subcapítulo devido ao facto da existência de variados prismas a cinzento, isto é, já não se encontram ativos. Estes prismas também apresentam o

Relativamente ao deslocamento da componente X/Y, o edifício evidencia uma tendência crescente que inicia durante a escavação do poço e se acentua durante a escavação do túnel de ligação, o que sugere a ocorrência de rotação ou deformação diferencial, e não apenas de um movimento rígido do edifício. Pode, assim, ser interpretado como um ligeiro tombamento ou inclinação do edifício, na direção dos prismas mais próximos do poço, isto é, no sentido da escavação, conforme se verifica na legenda do gráfico da Figura 44, PE3, PE8, PE9, PE10, PE4 e PE5.

Os deslocamentos dos prismas de edifícios a cinzento registados como PE03, PE04 e PE05, encontram-se na Figura 45.

No gráfico do deslocamento vertical verifica-se uma elevada variabilidade e pontualidade de picos, o que pode indicar instabilidades de leitura, pois os deslocamentos não estão associados às escavações em curso, isto é, as deformações iniciam-se antes da escavação do poço e atingem os limites de alerta e de limite.

No gráfico do deslocamento do módulo X/Y denota-se um crescimento progressivo evidente e os prismas ultrapassam os limites de alerta e de alarme.

Sendo assim, os prismas de edifícios detetaram deformações antes de iniciar trabalhos nesta empreitada, quando instalados em novembro de 2024, significando que foram expostos a interferências externas, isto é, podem ter sido posicionados em zonas de influência de obras adjacentes em curso, distintas da escavação do poço em estudo (PEV01).

É necessário destacar que os prismas PE03, PE04 e PE05 encontram-se em zonas com sobreposição de frentes de obra, o que gerou movimentos induzidos não diretamente relacionados com a escavação em análise, comprometendo a interpretação isolada dos dados. Assim, apesar de os deslocamentos registados ultrapassarem os limites predefinidos da Tabela 15, não refletem exclusivamente os efeitos da obra monitorizada devendo assim ser contextualizado o plano de intervenções urbanas na envolvente e reformulado a localização da estação total e dos prismas de edifícios do plano de monitorização.

Essa reformulação é evidente nos gráficos anteriores da Figura 44, onde se verifica a mudança de limites de alarme e alerta para 45mm e 50mm, respetivamente, e na instalação de novos prismas (PE3, PE4 e PE5).

Tabela 15- Limites de alarme e de alerta dos deslocamentos dos Prismas de Edifícios - PE03, PE04 e PE05, do E05A.

DESLOCAMENTOS	LIMITE DE ALERTA	LIMITE DE ALARME
VERTICAIS (ASSENTAMENTOS)	3	5
MÓDULO X/Y (ROTAÇÕES)	9	11

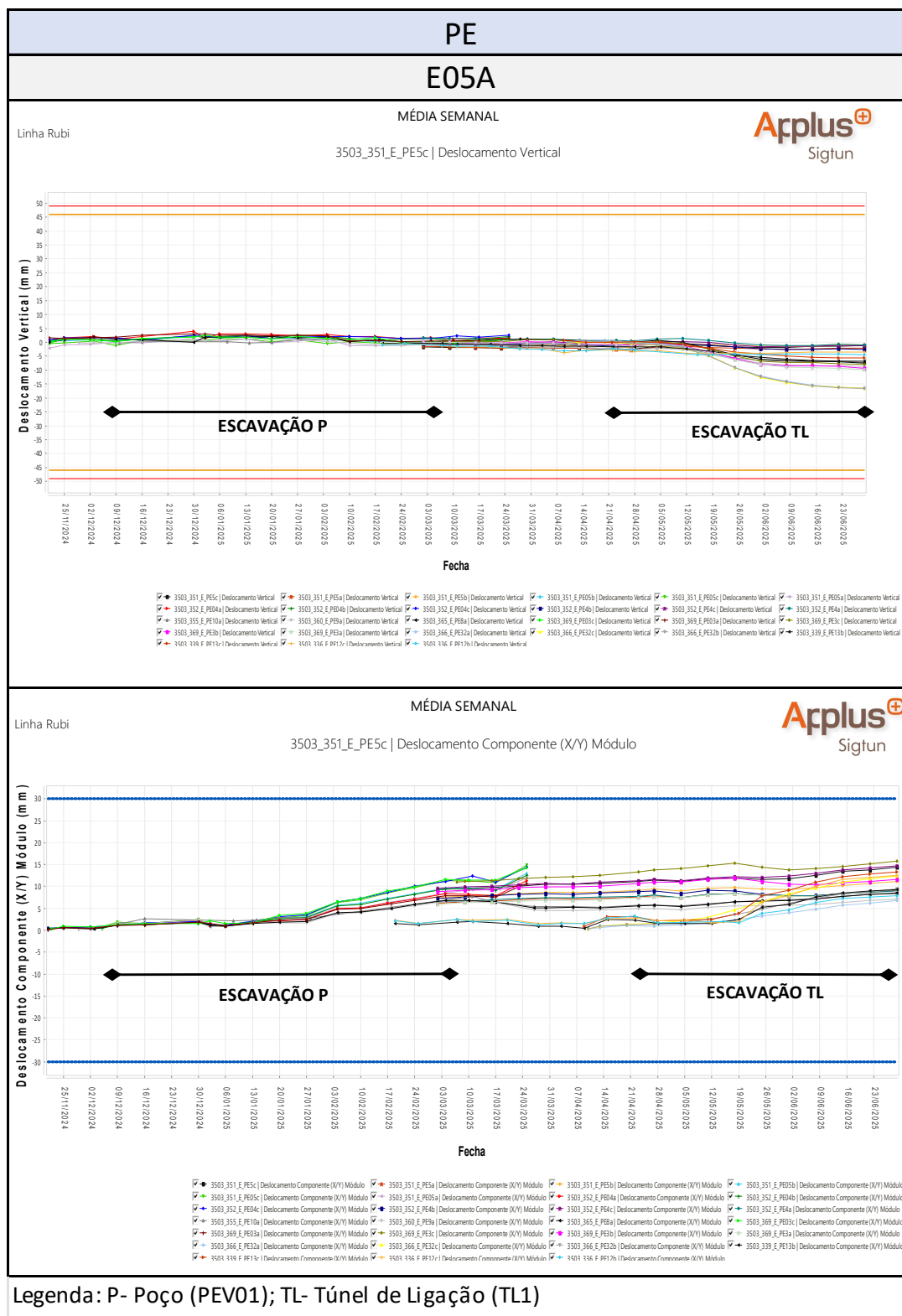


Figura 44 - Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y, de Prismas de Edifícios, do E05A.

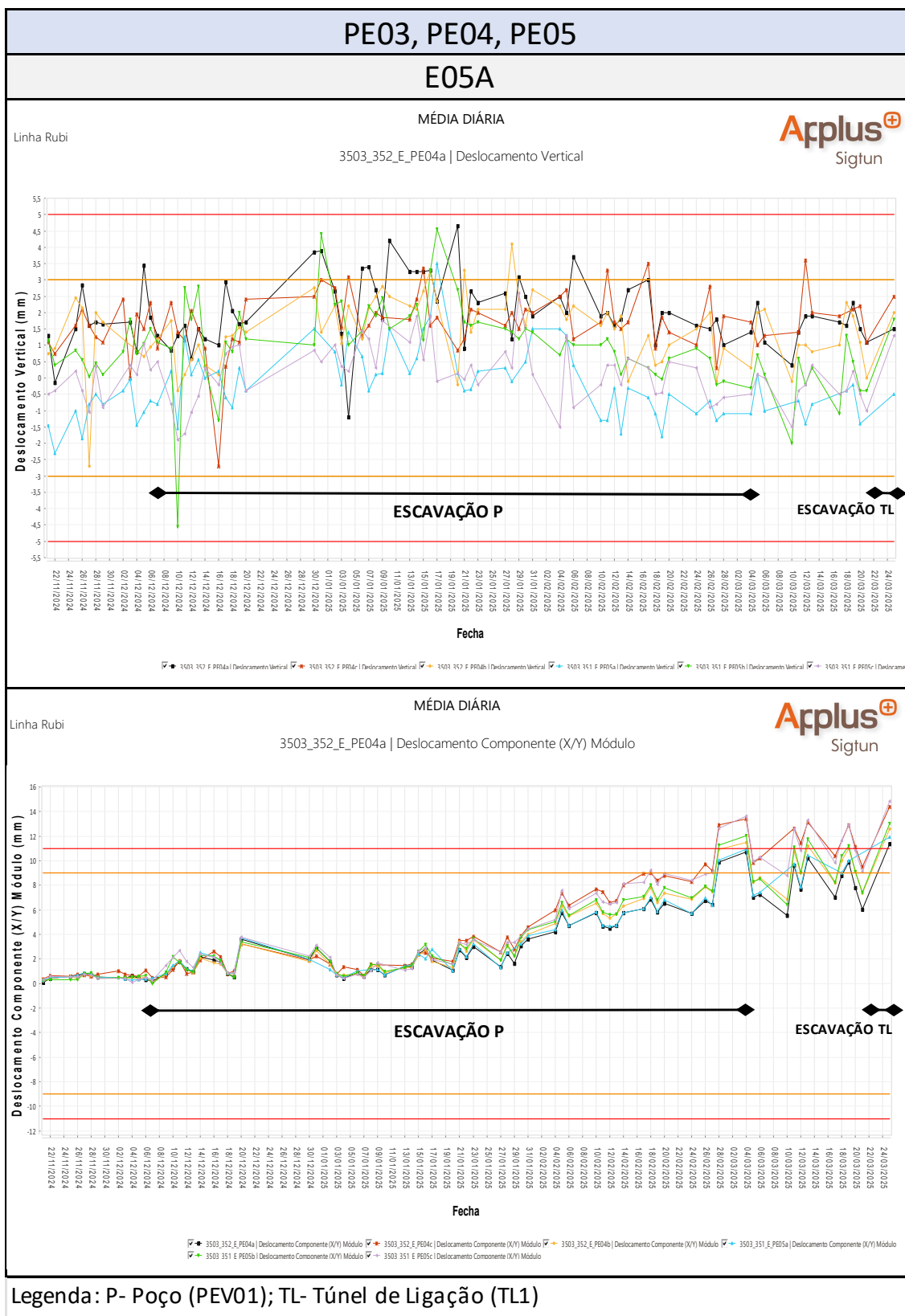


Figura 45 - Média diária do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y, dos Prismas de Edifícios- PE03, PE04 e PE05 do E05A.

- **Fissurómetro Manual**

A Figura 46 apresenta um gráfico da média semanal do deslocamento X/Y registado por um fissurómetro, localizado numa fissura pré-existente à obra, perto dos prismas PE3/PE03.

Esta fissura não registou nenhuma alteração durante a fase da escavação do poço, nem no decorrer da escavação do túnel de ligação.

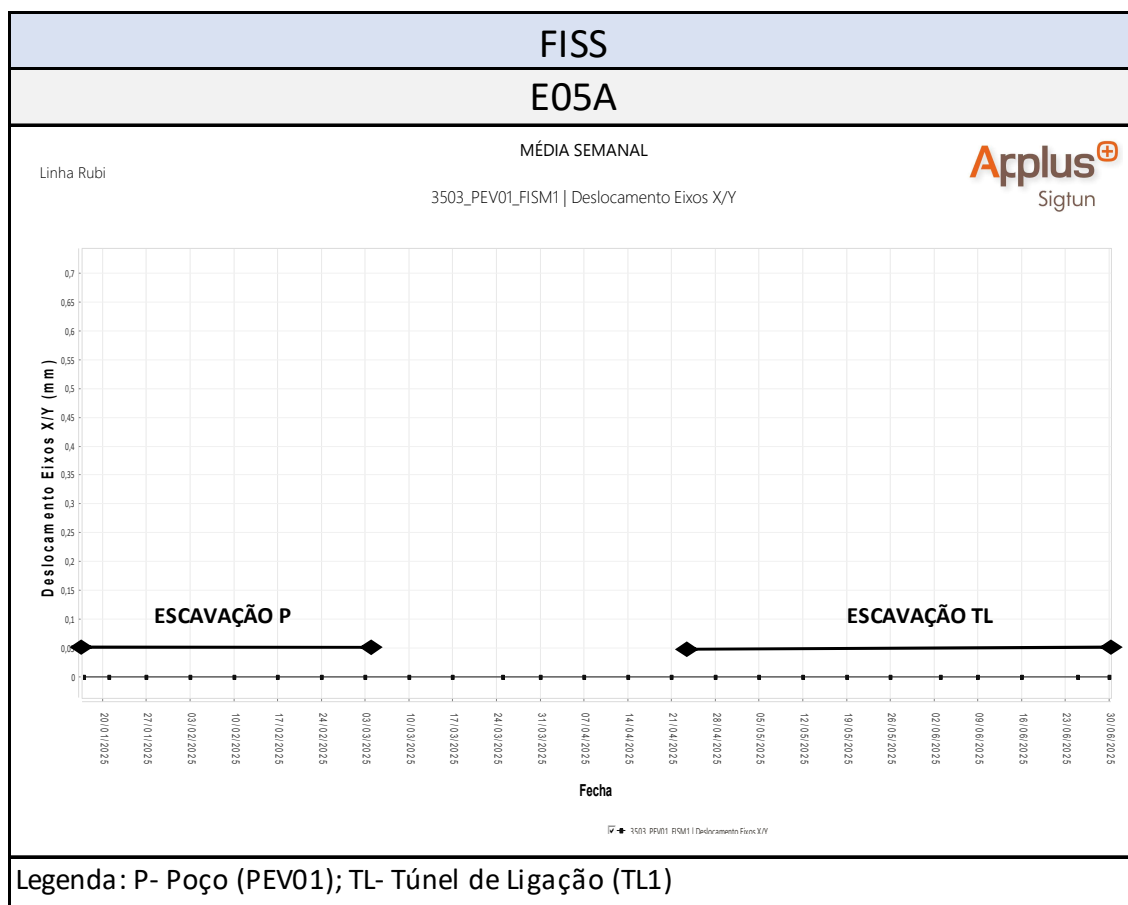


Figura 46- Média semanal do deslocamento do eixo X/Y do Fissurómetro do E05A.

6.2.2. E06A

Os prismas de edifícios do edifício E06A encontram-se localizados segundo a Figura 47 e tal como no edifício E05A os prismas, instalados a meados de novembro (PE06 e PE07), representam os prismas cinzentos e os respetivos vetores a vermelho, os que ultrapassam os limites de alerta.

A meados de fevereiro de 2025 foi instalado o prisma PE11 e a 2 de março foram instalados os prismas PE6 e PE7, antes da escavação do túnel de ligação.

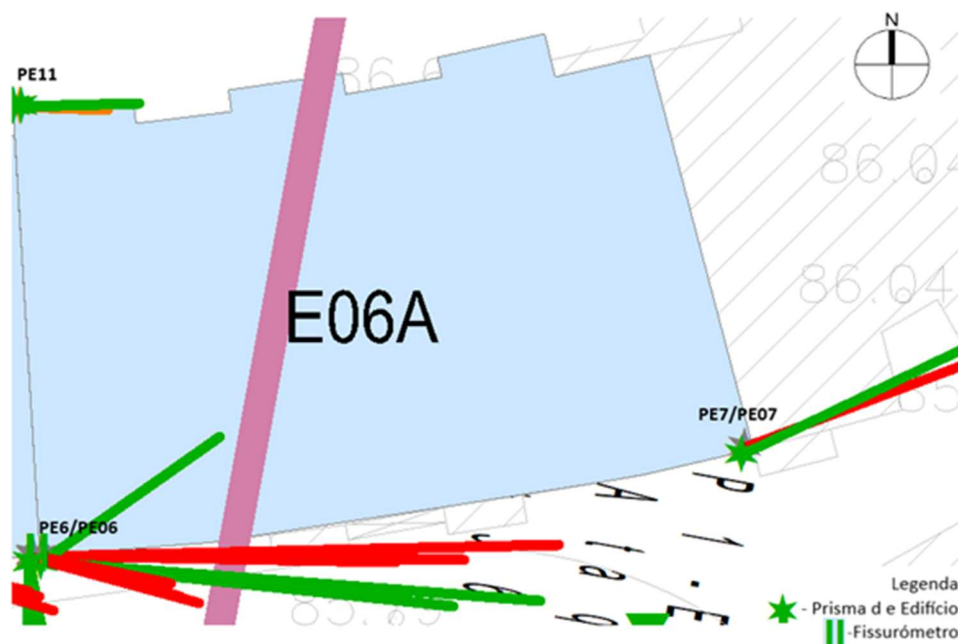


Figura 47- Edifício E06A e localização dos respectivos Prismas de Edifícios e Fissurômetro (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

Na Figura 49 verificam-se que os prismas de edifícios PE7c e PE07c registaram valores acima dos limites de alerta e de alarme, isto é, deslocamentos verticais a aproximadamente -15mm, o que indica assentamentos no extremo sudeste do edifício.

Os prismas PE11 também registam assentamentos de 6mm, mas os deslocamentos verticais não ultrapassam os limites de alarme e de alerta.

Os restantes prismas PE6 (a, b, c) indicam aumento de valores em relação à origem, o que podem estar associados a fenómenos de efeitos de empuxo ou recalque diferenciais que atingem os 4,2mm.

Sendo assim, os prismas PE11 e PE6 (a, b, c) registam um assentamento diferencial (Figura 48), isto é, enquanto o PE11 apresenta movimentos descendentes (negativos), o PE6 apresenta movimentos ascendentes (positivos), logo o edifício E06A está a sofrer um assentamento diferencial, a Oeste, induzido pelas escavações.

Relativamente aos deslocamentos do plano X/Y, os prismas registaram movimentos horizontais que atingem os 55mm. Todos os prismas exceto o PE11, excedem os limites de referência.

É importante salientar que o PE6 e PE06 regista movimentos da junta da dilatação, juntamente com os prismas PE5 e PE05, gerou-se os seguintes gráficos da Figura 51.

O deslocamento vertical para os prismas a cinzento, PE06 e PE07, como se verifica na Figura 50 apresentam pontualmente picos, com um máximo de 4mm, mas nenhum ultrapassa os limites de alerta e de alarme. No entanto, no deslocamento do plano X/Y, tal como no edifício E06A, os prismas evidenciam um crescente deslocamento, que na fase de escavação do poço ultrapassa os limites de alarme e de alerta (20mm e 22mm, respetivamente) e manifestam um deslocamento do plano X/Y de 55mm.

Para melhor compreensão do movimento referente à junta de dilatação (Figura 51) observa-se assentamentos até aos -6mm e 4,5mm, respetivamente. E o deslocamento do plano X/Y até 55,7mm. Tais deslocamentos ocorrem antes de se iniciar a escavação do poço, o que indica novamente que a deformação pode não ser da influência da obra em estudo.

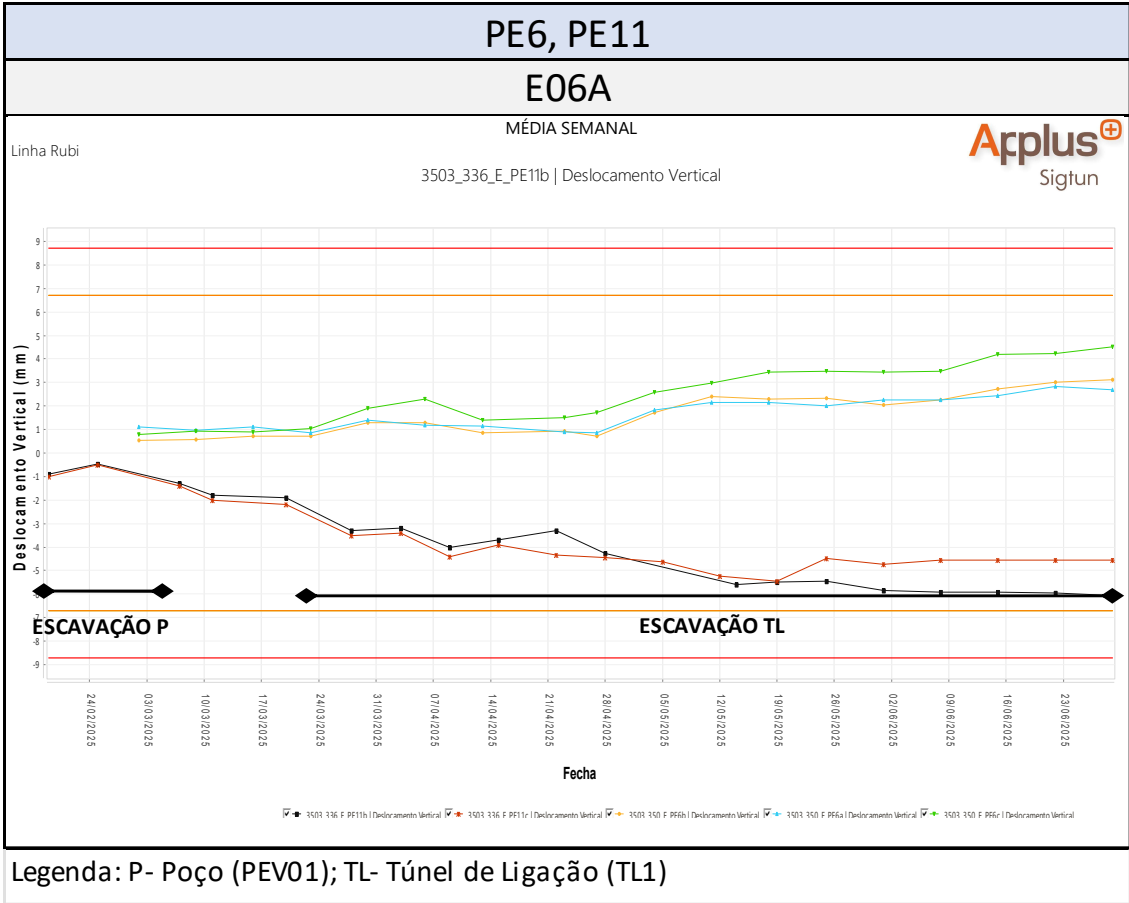


Figura 48- Média semanal do deslocamento vertical dos Prismas de Edifícios PE6 e PE11, do E06A.

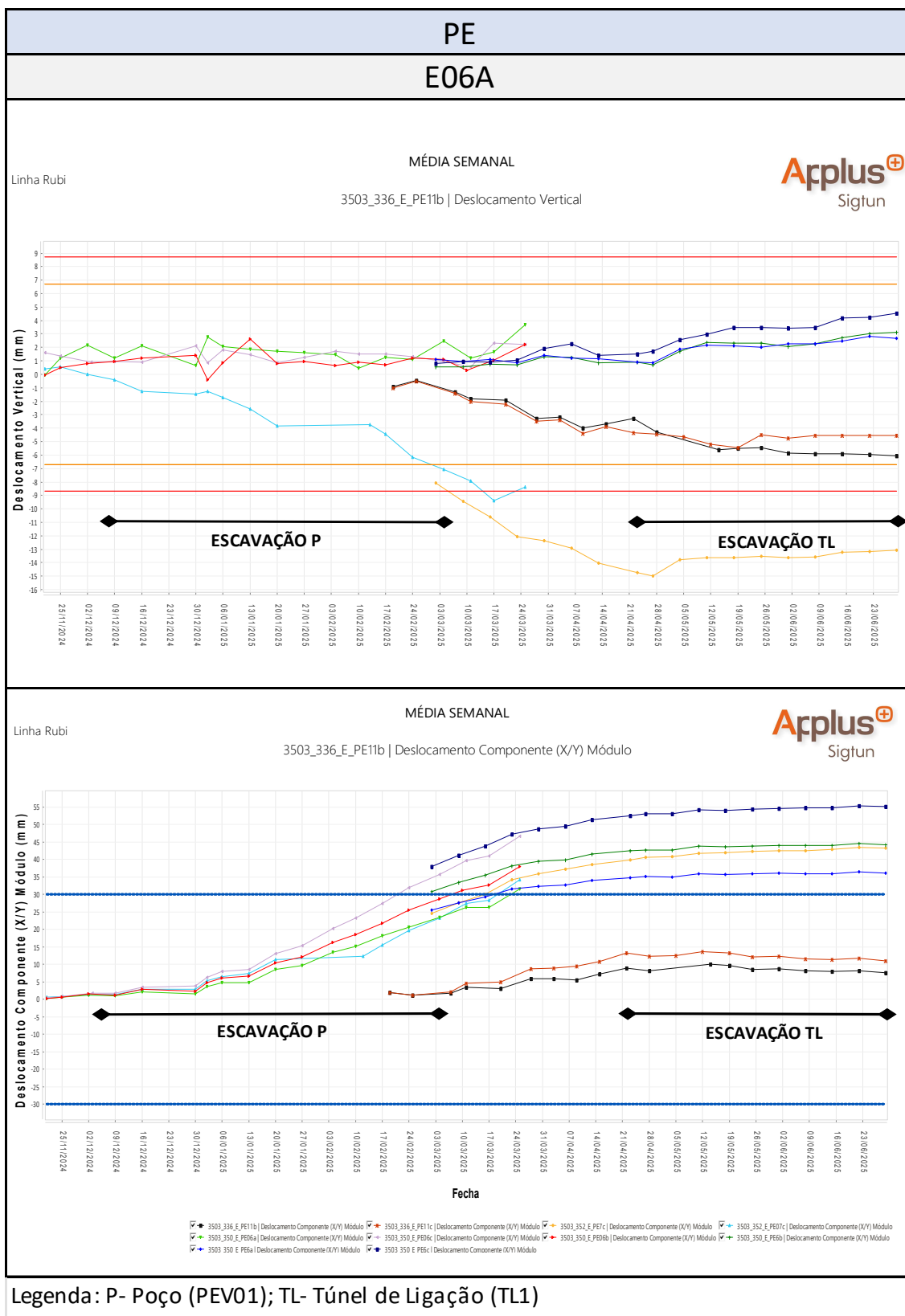


Figura 49 - Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifícios do E06A.

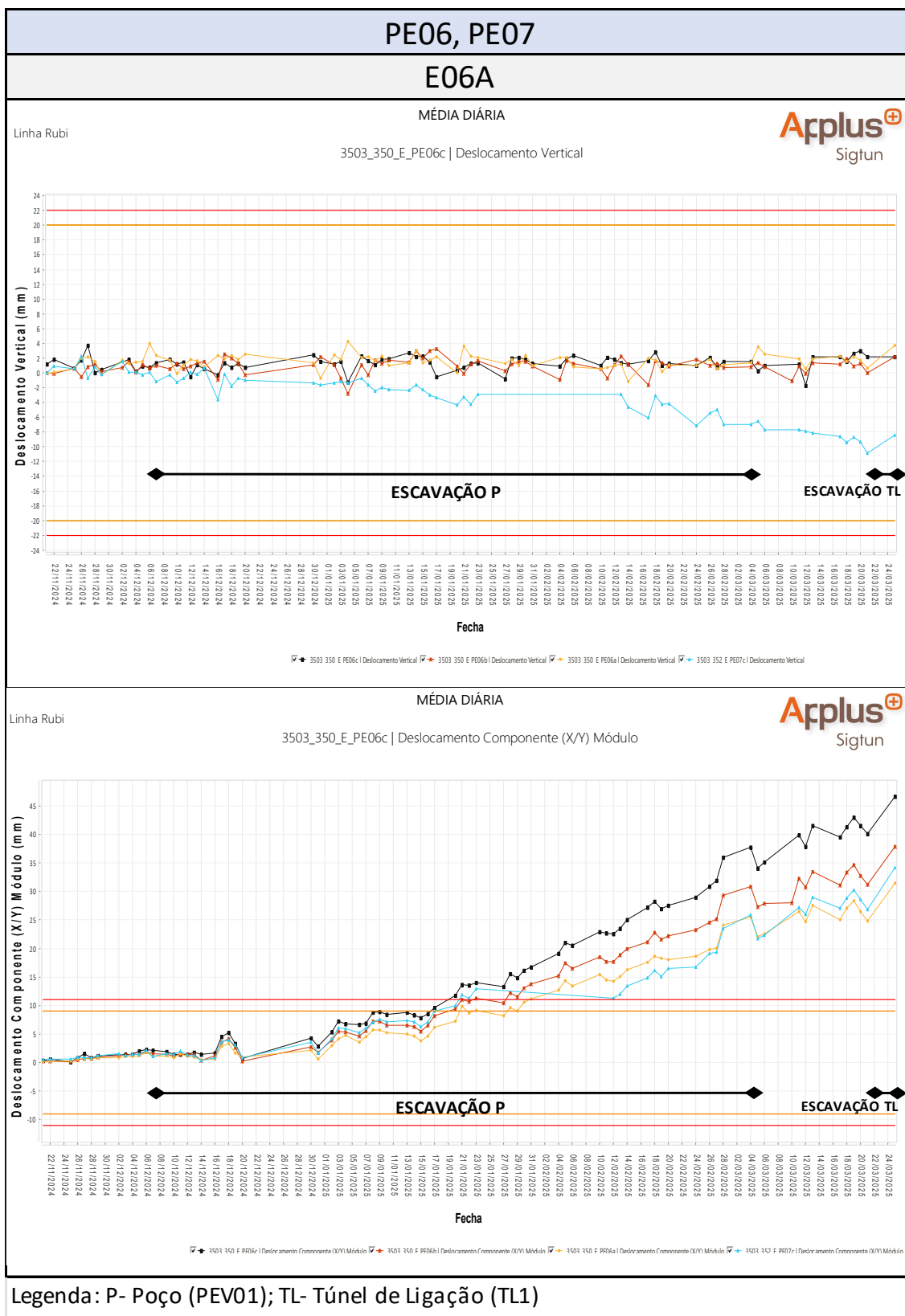


Figura 50- Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifícios PE05 e PE06, do edifício E06A.

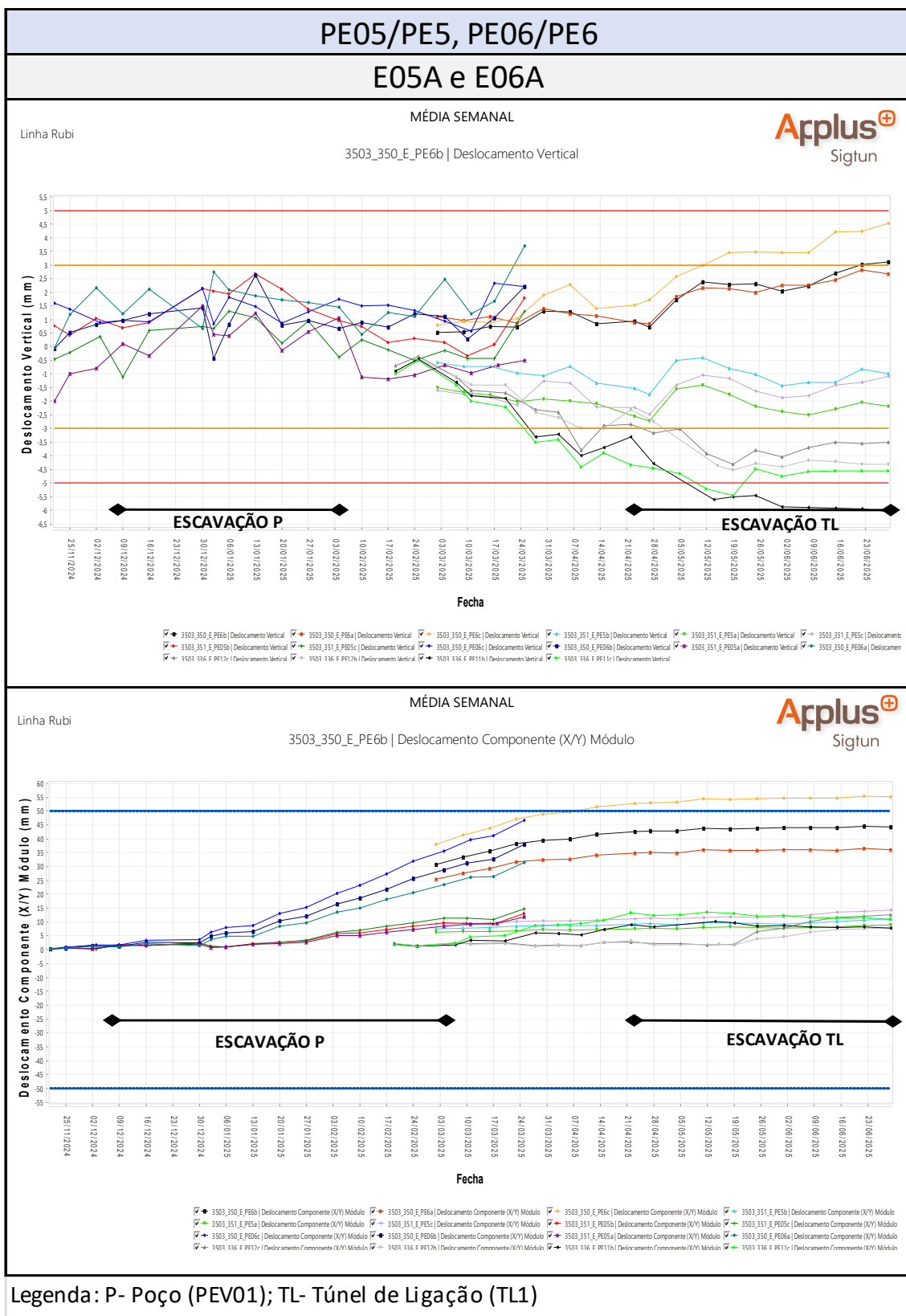


Figura 51- Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifício PE05/PE5 e PE06/PE6, dos edifícios E05A e E06A, respetivamente.

- **Fissurómetros Automáticos**

Relativamente à Figura 52, os fissurómetros (sendo que foram instalados dois fissurómetros, em diferentes cotas, da junta de dilatação do edifício) registam o movimento da abertura da junta de dilatação e o gráfico indica uma tendência de abertura contínua.

A junta de dilatação atinge aproximadamente os 20mm, não havendo limites definidos.

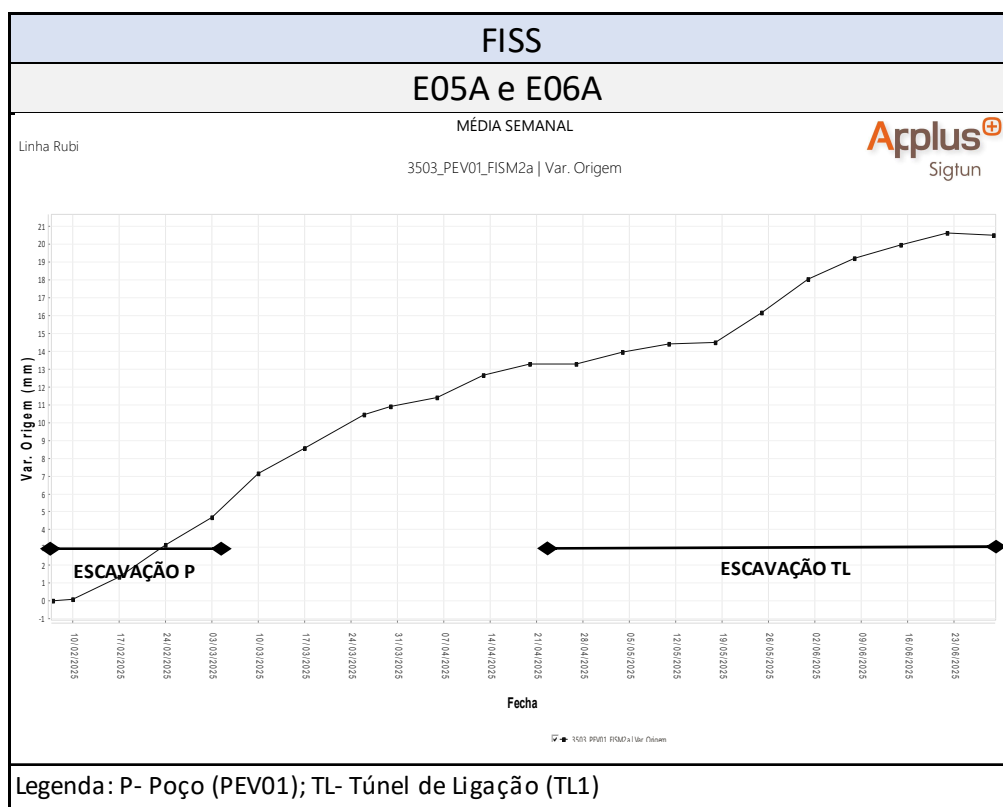


Figura 52- Média semanal da variação de origem do Fissurómetro automático na junta de dilatação dos E05A e E06A.

6.2.3. E07A e E08A

Os prismas de edifícios e os dois clinómetros instalados dos edifícios E07A e E08A encontram-se localizados segundo a Figura 53.

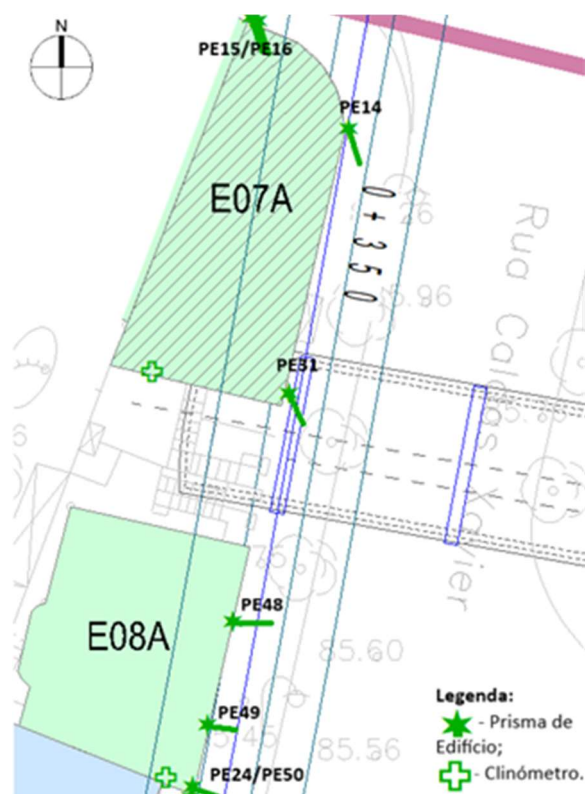


Figura 53- Edifícios E07A e E08A, respectivos Prismas de Edifícios e Clinômetros.

Os prismas de edifícios do E07A foram instalados em meados de fevereiro de 2025 e o PE31 no final de março, antes da escavação do túnel de ligação. Segundo os gráficos da Figura 54, os prismas não registam movimentos de deslocamentos verticais até meados de final de maio, registrando um máximo de assentamentos até 9mm, no prisma de edifício PE31. Relativamente aos deslocamentos de rotações do edifício, o gráfico apresenta movimentos horizontais de 3mm, em meados de maio em todos os prismas, ou seja, antes e durante da escavação do túnel de ligação. Como o limite de referência é de 30mm, estes valores não são significativos.

Os prismas de edifícios do edifício E08A segundo os gráficos da Figura 55, apresentam deslocamentos de alívios de carga até 3mm e assentamentos a aproximadamente 2mm, que se iniciam no final de abril, o que corresponde aos inícios da escavação do túnel de ligação.

O prisma de edifício PE24 registou movimentos ascendentes de aproximadamente 1mm para assentamentos de 2mm, correspondendo a movimentos insignificantes.

Nenhum dos prismas ultrapassa os limites de alerta e alarme, correspondentes a 4 e 6mm, respetivamente.

Os prismas de edifício registam quase 4mm de deslocamento do plano X/Y, não sendo valores significativos, tendo em conta que o limite de referência é também de 30mm.

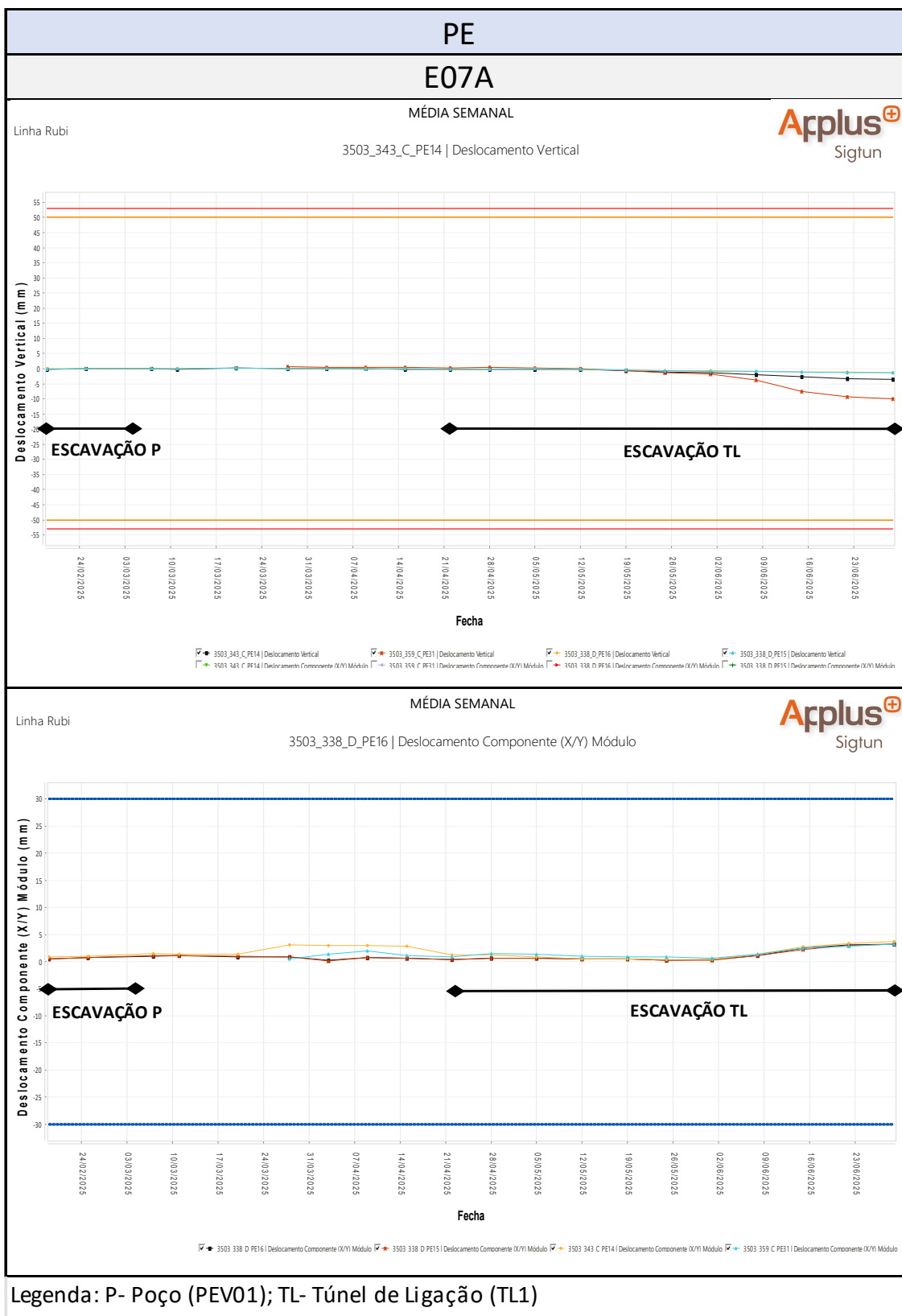


Figura 54- Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifícios do E07A.

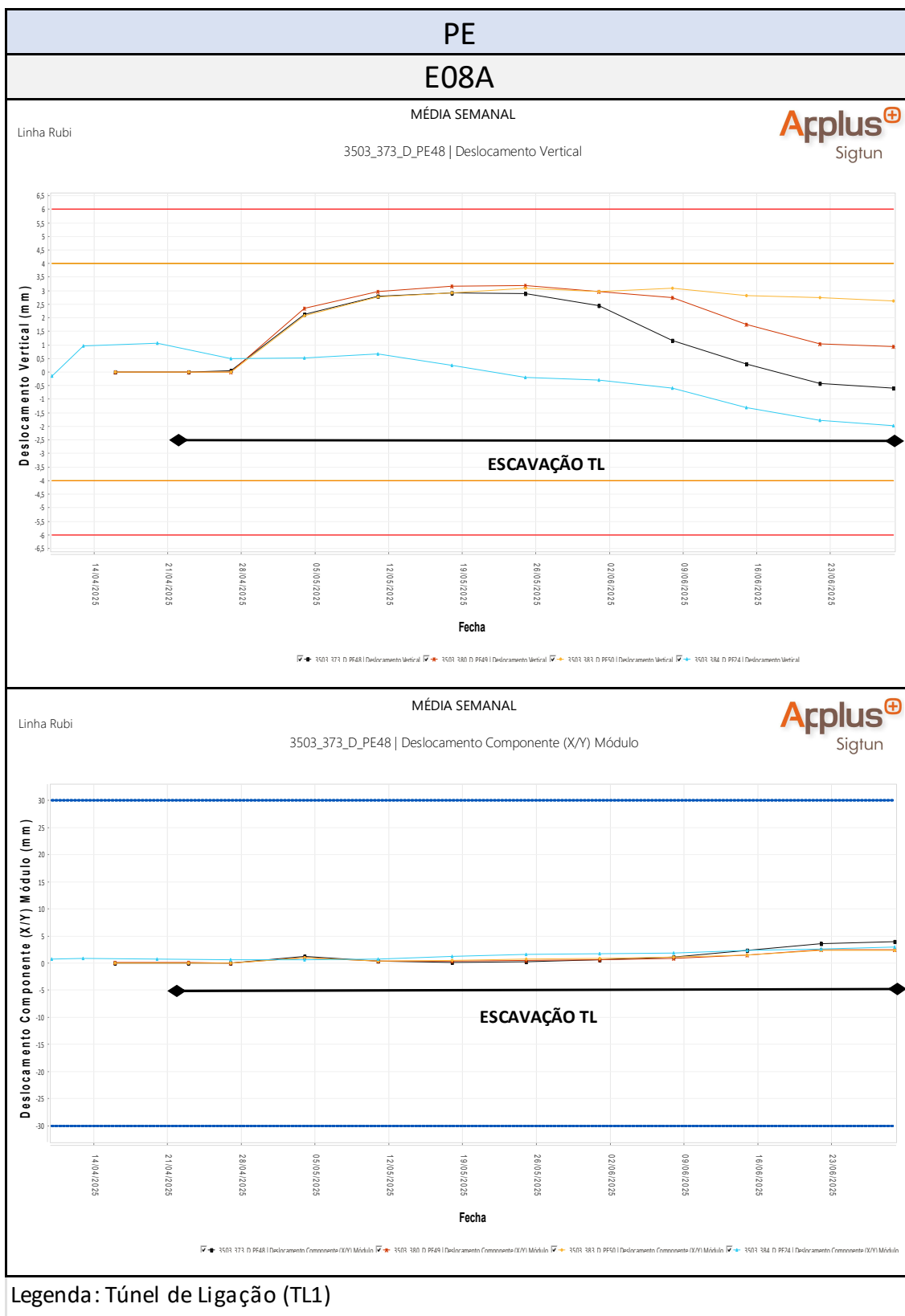


Figura 55- Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifícios do E08A.

- **Clinómetros**

No edifício E07A, um clinómetro foi instalado em meados de maio, após o início das escavações do túnel de ligação, e no edifício E08A, um clinómetro foi instalado no final de março, antes de iniciarem as escavações do túnel de ligação.

Para a análise do dispositivo clinómetro, optou-se pela medição de variações de inclinação do elemento estrutural, no caso, o edifício, expresso em unidades angulares graus. O seu funcionamento baseia-se num ou mais sensores de inclinação biaxiais, capazes de registar a variação angular em planos ortogonais.

O dispositivo encontra-se instalado de forma a monitorizar as inclinações em três componentes, tendo em conta a localização do mesmo:

- O eixo X, no edifício E07A, corresponde à rotação no sentido da frente de escavação, enquanto que no edifício E08A corresponde à rotação do plano perpendicular à escavação;
- No eixo Y, a rotação é no plano perpendicular à escavação, para o edifício E07A, e para o edifício E08A, a rotação é no plano paralelo à escavação;
- Para o eixo Z, no edifício E07A a rotação é no plano paralelo à escavação, e no edifício E08A a rotação é no sentido da escavação.

A variação angular registada ao longo de tempo permite detetar movimentos diferenciais, deformações ou deslocamentos progressivos dos edifícios. Sendo assim, estes dados permitem compreender a resposta estrutural e identificar tendências de instabilidade.

Na Figura 56, o gráfico apresenta média semanal das variações angulares X, Y e Z do clinómetro do edifício E07A e verifica-se que o edifício se encontra estável, sem movimentos diferenciais significativos.

No gráfico do clinómetro do edifício E08A, apenas o eixo Y se encontra praticamente estável, enquanto o eixo X, regista deslocamentos até 0,063 graus, valor significativamente inferior aos limites de alerta e alarme (0,33 graus e 0,40 graus, respetivamente), o que evidencia um comportamento estrutural estável.

O eixo Z regista deslocamentos máximos de 0,026 graus, igualmente muito abaixo dos limites referidos anteriormente. Este comportamento sugere que embora exista influência da obra no alinhamento do edifício as deformações permanecem reduzidas.

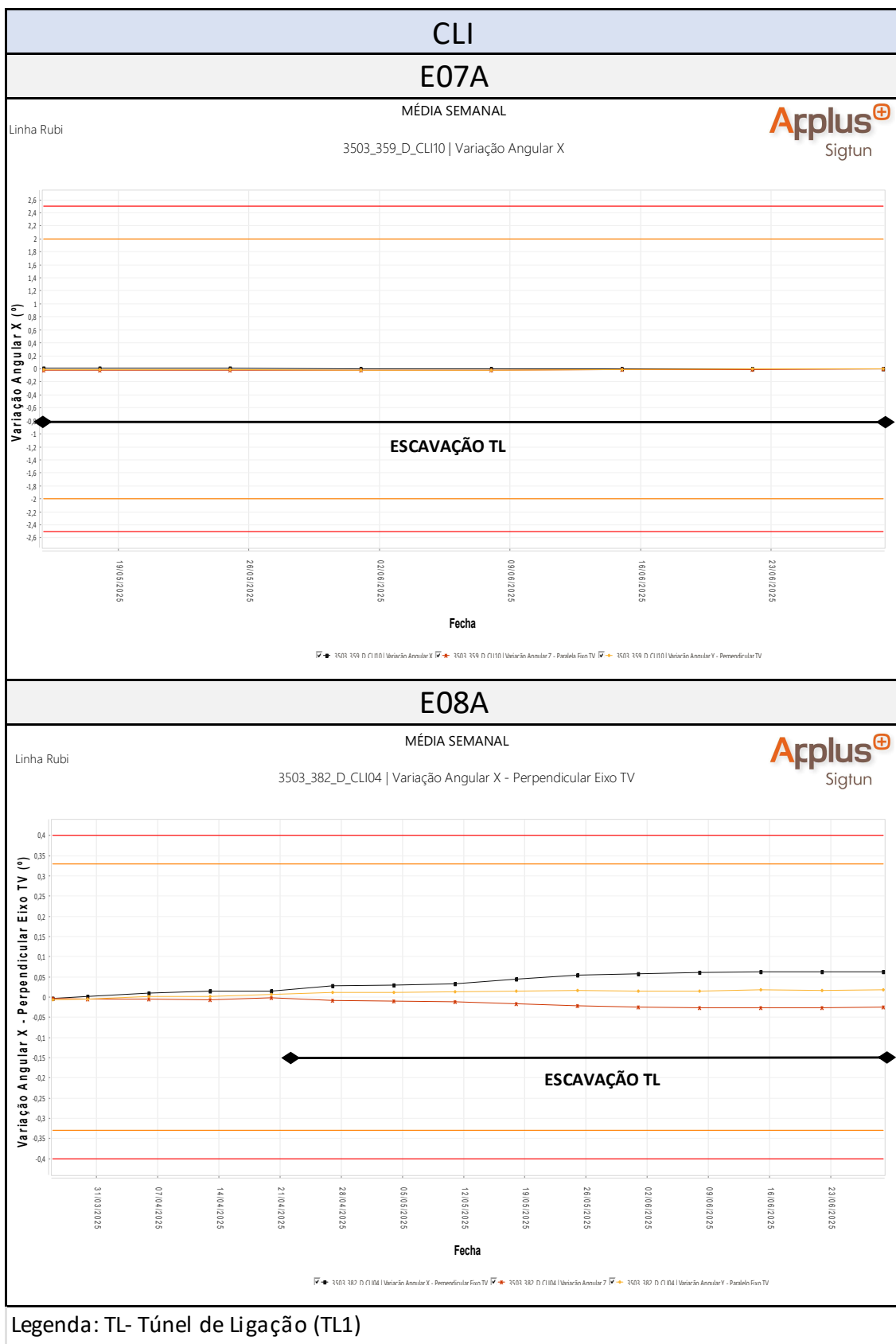


Figura 56- Média semanal da variação angular X, Y e Z do Clinómetro, dos edifícios E07A e E08A.

6.2.4. E10A

No edifício E10A foram instalados prismas de edifícios, clinómetros e sismógrafos, no entanto, para a análise em estudo somente se considera os dispositivos mais próximos da frente de obra em estudo, isto é, os seguintes dispositivos representados na Figura 57.



Figura 57- Edifícios E10A, respectivos Prismas de Edifícios, Clinómetro e Sismógrafo (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

Os prismas de edifícios estão representados nos gráficos da Figura 58, ambos foram instalados no final de novembro. Os prismas registam um máximo de assentamentos até 3,7mm, no prisma de edifício PE02, após o fim da escavação do poço, sendo valores insignificantes, pois os limites de alerta e alarme são de 11 e 14mm, respetivamente.

O gráfico dos deslocamentos de rotações do edifício regista movimentos horizontais de aproximadamente 4,9 mm, do prisma PE02, a meados de março, após o término das escavações do poço. O limite de alerta corresponde a 5mm e de alarme e 6mm, correspondendo a valores nos quais o PE02 aproxima-se. Embora o valor tenha sido pontual e volta-se a estabilizar para valores de 2,64mm, este corresponde a assentamentos diferenciais.

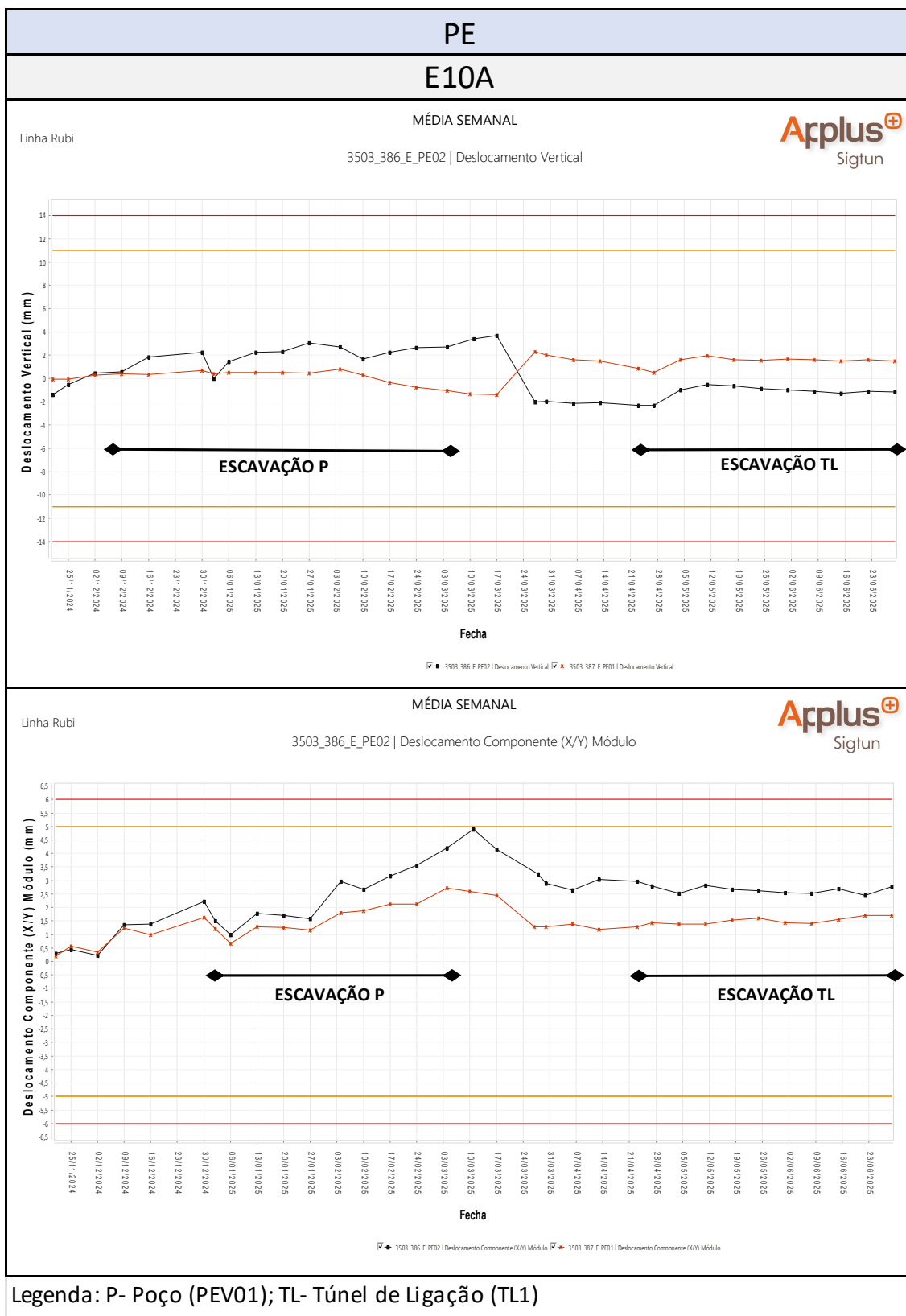


Figura 58- Média semanal do deslocamento vertical e do deslocamento da componente X/Y dos Prismas de Edifícios, do edifício E10A.

- **Clinómetro**

No gráfico do clinómetro do edifício E10A (Figura 59) o eixo X corresponde à variação angular da rotação da frente de escavação, o eixo Y à rotação do plano perpendicular à escavação e o eixo Z à rotação do plano paralelo à escavação.

O eixo X regista deslocamentos até 0,015 graus. O eixo Y regista movimentos até 0,017 graus e por fim, o eixo Z regista até 0,026 graus. Estes valores são muito abaixo dos limites referidos anteriormente, ou seja, valores significativamente inferiores aos limites de alerta e alarme (0,33 graus e 0,40 graus), o que evidencia um comportamento estrutural estável.

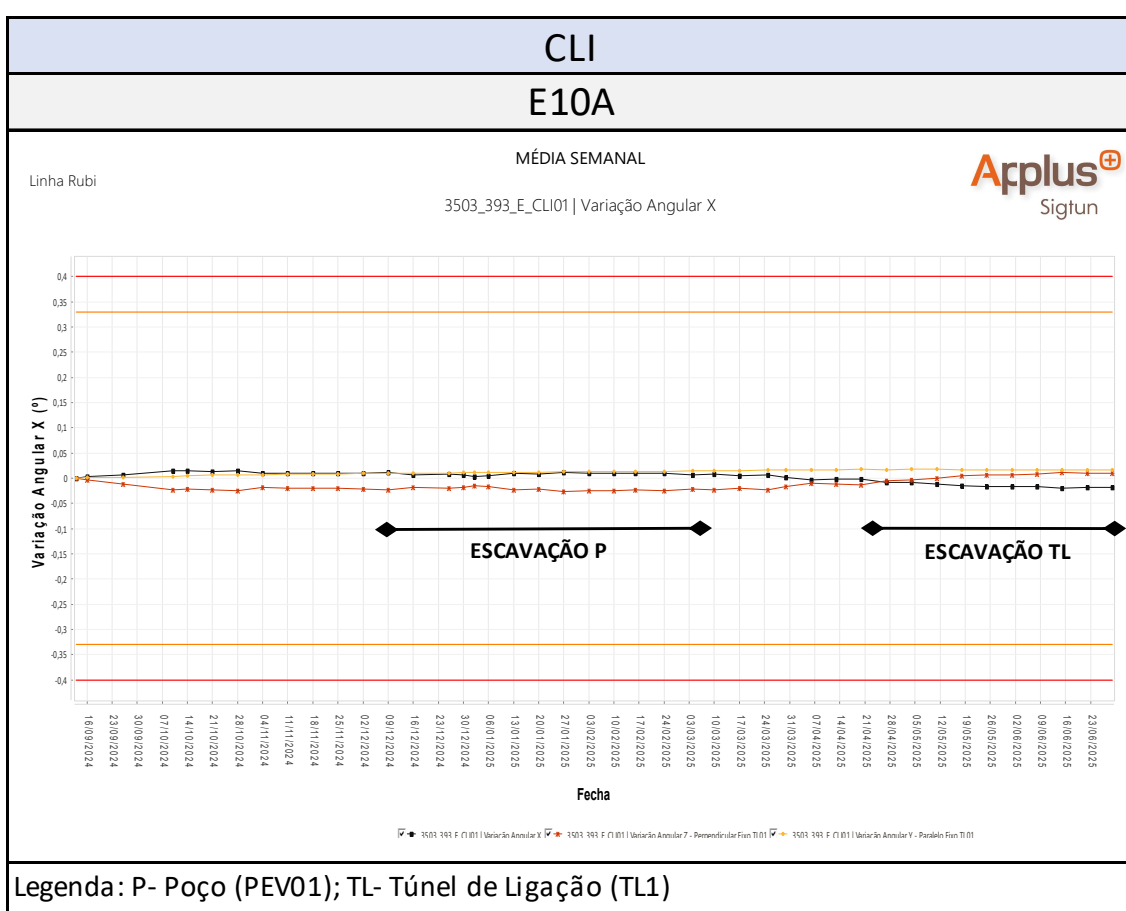


Figura 59- Média semanal da variação angular X, Y e Z do Clinómetro, do edifício E10A.

- **Sismógrafo**

No edifício E10A, o sismógrafo utilizado regista a velocidade de vibração em cada um dos três eixos ortogonais (X, Y e Z), bem como a velocidade resultante combinada (C), que permite avaliar a intensidade global da vibração num único valor.

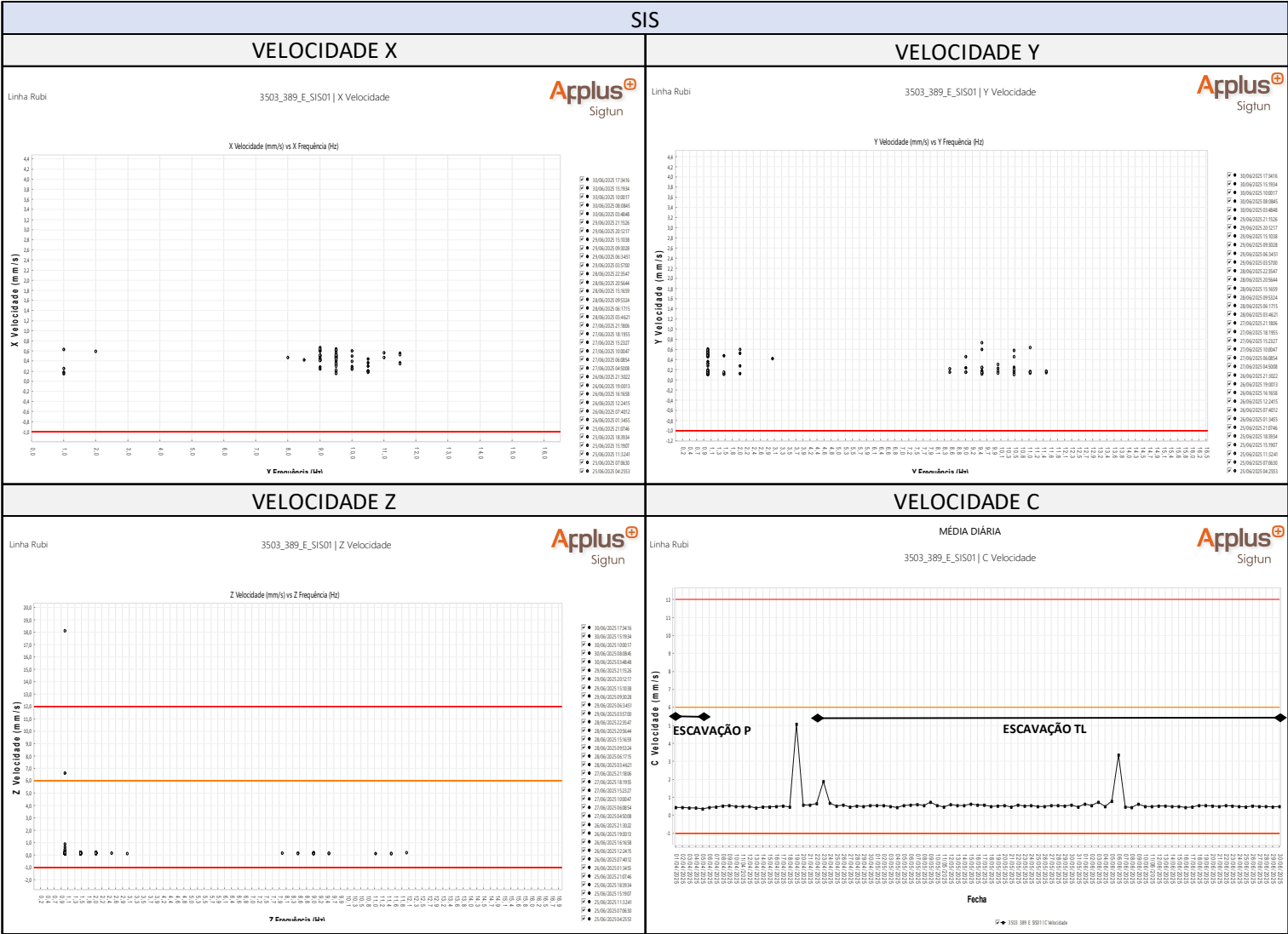
- Eixo X: corresponde à componente da vibração medida do plano horizontal perpendicular à frente obra;
- Eixo Y: corresponde à componente da vibração no plano horizontal paralelo à frente de obra;
- Eixo Z: corresponde à componente vertical da vibração.

A análise individual dos eixos referidos é essencial para identificar a direção predominante da vibração e possíveis efeitos diferenciais no edifício.

Nos gráficos da Figura 60 verificam-se picos pontuais, nos quais nenhum ultrapassa os valores de limite de alerta, 6 mm/s e limite de alarme, 12 mm/s. Um dos picos foi atingido a meados de final de abril, correspondente a 5,066 mm/s.

Sendo assim, podem não ser valores relevantes, pois podem resultar do local de instalação onde se encontra, isto é, um local acessível a fatores externos, como pessoas e objetos que tenham impacto no dispositivo.

Figura 60- Velocidade dos eixos X, Y, Z e a média diária da velocidade C, do Sismógrafo do edifício E10A.



Legenda: P- Poço (PEV01); TL- Túnel de Ligação (TL1)

6.3. Maciço Envolvente

O maciço envolvente da obra em estudo foi instrumentado com Prismas de Pavimento (PP), Extensômetros (EXT), Inclínômetros (INC) e Piezômetros (PZ), permitindo a monitorização integrada de deslocamentos verticais, superficiais e profundos, deslocamentos horizontais e variações do nível de água.

A análise será estruturada por frentes de obra, considerando separadamente o Poço de Ventilação e Emergência (PEV01) e o Túnel de Ligação (TL1), de forma a avaliar o comportamento geotécnico local e específico de cada frente, bem como eventuais interações entre ambas.

6.3.1. Poço de Ventilação e Emergência 1 (PEV01)

Na envolvente do Poço de Ventilação e Emergência (PEV01) (Figura 61) foram instalados dois inclinómetros, um piezômetro manual de tubo aberto e um piezômetro automático de corda vibrante (VW), e por fim, três prismas de pavimento.

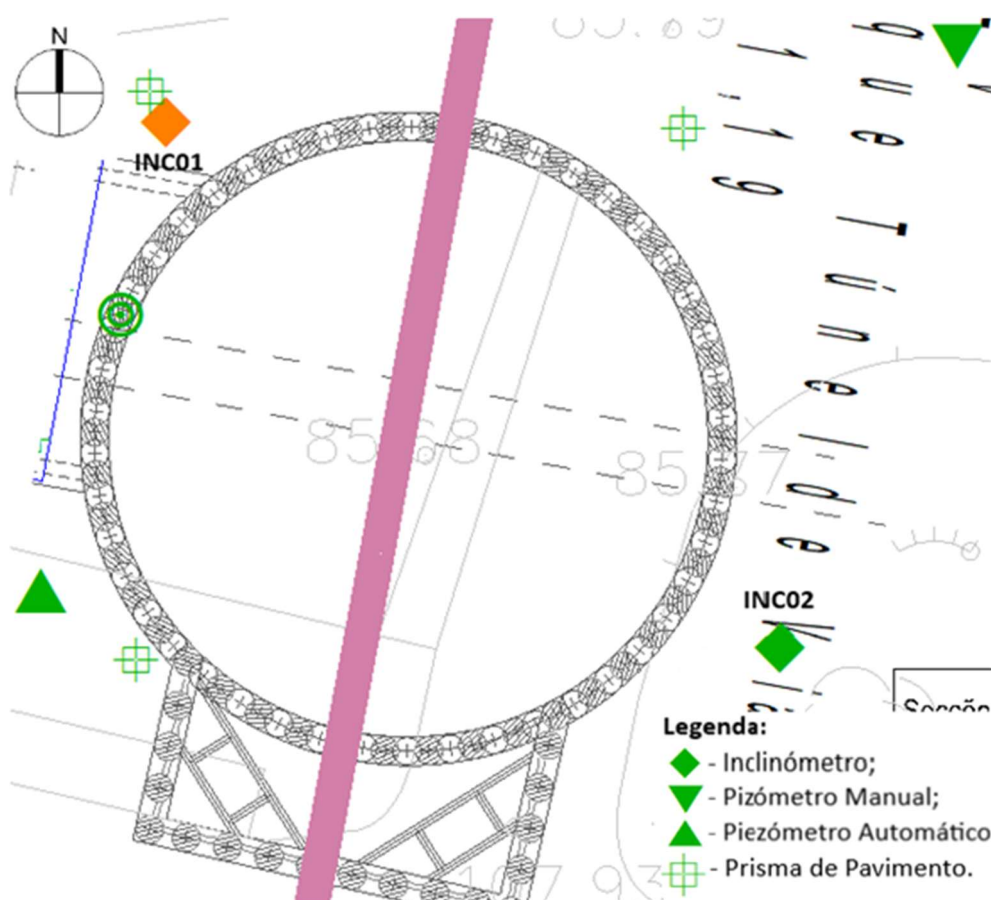


Figura 61- Envolvente do PEV01 e respetivos Piezômetros, Inclínômetros e Prismas de Pavimento (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

- **Piezómetros**

Nos gráficos da Figura 62 verifica-se uma média semanal da profundidade absoluta, em metros, referente a uma cota vertical do ponto em relação a um *datum* fixo, relativamente ao nível médio do mar (MSNM), correspondendo às leituras do piezómetro manual.

No mesmo gráfico verifica-se, igualmente, a média semanal do nível MSNM relativos ao piezómetro automático.

Em ambos os gráficos, no período de início de março observa-se um declive acentuado de uma diminuição de aproximadamente 4 metros, o que poderá corresponder à redução de carga hidráulica, correspondendo a um comportamento decorrente da remoção de material de escavação coincidindo com o final da escavação do poço. Esta tendência pode ser atribuída ao alívio de carga da escavação do poço, ao rebaixamento natural do nível freático ou à atuação de sistemas de drenagem temporária.

Após esse período, verifica-se uma tendência de estabilização que poderá indicar a dissipação parcial das poropressões excessivas e o ajustamento do regime hidráulico do terreno às novas condições geotécnicas impostas pela obra.

Após o início da escavação do túnel de ligação o nível MSNM volta a diminuir.

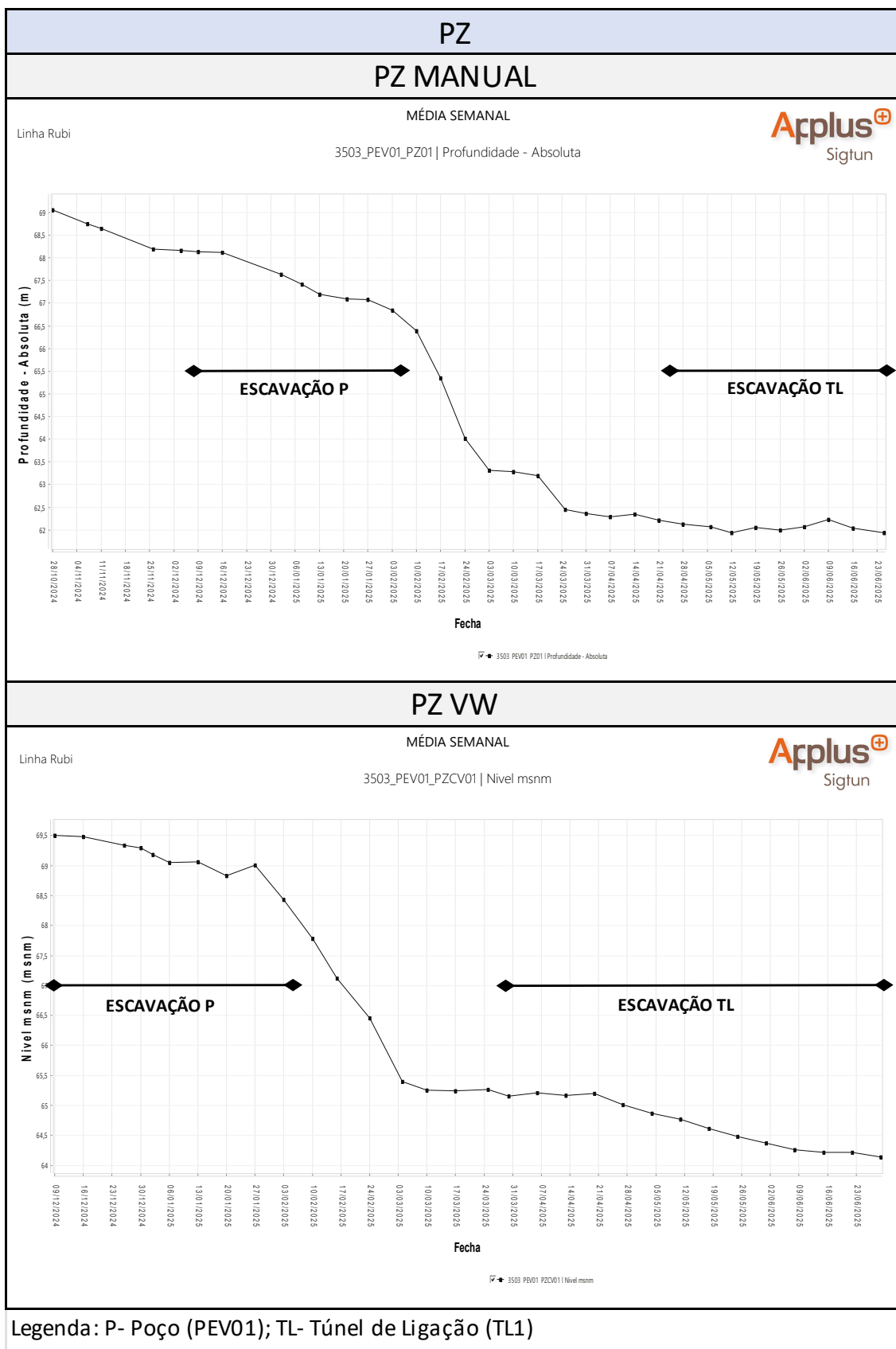


Figura 62- Média semanal do nível MSNM do PZVW e da profundidade absoluta do PZ Manual.

- **Prismas de Pavimento**

Os prismas de pavimento foram instalados na superfície do maciço, a fim de permitir a medição de deslocamentos verticais superficiais ao longo do tempo.

As leituras obtidas são comparadas com a posição inicial, no caso 0mm. Esta análise é relevante para detetar movimentos que possam indicar recalques localizados, levantamento do terreno.

Assim, verifica-se no gráfico da Figura 63 que não se registaram assentamentos significativos no pavimento e a descida observada não representa relevância, pois apresenta-se muito abaixo dos limites de alerta e alarme.

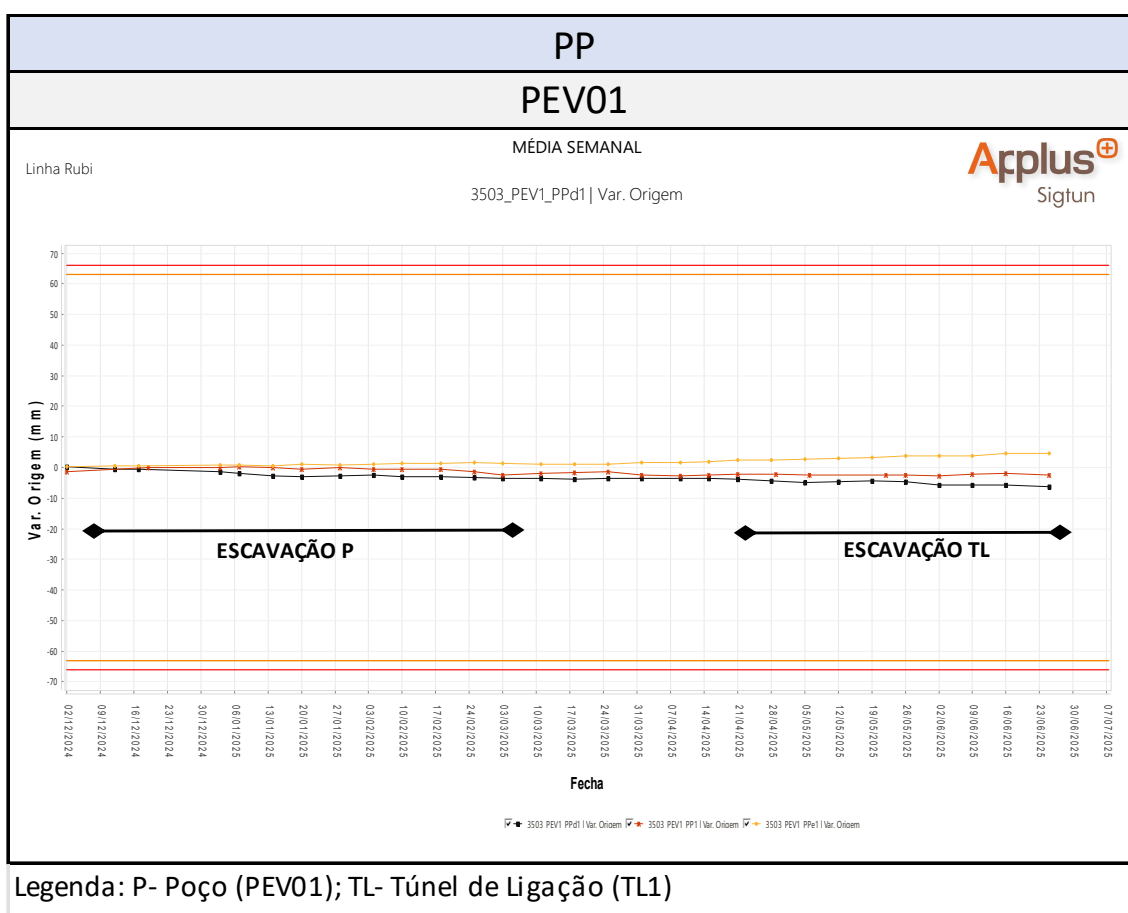


Figura 63- Média semanal da variação à origem dos Prismas de Pavimento, da envolvente do PEV01.

- **Inclinómetro**

Um inclinómetro é um dispositivo utilizado para medir a variação dos deslocamentos horizontais cumulativos em profundidade, ao permitir identificar deformações de maciço provocadas pela escavação.

Na Figura 65, observa-se gráficos de dois inclinómetros, INC01 e INC02, instalados na envolvente do poço, com a localização referente da Figura 61.

O equipamento consiste num tubo inclinométrico instalado verticalmente no solo, no qual uma sonda, com o alcance de 40 metros, percorre diferentes profundidades e regista as variações de inclinação em dois eixos ortogonais, isto é, nas direções A (perpendicular à escavação) e B (paralela à escavação), esquematizados na seguinte Figura 64.

Com isso é possível detetar se o maciço se está a deslocar para o lado da escavação ou no sentido oposto, ao analisar a direção e o sentido da deformação. E permite analisar a magnitude do deslocamento em cada profundidade ao identificar zonas de maior mobilidade e zonas estáveis.

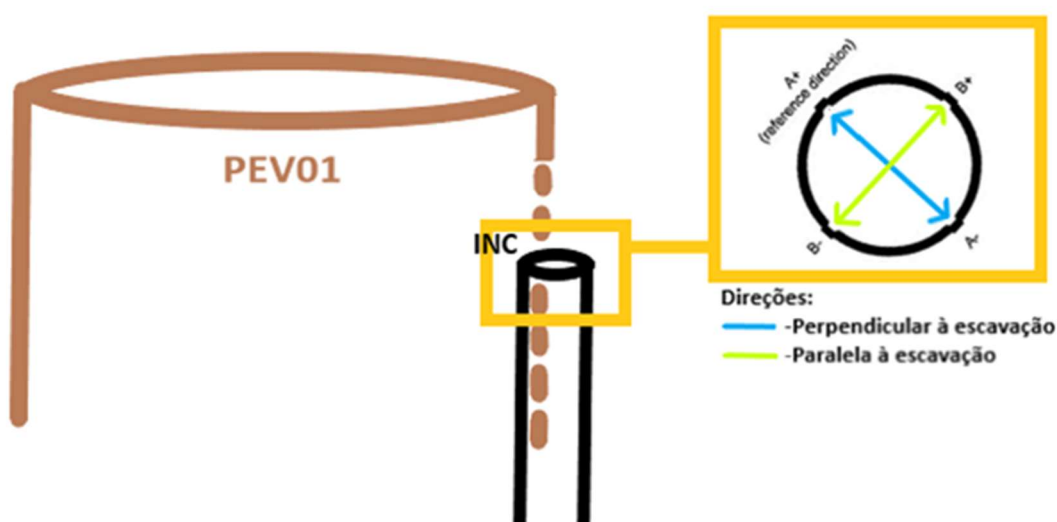


Figura 64- Esquema representativo do processo de leitura de um inclinómetro.

Nos gráficos da Figura 65 observam-se os seguintes registos de deslocamentos, até dia 30 de junho:

- INC01: Na direção A (perpendicular)- concentrações mais significativas nos primeiros metros abaixo da superfície, com deslocamentos que atenuam com a profundidade; entre 60 a 200dm (6 a 20m) de profundidade, nota-se uma maior dispersão das curvas, até um máximo de 12mm no sentido da escavação, sugerindo variações progressivas consequentes da evolução da escavação.

Na direção B (paralela)- o comportamento é semelhante e há uma deformação mais à superfície.

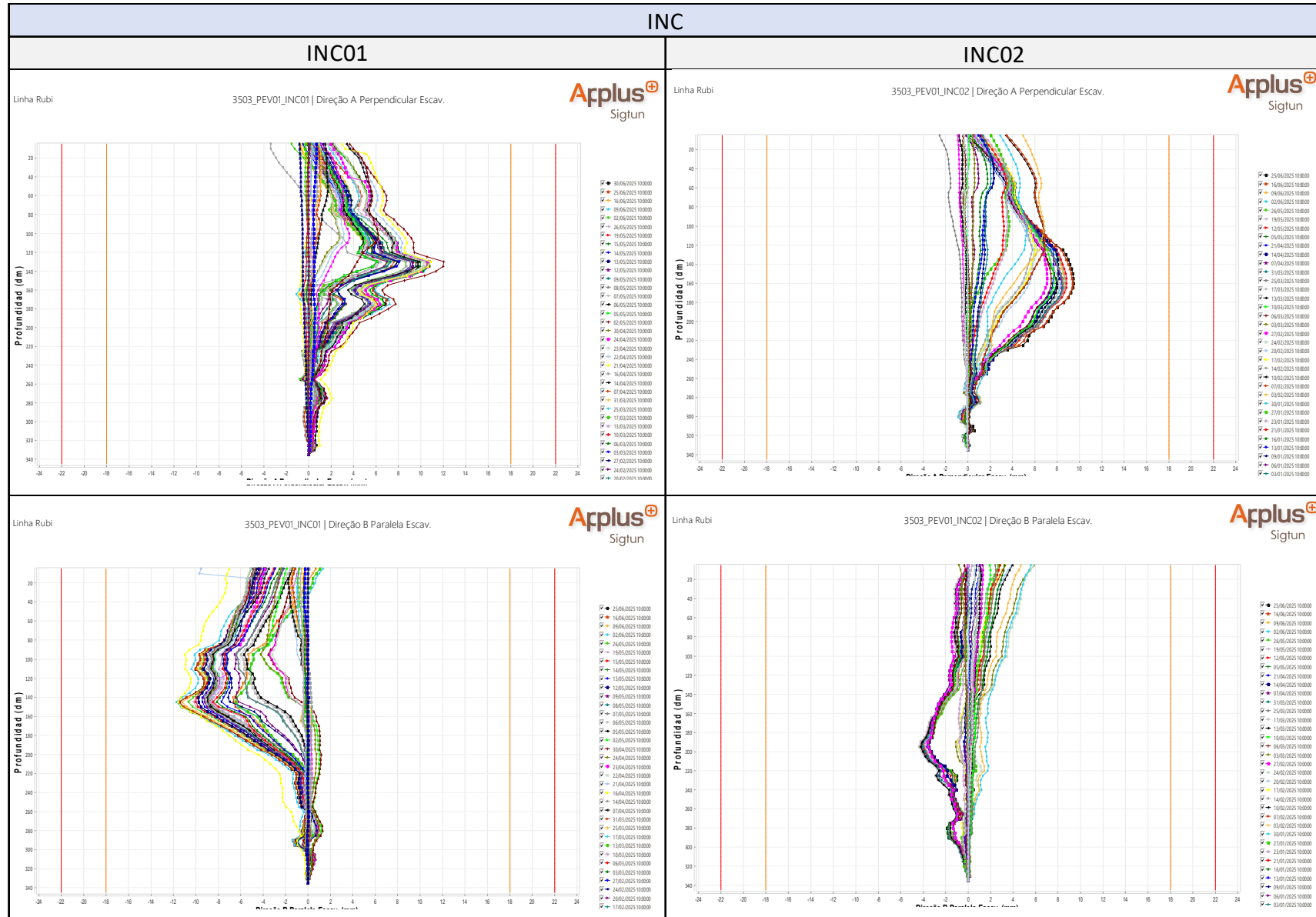
- INC02: Na direção A (perpendicular)- é semelhante ao INC01, mas com deslocamentos até um máximo de 10,8 mm, na profundidade de 60 a 220dm (6 a 22m).

Na direção B (paralela)- gráfico com deslocamentos mínimos e próximos da linha inicial, os quais em comparação com os restantes gráficos, permitem sugerir que os efeitos da escavação foram menos significantes na direção paralela deste inclinómetro.

Conclui-se que as direções perpendiculares à escavação (A) registam deformações ligeiramente superiores às direções paralelas (B), o que indica que o movimento dominante é de natureza transversal em relação ao avanço da frente de obra.

As diferenças entre os inclinómetros analisados indicam que o INC01 parece estar mais exposto à zona de maior impacto da escavação.

Figura 65-Deslocamentos em profundidade da direção A e B, do INC01 e INC02.



6.3.2. Túnel de Ligação (TL1)

Na frente de obra do túnel de ligação, os dispositivos mais relevantes estão localizados segundo a Figura 66. Sendo assim, os dispositivos a analisar são seis extensômetros, quatorze prismas de pavimento e um inclinômetro.

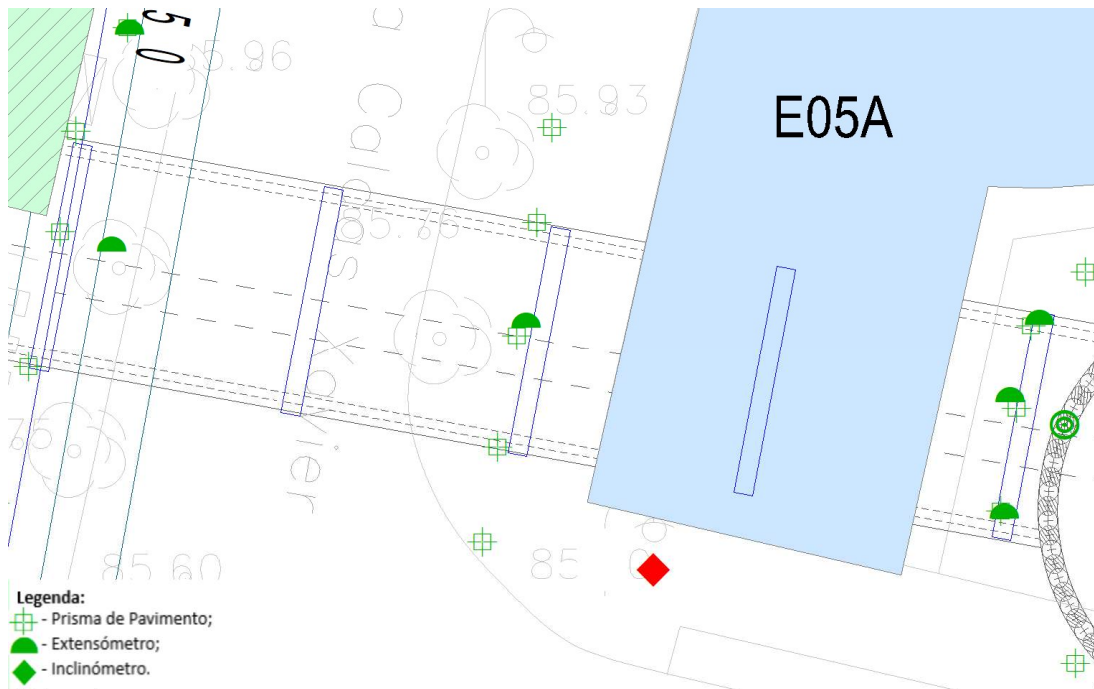


Figura 66- Envolvente do túnel de ligação e respectivos Prismas de Pavimento, Extensômetros e um Inclinômetro (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

- **Prismas de Pavimento e Extensômetros**

Os dados registados pelos prismas de pavimento, quando interpretados em conjunto com medições provenientes de extensômetros, permitem estabelecer uma correlação mais robusta entre movimentos verticais superficiais e internos do maciço, isto é, a análise conjunta destes dispositivos na monitorização de túneis subterrâneos permitem avaliar assentamentos a diferentes profundidades.

A Figura 67 apresenta de forma esquemática a diferença funcional e espacial entre os dois dispositivos, em que ambos são instalados à superfície, mas têm alcances e objetivos distintos, sendo, muitas vezes, complementares na leitura de deslocamentos provocados por escavações profundas ou deformações do maciço.

A zona de influência do prisma de pavimento é muito limitada e superficial, enquanto o extensômetro se estende verticalmente até, por vezes, ao nível de ancoragem para avaliar deformações internas ou transferências de carga verticais no maciço envolvente. Sendo assim, a combinação destes dois instrumentos permite uma interpretação mais completa do terreno ao articular medições superficiais com deformações em profundidade.

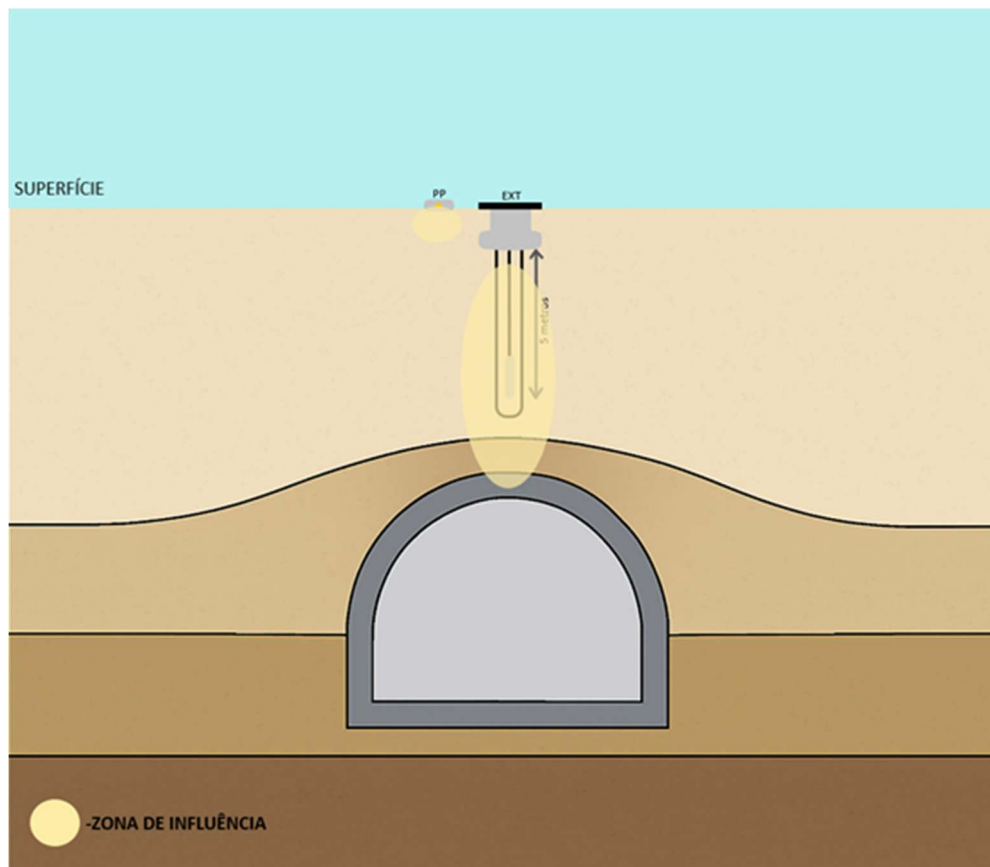


Figura 67- Esquema representativo da zona de influência de um extensômetro e um prisma de pavimento.

OS gráficos da Figura 68 registam uma média semanal de registos de deslocamentos relativamente à origem, em que no gráfico dos prismas de pavimento observa-se que os prismas previamente instalados à instalação do túnel de ligação, durante a escavação do poço, houve oscilações significativas de -5mm.

Durante a escavação do túnel de ligação observa-se uma tendência gradual de deslocamentos negativos, isto é, assentamentos com um máximo de 15,6mm, aproximadamente, sendo assim um valor que ultrapassa os limites de alerta e alarme, que correspondem a 10 e 15mm, respetivamente, indicando que ocorreram movimentos superficiais relevantes.

Relativamente ao gráfico dos extensómetros, constata-se que foram todos instalados na primeira semana de abril e que há ausência de quaisquer movimentos significativos, ou seja, deslocamentos que não ultrapassam os 0,5mm, sendo que os limites de alerta e alarme, correspondem a 73 e 77mm, respetivamente.

Apenas o prisma de pavimento mostrou assentamentos de 15mm, o que sugere que a atividade do túnel de ligação induziu os deslocamentos. No entanto, o extensómetro apresenta ausência de movimentos relevantes em profundidade.

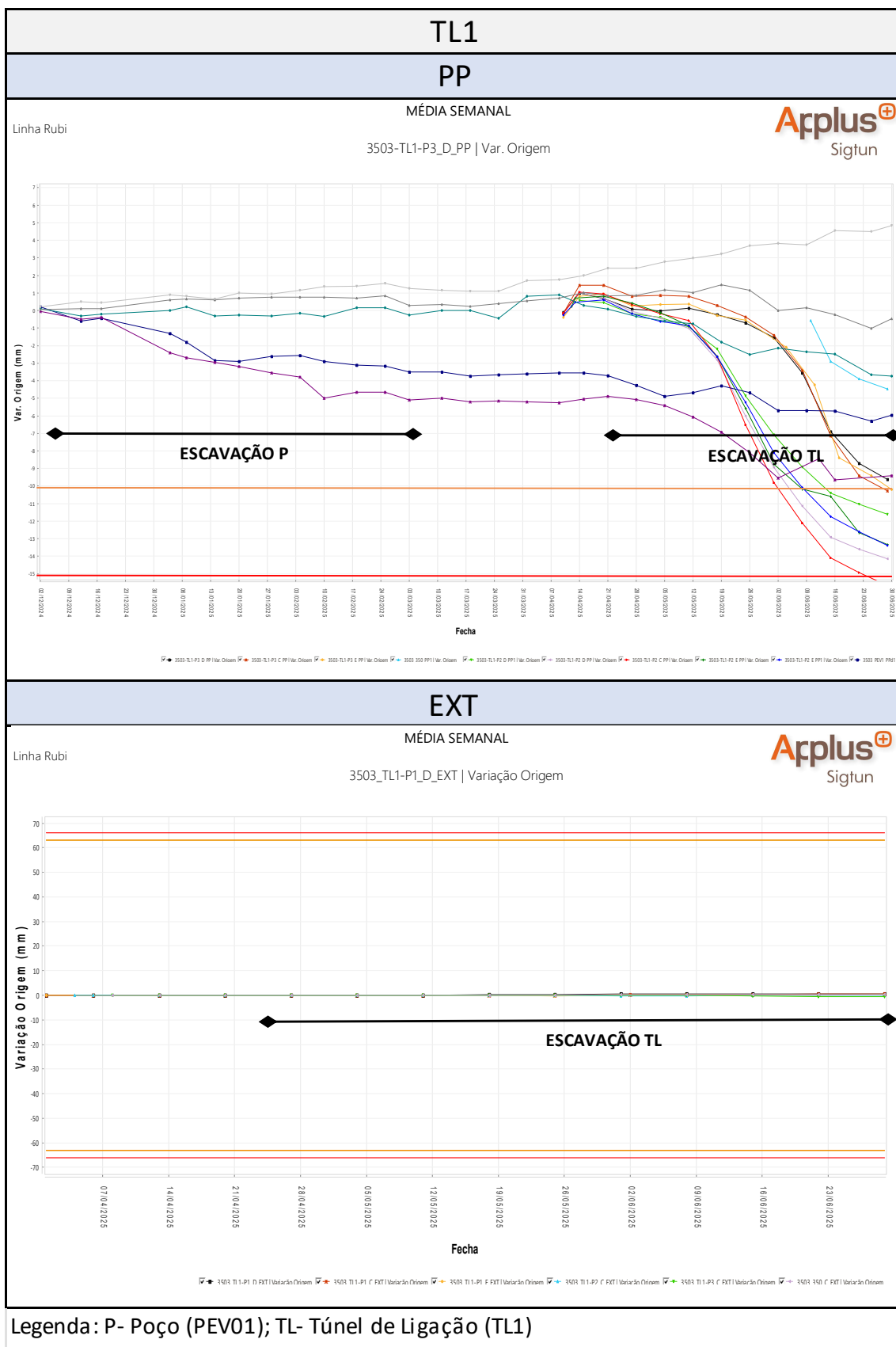


Figura 68- Média semanal da variação à origem, em mm, de Prismas de Pavimentos e Extensômetros, na envolvente do TL1.

- **Inclinómetro**

A seguinte Figura 69 apresenta gráficos de um inclinómetro, INC1, instalado na envolvente do túnel de ligação, a 5 de maio, com a localização referente da Figura 66, no qual estão registados os seguintes deslocamentos:

- Direção A (perpendicular ao poço (túnel principal)): verifica-se deformações até 3,2mm, 70dm (7 metros), que se concentram na zona superficial.
Sendo assim, existem oscilações relativas à fase construtiva da escavação do túnel de ligação e eventuais redistribuições de tensões. No entanto não há registos que ultrapassem os limites de alerta e alarme, que correspondem a 5 e 7mm, respetivamente.
- Direção B (perpendicular ao túnel de ligação): a deformação neste gráfico é mais acentuada e distribuída ao longo da profundidade, que atinge 8,5mm aos 30dm (3 metros) de profundidade, o que ultrapassa os limites de alerta e alarme (5 a 7mm, respetivamente), o que induz a deformações horizontais significativas e persistentes nesta direção, compatíveis a alívio de tensões.

Sendo assim, o efeito da escavação do túnel de ligação é mais expressivo na direção B, perpendicular ao túnel, onde se verificam deslocamentos horizontais significativos e que atingiu os limites de alerta e alarme, compatíveis com a proximidade da frente de escavação e com a mobilização do maciço nessa orientação.

Por outro lado, os deslocamentos são de menor magnitude e permanecem dentro dos limites, ao refletir essencialmente ajustamentos superficiais e localizados nas camadas superiores, sem impactos estruturais relevantes.

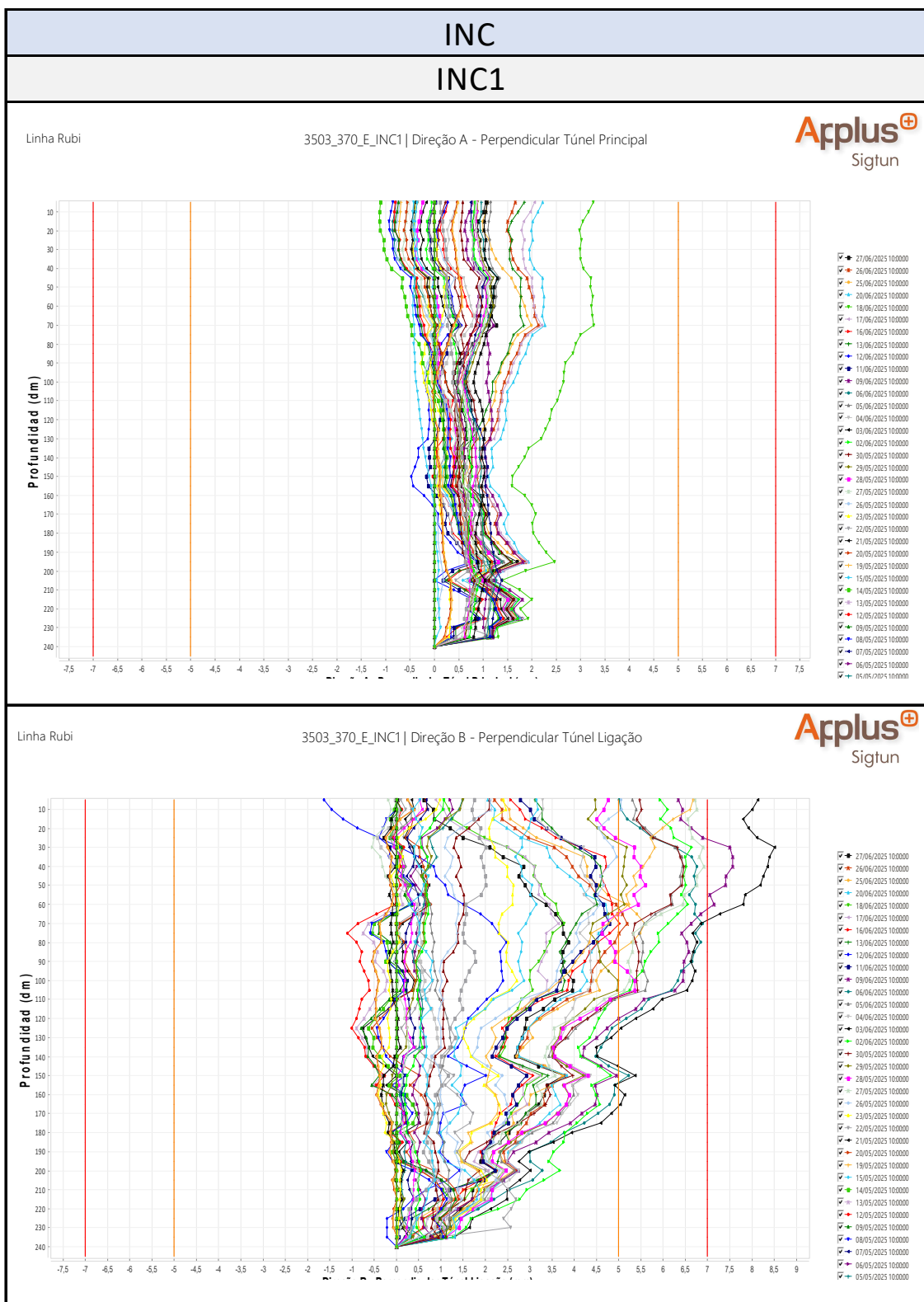


Figura 69- Deslocamentos em profundidade da direção A e B, do INC1.

6.4. Seções de Convergência/Contenção

Os dados de convergência obtidos têm como objetivo avaliar o comportamento deformacional da própria estrutura ao longo do período de escavação.

A análise temporal da convergência permite verificar o comportamento estrutural do revestimento do poço, identificar possíveis zonas críticas de deformação e confirmar a eficácia do sistema de contenção e do suporte aplicado.

6.4.1. Poço de Ventilação e Emergência 1 (PEV01)

A monitorização das seções de convergência para o Poço de Ventilação e Emergência (PEV01) foi realizada através da medição periódica entre pontos de controlo topográfico (prismas topográficos), posicionados em quatro cotas distintas da parede do poço e pelas cordas de distância, entre esses pontos, como verificamos no exemplo da Figura 70.

As cordas são segmentos definidos entre pares de prismas, que constituem a geometria vetorial de controlo, que permite a deteção de movimentos relativos entre zonas adjacentes ou opostas. A variação do comprimento é medida ao longo do tempo, com recurso a leituras topográficas a partir de uma estação total.

As seis cordas resultantes da malha topográfica dos quatro prismas instalados permitem detetar movimentos de aproximação ou afastamento entre segmentos opostos da secção, ao possibilitar a identificação de deformações diferenciais na parede de contenção.

As quatro cotas referidas, da parede do poço correspondem aos seguintes níveis: 82,50 m (Nível 1); 76,00 m (Nível 2); 72,00 m (Nível 3); 65,50 m (Nível 4).

As Figuras 71, 72, 73 e 74 apresentam a evolução dos valores registados ao longo do tempo, para cada uma das cotas do poço, referidas anteriormente, sendo analisada a média semanal do módulo do deslocamento da componente X/Y e do deslocamento vertical, dos prismas de contenção.

O deslocamento da componente X/Y permite analisar eventuais rotações e o deslocamento vertical permite detetar assentamentos.

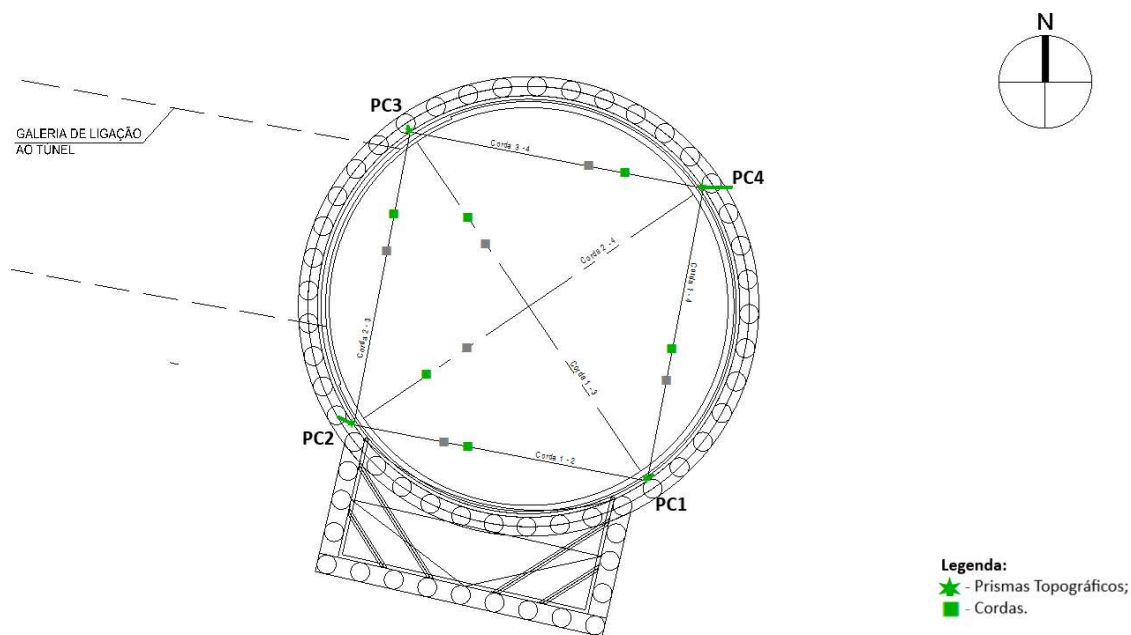


Figura 70- Exemplo da secção de convergência na cota de 82,50 metros, do P1EV (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

Relativamente às cordas das mesmas, na Figura 70, as cordas a cinzento, , são as cordas representadas nos gráficos das Figuras a seguir presentes durante a escavação do poço, e a verde, . As mesmas estão representadas graficamente na Figura 75, com registos de deslocamentos relativos à origem.

Os gráficos das Tabelas dos prismas topográficos demonstram que as maiores variações ocorrem na zona superior da parede, sobretudo no Nível 1, no qual os prismas estão mais expostos às ações indiretas da escavação e de redistribuições de carga.

As cotas intermédias, isto é, o Nível 3 e o Nível 4 mantêm o comportamento quase estático e coerente, com valores residuais, ao evidenciar a eficácia da contenção.

A fase de escavação do túnel de ligação não induziu deformações adicionais significativas, o que sugere que o sistema de suporte está a responder conforme o previsto.

As leituras dos resultados evidenciam, de forma geral, um comportamento estável ao longo das diferentes cotas monitorizadas, com variações mínimas e inferiores aos limites de alerta e alarme estabelecidos, correspondendo assim a deslocamentos não significantes.

- Nível 1 (Cota 82,50m)

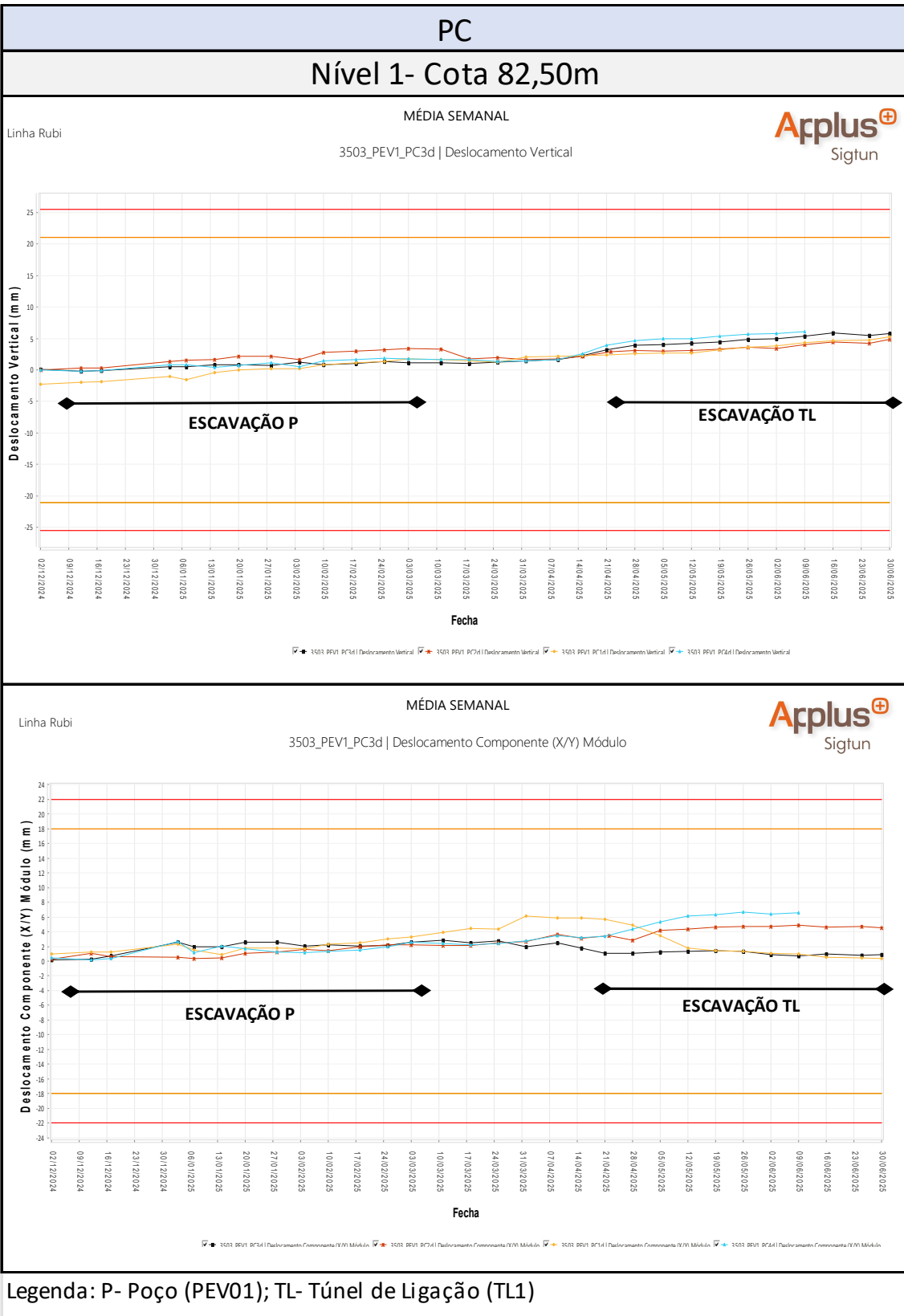


Figura 71- Gráficos da média semanal dos deslocamentos dos Prismas de Contenção do Nível 1- cota 82,50 metros.

- Nível 2 (Cota 76,00m)

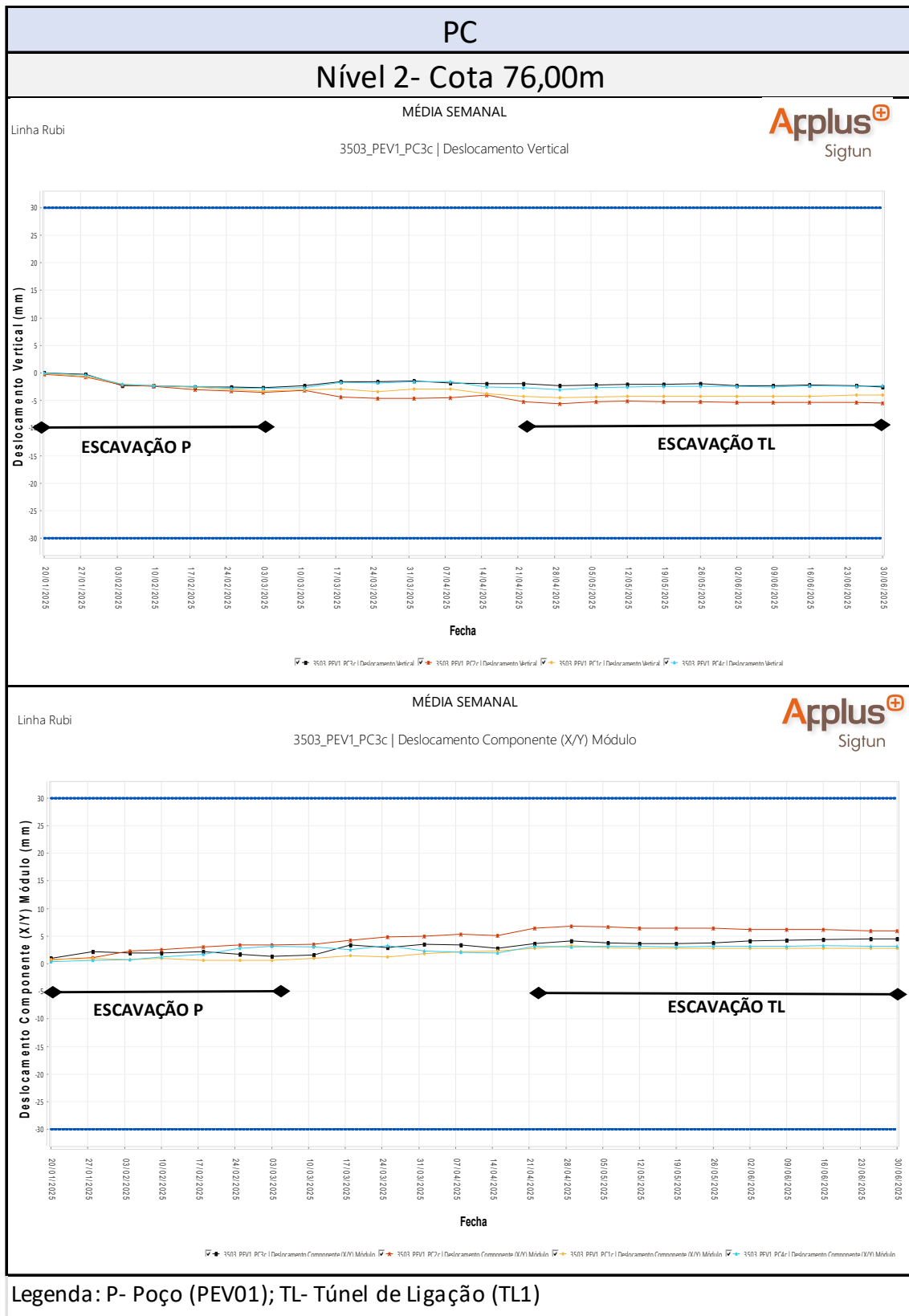


Figura 72- Gráficos da média semanal dos deslocamentos dos Prismas de Contenção do Nível 2- cota 76,00 metros.

- Nível 3 (Cota 72,00m)

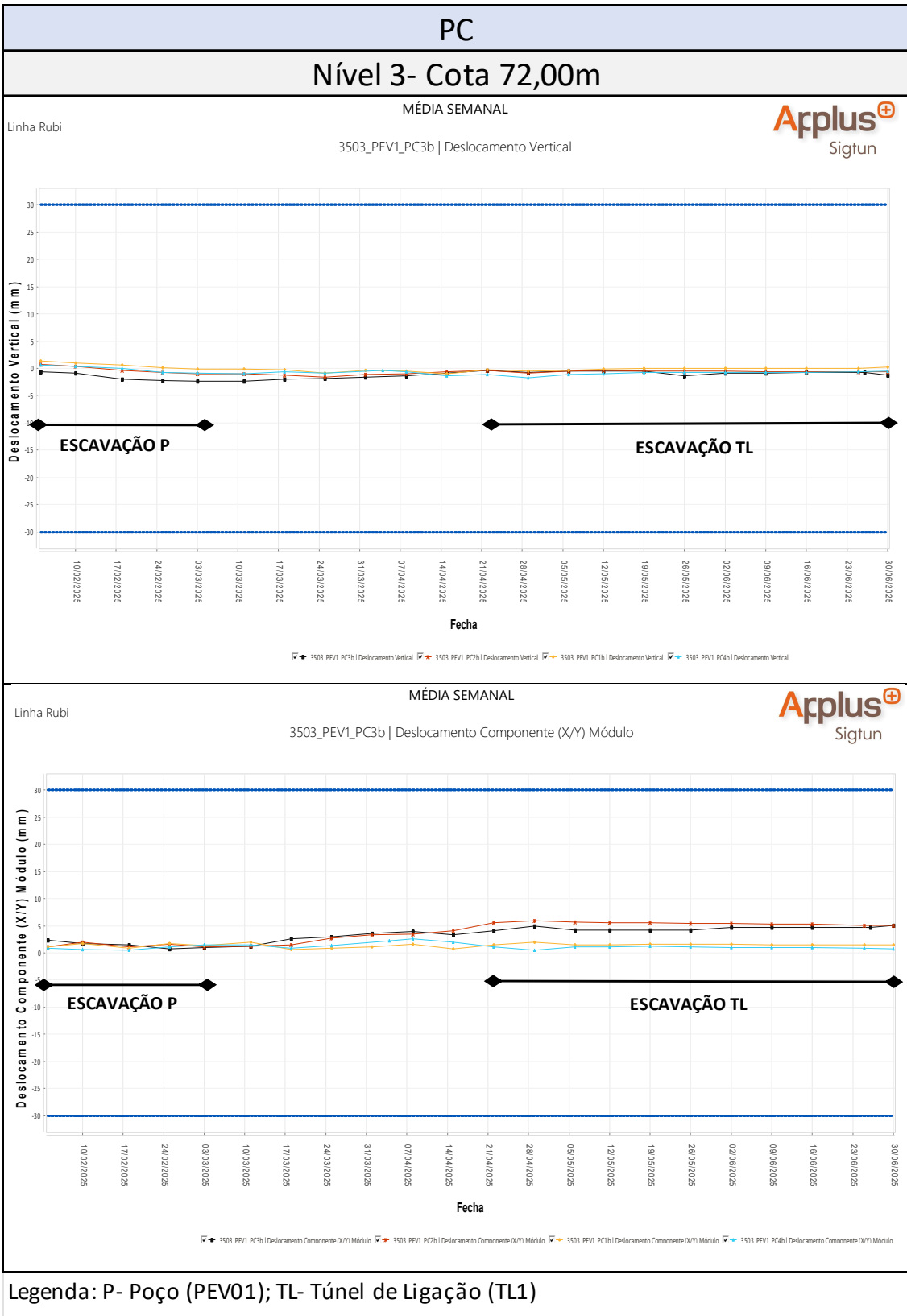


Figura 73- Gráficos da média semanal dos deslocamentos dos Prismas de Contenção do Nível 3- cota 72,00 metros.

- **Nível 4 (Cota 65,50m)**

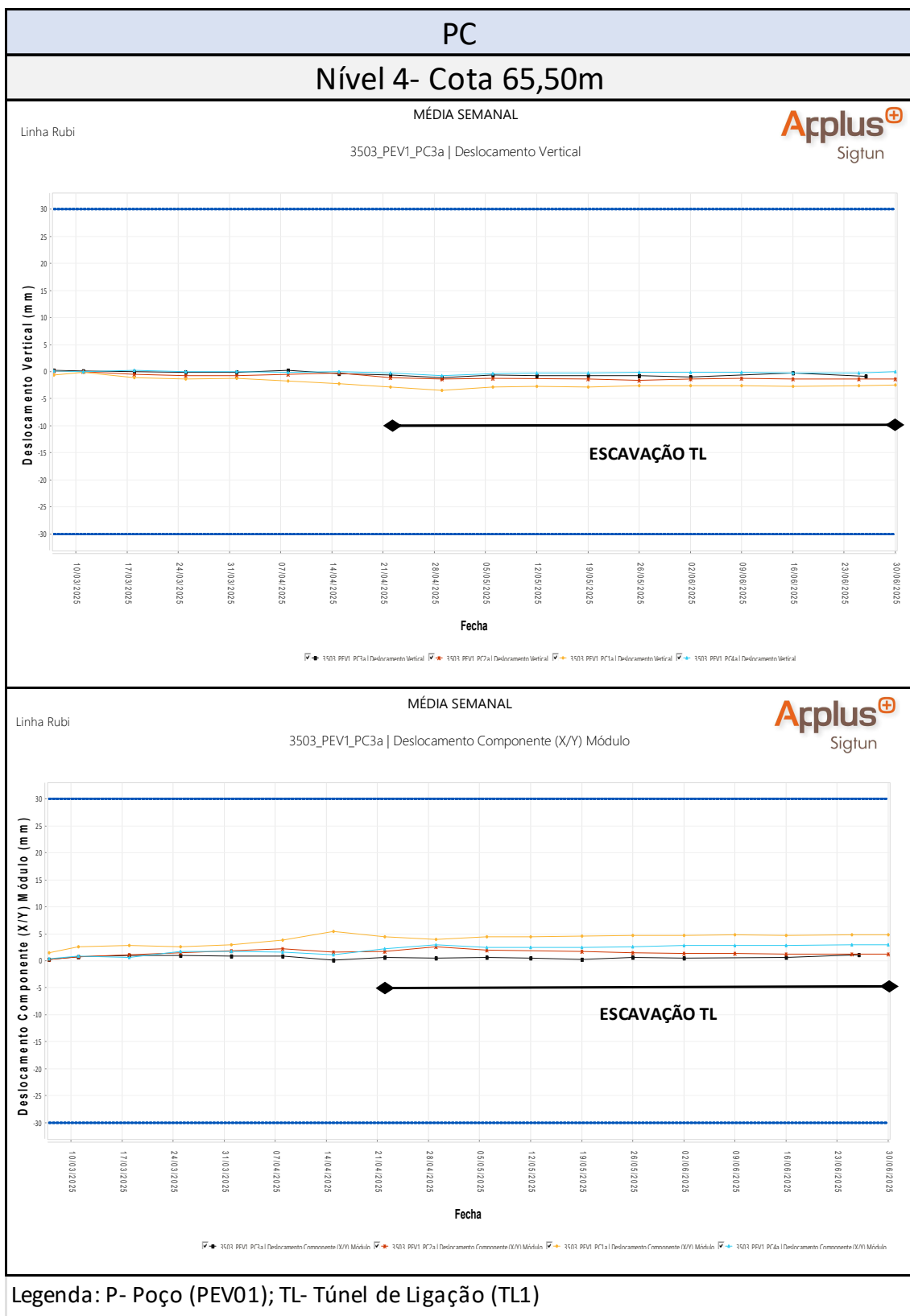
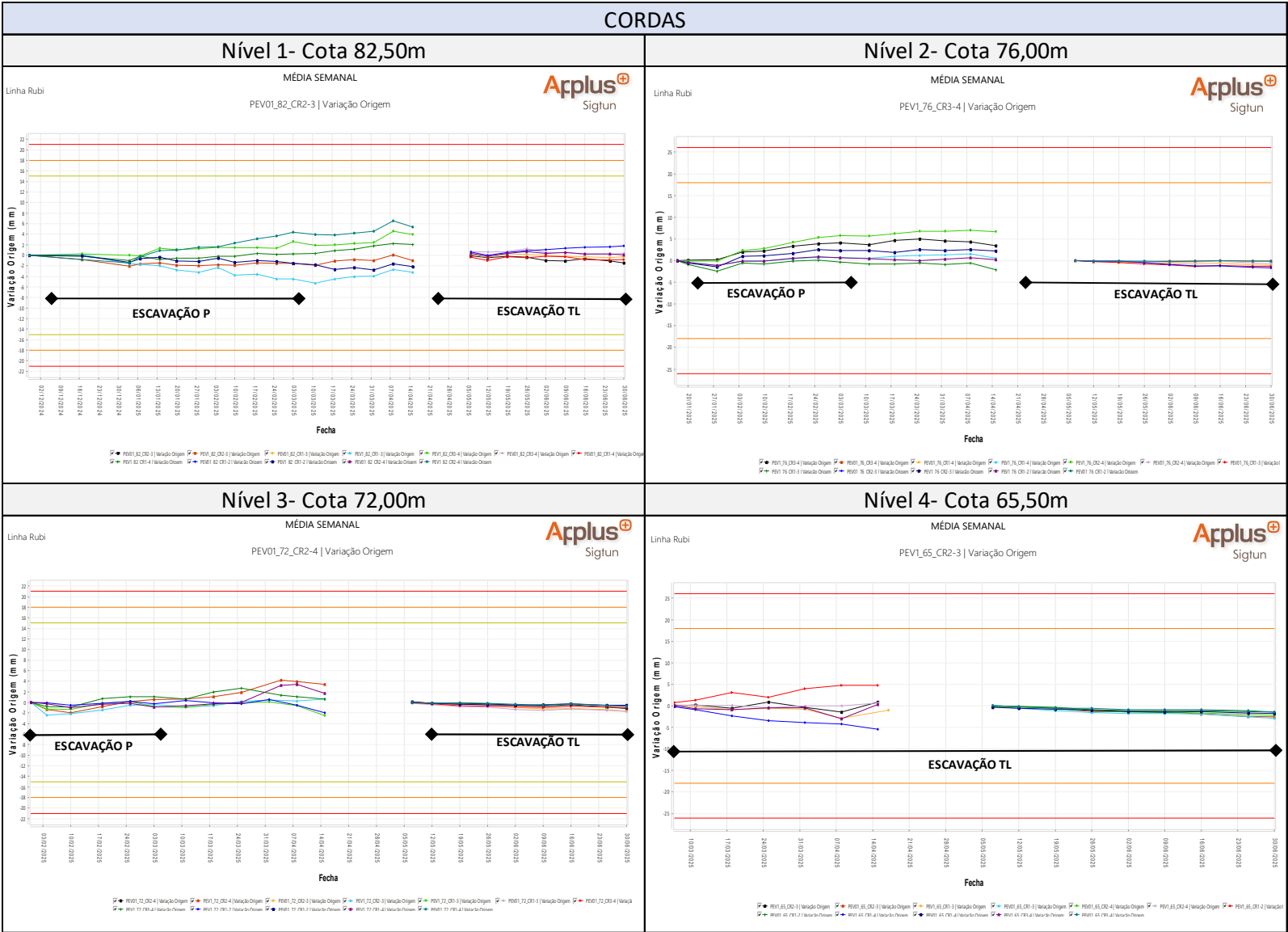


Figura 74- Gráficos da média semanal dos deslocamentos dos Prismas de Contenção do Nível 4- cota 65,50 metros.

Figura 75- Gráficos da média semanal dos deslocamentos das Cordas dos Prismas de Contenção nos quatro níveis



6.4.2. Túnel de Ligação 1 (TL1)

No Túnel de Ligação 1 a monitorização foi, igualmente, realizada através da medição periódica entre pontos de controlo topográfico (prismas topográficos), posicionados em cinco cotas distintas da parede do túnel e pelas respectivas cordas de distância (secções: -0,003; -0,014; -0,023; -0,033; -0,042), como verificamos na Figura 76. A secção -0,042 não apresenta registos no intervalo de tempo estudado.

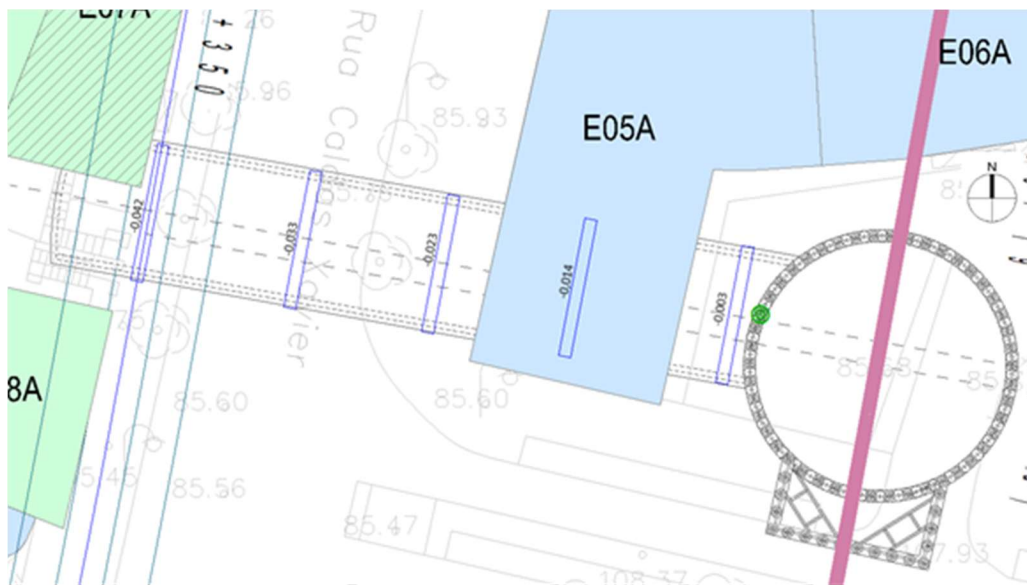


Figura 76- Localização do TL1 e respetivas secções de avanço (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

A malha topográfica de monitorização em túneis é composta por prismas de contenção fixados em pontos estratégicos nas paredes de suporte, distribuídos em torno da secção transversal da estrutura.

No esquema da Figura 77 observa-se prismas de convergência dispostos em configurações triangulares e poligonais, as quais proporcionam uma cobertura equilibrada da geometria estrutural, ao assegurar a deteção de deformações diferenciais e avaliar convergências de secção ou instabilidades laterais do maciço.

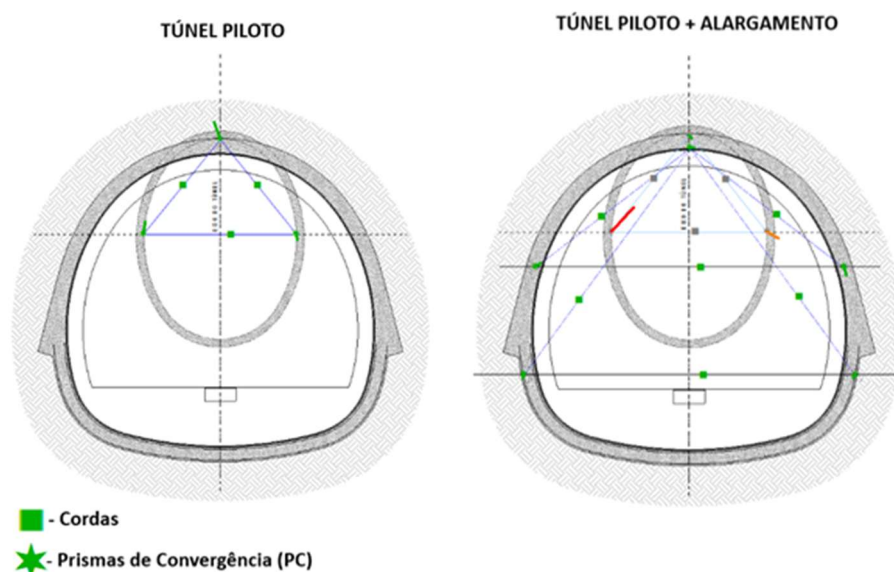


Figura 77- Esquema representativo da disposição de Prismas de Contenção e respetivas Cordas, tanto para um túnel piloto, como para o respetivo alargamento (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

Os gráficos das Figuras 78, 79, 80, 81 evidenciam a média diária do deslocamento vertical e do deslocamento do módulo da componente (X/Y).

Todas as frentes evidenciam assentamentos de até 6 mm, sendo que as secções aos PK: 0+003 (-0.003), 0+014 (-0.014) e 0+023 (-0.023) aproximam-se e ultrapassam a linha de alarme e, no caso da frente de 0+003, ultrapassa a linha de alerta. Este facto pode evidenciar a influência inicial da escavação.

Como os valores ultrapassam os limites, é necessária uma verificação detalhada in situ para validar se os deslocamentos decorrem de um comportamento esperado ou de um movimento localizado excessivo.

Relativamente às rotações, em todas as secções, exceto o PK 0+033, verifica-se também que ultrapassa os limites de alarme e de alerta em alguns prismas, com um máximo de rotação de 11 mm. Podendo, assim, indicar influências de tensões de escavação, sendo que os prismas que evidenciam mais deslocamentos são os mais próximos da entrada do túnel.

O emboquilhamento do túnel é uma zona mais sensível que concentra as fases iniciais da escavação e da receção de material de escavação, o que poderá estar a contribuir para uma resposta estrutural mais exigente, podendo justificar a variação significativa das leituras.

Como tal, também se verifica nas respetivas cordas (Figura 82) da secção a 0+003, movimentos em sentidos opostos, o que possibilita uma potencial deformação não uniforme.

● 0+003

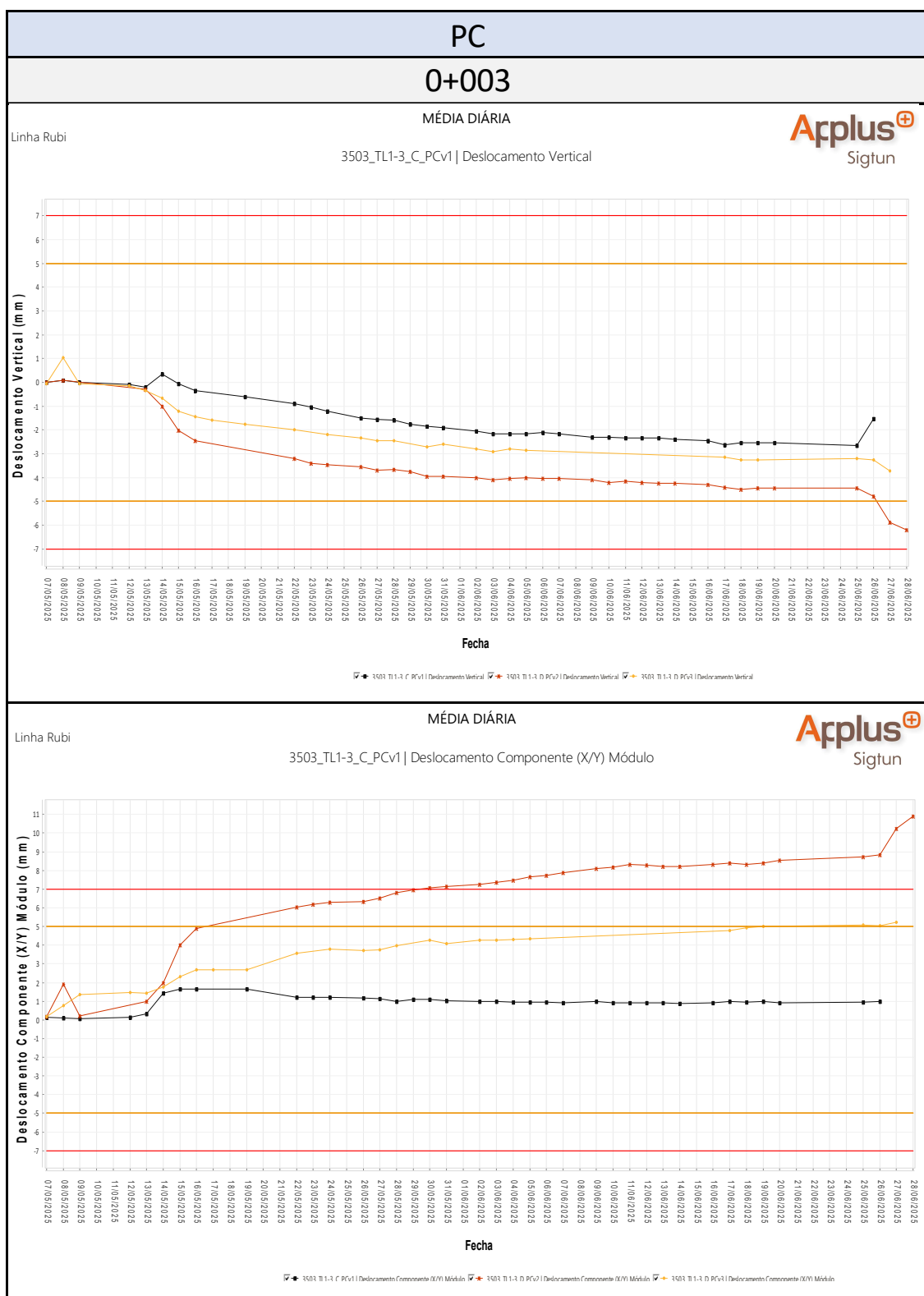


Figura 78- Gráficos da média diária dos deslocamentos dos Prismas de Convergência na secção do Túnel de Ligação 0+003).

● 0+014

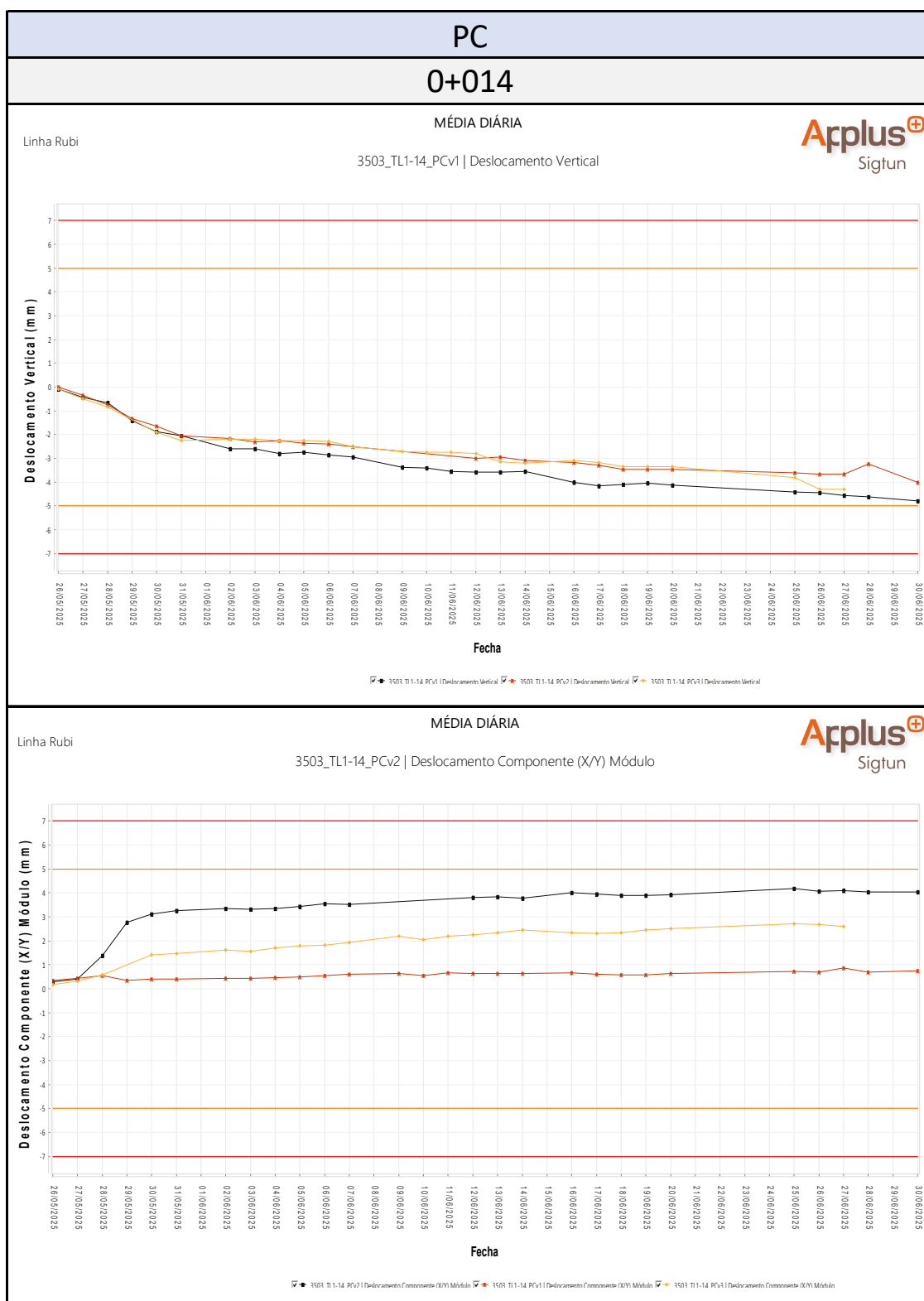


Figura 79- Gráficos da média diária dos deslocamentos dos Prismas de Convergência na secção do Túnel de Ligação (0+014).

● 0+023

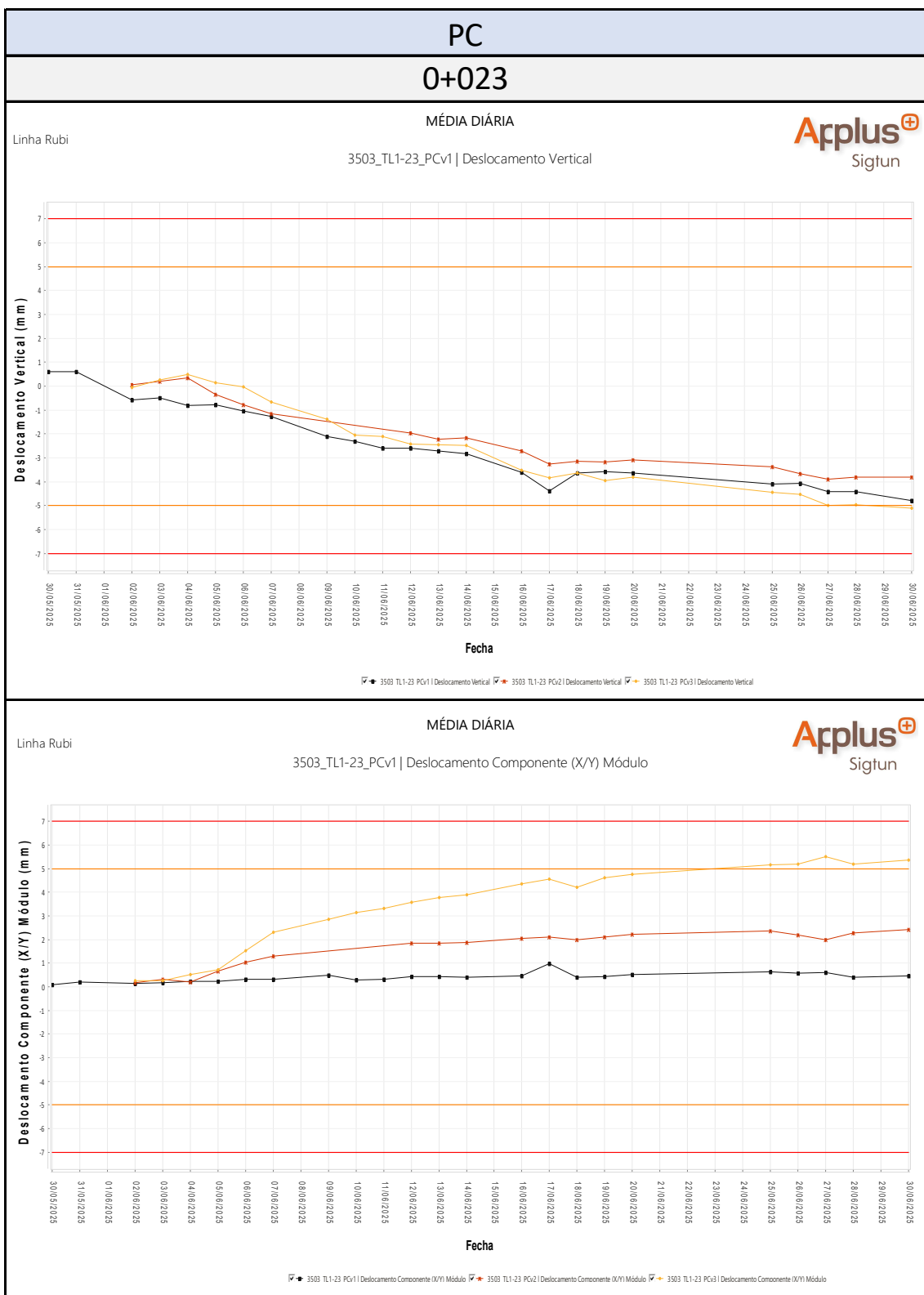


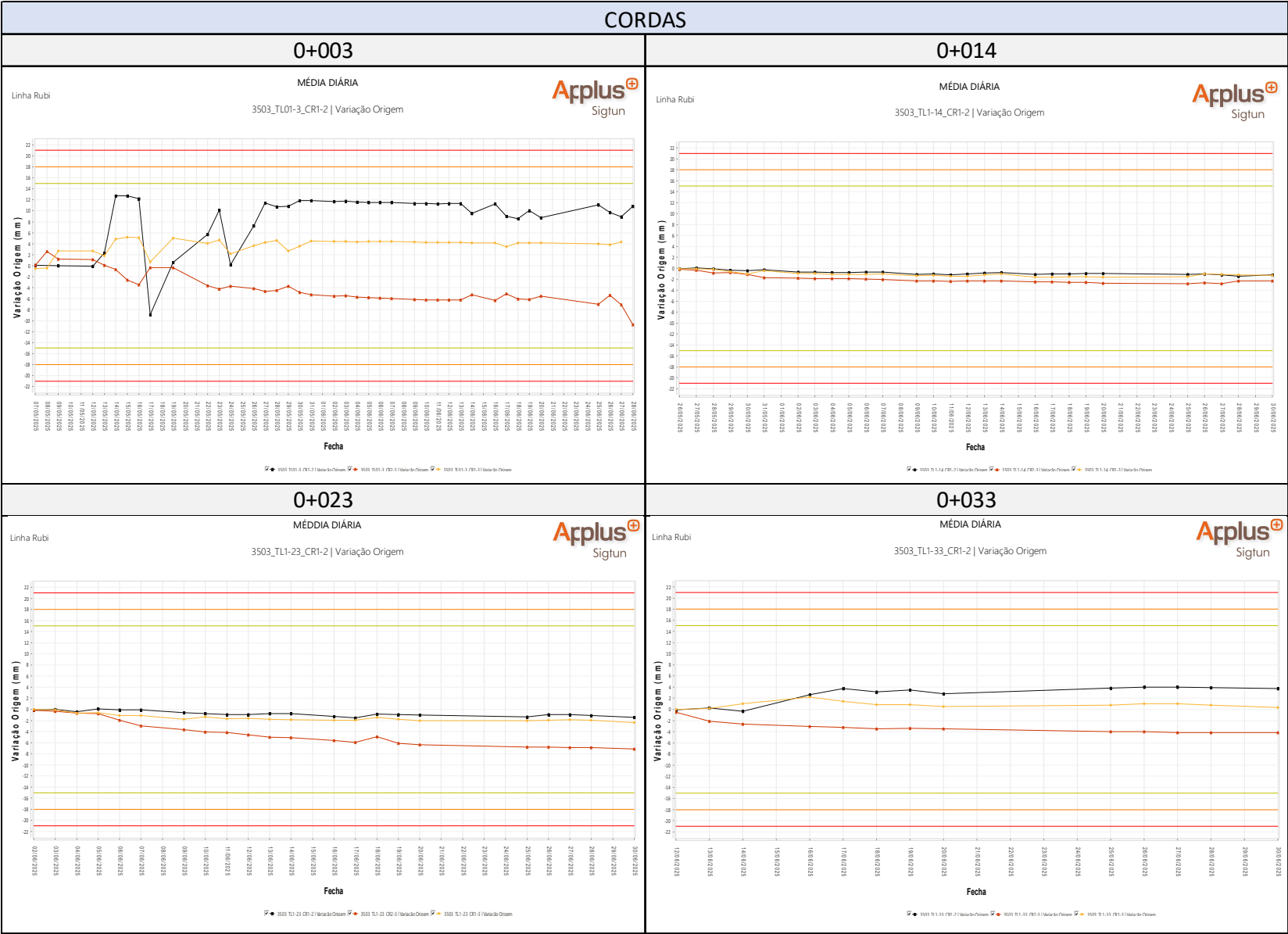
Figura 80- Gráficos da média diária dos deslocamentos dos Prismas de Convergência na secção do Túnel de Ligação (0+023).

● 0+033



Figura 81- Gráficos da média diária dos deslocamentos dos Prismas de Convergência na secção do Túnel de Ligação (0+033).

Figura 82- Gráficos da média diária dos deslocamentos das Cordas dos Prismas de Convergência nas quatro secções do Túnel de Ligação.



6.5. Síntese de Limites de Alerta e de Alarme

Com a análise dos gráficos gerados, foi possível constatar os seguintes limites de alerta e de alarme implementados na fase de execução da obra (Tabelas 16, 17 e 18).

Tabela 16- Limites de alerta e de alarme dos dispositivos de instrumentação dos edifícios.

DISPOSITIVO DE INSTRUMENTAÇÃO	EDIFÍCIOS		LIMITES	
			ALERTA	ALARME
PRISMAS DE EDIFÍCIOS (PE)	E05A		46	49
	E06A		6,7*	8,7*
	E07A		50	53
	E08A		4	6
	E10A		11	14
CLINÓMETROS (CLI)	E07A		2	2,5
	E08A		0,33	0,4
	E10A		0,33	0,4
SISMÓGRAFO (SIS)	E10A	Velocidade X, Y, Z e C	6	-1 e 12

Tabela 17- Limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação dos prismas de contenção e respectivas cordas.

DISPOSITIVO DE INSTRUMENTAÇÃO		LIMITES	
		ALERTA	ALARME
POÇO			
PRISMAS DE CONTENÇÃO (PC)		21	25,5
CORDAS		18	26
TÚNEL			
PRISMAS DE CONTENÇÃO (PC)	(0,003); (0,014); (0,023)	5	7
	(-0,033)	20	30
CORDAS		18	21

Tabela 18- Limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação do maciço.

DISPOSITIVO DE INSTRUMENTAÇÃO		LIMITES	
		ALERTA	ALARME
POÇO			
PRISMAS DE PAVIMENTO (PP)		21	25,5
INCLINÓMETRO (INC)		18	26
TÚNEL			
PRISMAS DE PAVIMENTO (PP)	(0,003); (0,014); (0,023)	5	7
	(-0,033)	20	30
EXTENSÓMETRO (EXT)		73	77
INCLINÓMETRO (INC)		5	7

[página propositadamente em branco]

Capítulo VII

Interpretação da Monitorização da Frente de Obra e Riscos Associados

[página propositadamente em branco]

7. Interpretação da Monitorização da Frente de Obra e Riscos Associados

7.1. Introdução

Este capítulo enquadra a interpretação global da monitorização da frente de obra e dos riscos associados, ao constituir uma etapa de síntese e de avaliação de risco de danos implementada em projeto, bem como uma avaliação crítica dos resultados registados no capítulo anterior. O respetivo objetivo é discutir os deslocamentos e deformações mais relevantes registados e enquadrar, se possível, no contexto da avaliação do tipo de dano no edifício.

Adicionalmente, são analisados os aspetos significativos a considerar, nomeadamente a diferenciação entre os movimentos efetivamente induzidos pela obra e os resultantes de outras influências externas, através da comparação de pontos de referência, entre outros fatores.

Por fim, discute-se a contribuição da monitorização para a gestão de risco, evidenciando a sua capacidade de deteção precoce de anomalias, a relação entre as leituras dos diferentes dispositivos de instrumentação e a evolução da obra no tempo, bem como as limitações do sistema adotado. Esta reflexão permite avaliar a adequação da rede de instrumentação implementada e fornecer recomendações para futuras obras em meio urbano, no qual a proteção dos edifícios existentes assume extrema relevância.

7.2. Avaliação de Risco de Danos em Edifícios

No relatório da Planta de Avaliação de Risco de Danos em Edifícios foi possível constatar as isolinhas apresentadas na Figura 83, no qual foram considerados os respectivos assentamentos induzidos pela escavação do túnel de via e túneis de ligação e as distorções angulares.

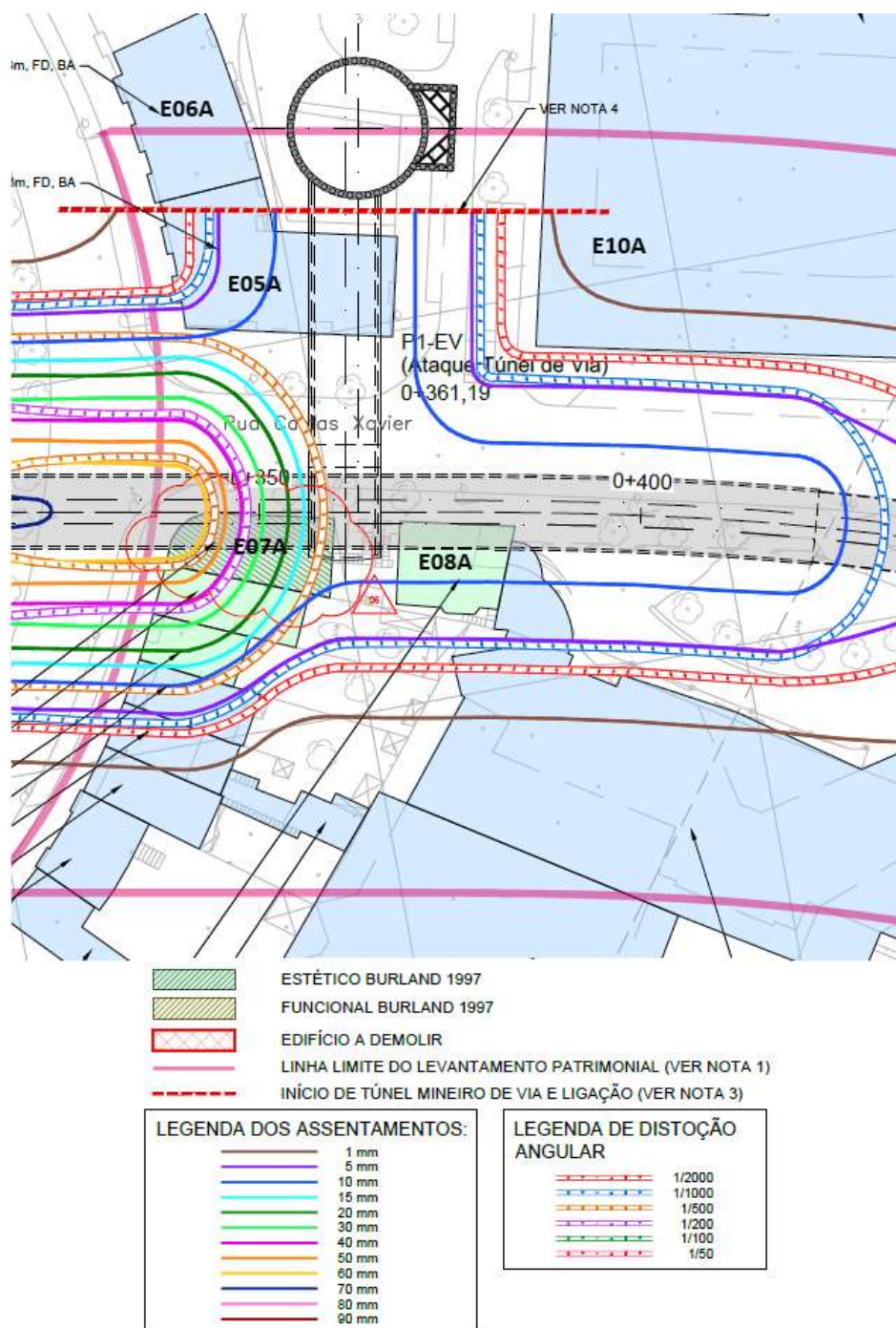


Figura 83- Planta de avaliação de risco de danos em edifícios (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

A classificação de risco de danos adotada é a que se apresenta na Tabela 19, a qual estabelece as medidas para os danos provocados, expressos sob a forma de fissuras e respectivas espessuras.

Os edifícios encontram-se também organizados por quatro categorias de tipos de danos de edifícios:

- Estético (1 e 2);
- Funcional (3);
- Estrutural (4).

Nos edifícios com danos estruturais (4) as fissuras encontram-se em elementos estruturais, como pilares, vigas ou lajes.

Para cada categoria e tipo de dano é avaliado a vulnerabilidade do edifício (Tabela 20), de muito baixa a muito alta, categorizados por intervalos de valores de assentamentos em milímetros e a distorção angular calculada na envolvente dos respetivos edifícios, presentes na anterior Figura 83.

Para os edifícios com risco mais elevado, superior ao tipo de dano estrutural (4), foram analisados com o critério *Burland*, anteriormente referido no Capítulo 2.

Tabela 19- Categoria de dano, segundo o respetivo tipo e medidas a adotar, em projeto.

Categoria de Danos	Tipo de Danos	Descrição de Medidas:
Estético (1)	Fissuras na ordem de 0,1 a 1 mm	— Reparáveis com intervenções locais.
Estético (2)	Fissuras na ordem de 1 a 5mm	— Reparáveis com intervenções locais.
Funcional (3)	Fissuras na ordem de 5 a 15mm	— Reparáveis com intervenções locais; — Substituição de elementos, como janelas e portas.
Estrutural (4)	Fissuras na ordem de >15 mm	— Intervenções gerais ao nível estrutural; — Substituição de elementos, como janelas e portas.

Tabela 20- Categoria e tipo de dano, definido em projeto (excerto de relatório de projeto; gentilmente cedido pela ACA).

		CATEGORIA E TIPO DE DANO			
		Estético		Funcional	Estrutural
		①	②	③	④
	VULNERABILIDADE				
Muito Baixa	Assentamento (mm)	<10	≥10 e <50	≥50 e <75	≥75
	Distorção Angular	<1/500	≥1/500 e <1/200	≥1/200 e <1/50	≥1/50
Baixa	Assentamento (mm)	<8	≥8 e <40	≥40 e <60	≥60
	Distorção Angular	<1/625	≥1/625 e <1/250	≥1/250 e <1/83	≥1/63
Média	Assentamento (mm)	<7	≥7 e <33	≥33 e <50	≥50
	Distorção Angular	<1/750	≥1/750 e <1/300	≥1/300 e <1/75	≥1/75
Alta	Assentamento (mm)	<6	≥6 e <28	≥28 e <43	≥43
	Distorção Angular	<1/875	≥1/875 e <1/350	≥1/350 e <1/88	≥1/88
Muito Alta	Assentamento (mm)	<5	≥5 e <25	≥25 e <38	≥38
	Distorção Angular	<1/1000	≥1/1000 e <1/400	≥1/400 e <1/100	≥1/100

7.3. Síntese de Deslocamentos Relevantes

Na análise dos instrumentos instalados, os mais relevantes, isto é, os dispositivos que registaram deslocamentos excessivos ou significativos, incidem:

- Nos prismas de edifícios dos edifícios E05A (PE03, PE04 e PE05) e E06A (PE06 e PE07), na respetiva junta de dilatação;
- Nos prismas de pavimentos da envolvente do túnel de ligação;
- No inclinómetro INC1;
- Nos piezómetros;
- Nos prismas de contenção do túnel-piloto e do túnel de ligação.

7.3.1. Edifícios Envolventes

Os deslocamentos mais relevantes dos edifícios da envolvente da obra em estudo inserem-se nos resultados representados nos gráficos de alguns prismas de edifícios e nos fissurómetros automáticos.

7.3.1.1. Edifício E06A e Fissurómetros

O edifício E06A apresenta deslocamentos no sentido contrário aos dos trabalhos de escavação da obra em estudo, como podemos verificar na Figura 47, do Capítulo 6, que se verifica na orientação do vetor correspondente à componente X/Y.

Os prismas atingem deslocamentos verticais a aproximadamente de menos (-)15mm, o que indica assentamentos no extremo Sudeste do edifício. O plano X/Y apresenta um valor máximo de ordem 55mm, pelo que se admite que tal deslocamento não resulta da influência da obra em estudo, mas relacionado com uma obra em construção nas proximidades, no caso seria a construção da linha circular, Rosa, do Metro do Porto.

Esta situação particular é confirmada pelas medições dos fissurómetros automáticos da junta de dilatação dos edifícios E06A e E05A, que apresentam uma abertura máxima aproximada de 20 mm e evidenciam deslocamentos antes de se iniciar a escavação do poço.

Contudo, a solução adotada incidiu em instalar novamente novos prismas de edifícios, que acabaram por ficar praticamente na mesma localização e alterar a localização da respetiva estação total que captava as leituras dos prismas, na qual se instalou mais a oeste do edifício E10A (Edifício do Mercado do Bom Sucesso).

As leituras de ambos os prismas instalados nos edifícios foram realizadas em simultâneo para se constatar se havia melhorias nas leituras, isto é, se é necessária a confirmação de que as leituras dos prismas não registram movimentos provenientes da outra obra.

7.3.1.2. Edifício E05A

No edifício E05A, que se encontra perpendicularmente ao alinhamento do túnel de ligação entre os PK (0+005 e 0+020), alguns prismas, os que se encontram mais perto do edifício E06A, apresentam igualmente deslocamentos que não estão associados aos trabalhos de escavação em curso.

Os prismas no edifício da envolvente do túnel de ligação sugerem a ocorrência de rotação ou deformação diferencial e assentamentos, na ordem máxima de valores de 16 mm e 15 mm, respetivamente. Estes deslocamentos resultam dos trabalhos de escavação do túnel de ligação.

Ao relacionar os valores com as isolinhas dos assentamentos da Planta de Avaliação de Risco de Danos em Edifícios, que se registam entre os 5 e 10mm e em comparação com o valor máximo de assentamentos registados corresponder a 15mm, devido a essa discrepância a zona de influência implementada no estudo dessa planta deveria ser mais alongada do que se previa, pois os prismas registam valores significativos resultantes da escavação do túnel de ligação.

Como consequência, os limites de alerta e alarme também poderiam ser revistos, pois segundo Portugal *et al.* (2006) os resultados da avaliação de risco podem ser ponderados para estabelecer os limites de alarme e alerta.

7.3.2. Maciço Envolvente

No maciço envolvente, os dispositivos com os deslocamentos mais relevantes foram os prismas de pavimento, o inclinómetro INC1 e os piezómetros.

7.3.2.1. Prismas de Pavimento

Os prismas de pavimentos rondam os 15,5 mm dos assentamentos e, na envoltória do túnel de ligação, os assentamentos previstos na Planta de Avaliação de Risco de Danos em Edifícios situam-se entre 15 e 30 mm.

Como a tendência não será de estabilização, pois ainda irá proceder-se á segunda fase de escavação do túnel, correspondente à escavação do alargamento da calote e ao rebaixo, os assentamentos poderão aumentar gradualmente.

Com isso, novamente a Planta poderia ser atualizada, tanto no alargamento da zona de influência, como na reanálise dos assentamentos.

7.3.2.2. Inclinómetro- INC1

O inclinómetro INC1 regista deslocamentos, no sentido perpendicular ao da escavação, provenientes da escavação do túnel piloto, do túnel de ligação (TL1).

Este comportamento é coerente com o esperado em zonas adjacentes a escavações profundas, onde a redistribuição de tensões e o alívio de pressões no maciço resultam em deslocamentos transversais.

7.3.2.3. Piezómetros

O piezómetro manual de tubo aberto, como o automatizado de corda vibrante instalados evidenciam a influência do faseamento construtivo no comportamento hidrogeológico do maciço.

A análise das leituras demonstra que durante as fases de escavação do poço (P1EV) e do túnel de ligação (TL1) ocorreu um rebaixamento significativo do nível freático, na ordem de 7 m.

Este comportamento é coerente com a descompressão e a alteração do regime de circulação da água, induzidas pela escavação. O rebaixamento registado é, assim, indicativo de uma maior

extração de água durante as fases construtivas, o que reflete a interação direta entre o avanço construtivo e a resposta hidrogeológica local.

7.3.1. Prismas de Convergência do TL1

As leituras dos gráficos dos prismas de contenção do túnel piloto, do túnel de ligação, identificam um deslocamento no plano X/Y com um valor máximo de 11 mm, o que corresponde às tensões induzidas pelas escavações.

7.4. Contribuição da Monitorização de Obras Subterrâneas

No futuro, é importante considerar que obras subterrâneas de grandes dimensões nas proximidades não devem ocorrer em simultâneo, uma vez que tal situação gera influências significativas na monitorização, que no caso em estudo obrigou a alterar a localização de pontos de referência e da respetiva estação total, com impactos diretos no orçamento inicial e na fiabilidade de registos de leituras.

Relativamente aos extensómetros utilizados, na obra em estudo estes apresentavam um comprimento limitado a 5 metros, quando a profundidade entre a superfície e a abóboda do túnel subterrâneo ronda os 13 a 16 metros. Como se verificou na análise, nenhum dos extensómetros registou deslocamentos significativos, o que impossibilitou uma interpretação consistente da relação entre medições superficiais e deformações em profundidade, pois, nas medições superficiais, foram registados deslocamentos relevantes que se deviam refletir em profundidade.

A reduzida zona de influência de leitura do extensómetro não atingiu adequadamente a calota do túnel, comprometendo a avaliação dos deslocamentos verticais. Neste contexto, seria mais adequado o recurso a extensómetros multiponto, como os de corda vibrante, que podem alcançar diferentes níveis de profundidades e permitem uma caracterização mais detalhada do comportamento do maciço.

Os limites de alerta e alarme do projeto acabaram por ser, na sua maioria, revistos em fase de obra, como se verifica nas Tabelas desenvolvidas nos Anexos. É de notar e relembrar que há certos dispositivos de instrumentação que não apresentam limites de alerta e de alarme definidos, e que os dados recolhidos contribuem para fins de registo.

O relatório da planta de avaliação de risco de dano em edifícios e a respetiva classificação de categorias de dano não foram aplicados à fase em estudo da obra, uma vez que não foram detetados quaisquer movimentos significativos nas fissuras dos edifícios monitorizados. No entanto, este método constitui uma ferramenta de apoio à decisão em casos em que as estruturas são afetadas na realização de obras subterrâneas.

Ainda assim, a monitorização permitiu o seguinte conjunto de contributos relevantes:

- Permitiu avaliar deslocamentos nas diferentes fases construtivas;
- Possibilitou comparar os valores de limites de alerta e alarme medidos com os previstos e reavaliar os valores de referência;
- Facilitou a tomada de decisões atempadas, como o reforço do tratamento do maciço no decorrer dos trabalhos de escavação;
- Evidenciou a necessidade de redimensionar a zona de influência e recalcular os valores de referência (alerta e alarme);
- Identificou a zona de maior assentamento, localizada na Rua Caldas Xavier, em correspondência com o túnel de ligação;
- Demonstrou a influência das obras em simultâneo nas estruturas da vizinhança, aspeto que deveria ter sido ponderado em fase de projeto;
- Por fim, revela-se de grande utilidade para as fases posteriores, dado que o estudo decorreu até ao final da escavação do túnel piloto do túnel de ligação, mas será igualmente essencial no alargamento da calote e do rebaixo, permitindo antecipar e mitigar eventuais problemáticas.

Em síntese, sublinha-se que a monitorização constitui uma ferramenta indispensável para todo o tipo de obras e, em particular, obras subterrâneas, sobretudo em maciços terrosos onde os efeitos de deformabilidade, redistribuição de tensões e variações hidrogeológicas podem comprometer a estabilidade das estruturas de suporte e dos edifícios envolventes.

Capítulo VIII

Conclusões

[página propositadamente em branco]

8. Conclusões e Interpretações Futuras

O trabalho foi desenvolvido no âmbito da Unidade Curricular de “Dissertação/Estágio/Projeto”, o estágio de curta-duração, realizado na empresa Grupo ACA, da empreitada da Linha Rubi, do Metro do Porto, com dados adquiridos pela empresa subcontratada, a Applus+, e teve como objetivo analisar o caso concreto da instrumentação e monitorização da envolvente do poço de emergência e ventilação e o respetivo túnel de ligação, em que antes e durante os trabalhos de escavação as leituras dos dispositivos de instrumentação foram impactadas pela obra em estudo e por outra obra subterrânea próxima, da Linha Rosa.

Este estudo iniciou-se com a recolha e organização de bibliografia e documentação técnica, incluindo elementos do projeto e da instrumentação geotécnica da área de estudo. De seguida, foi realizado o acompanhamento presencial da equipa de instrumentação, com registo fotográfico dos trabalhos de monitorização e das frentes de obra da Linha Rubi, do Metro do Porto.

Posteriormente, os trabalhos decorreram de forma remota, com apoio da equipa técnica, com foco no tratamento e na análise dos dados recolhidos pelos dispositivos geotécnicos, o que permitiu a formulação de conclusões fundamentadas.

A análise foi realizada segundo dados recolhidos correspondentes para fins de registo, para controlo de obra e para segurança, com base na seguinte ordenação:

- Edifícios envolventes: Prismas de Edifícios, Fissurómetros, Clinómetros e Sismógrafos;
- Maciço circundante do poço e do túnel de ligação: Prismas de Pavimento, Extensómetros, Piezómetros e Inclínómetros;
- Prismas de Convergência/Contenção e respetivas Cordas do poço e do túnel de ligação.

Esta abordagem permitiu obter uma avaliação global, identificando deslocamentos de maior relevância, tendo em conta os limites de referência, bem como interpretar aspetos críticos observados e compreender a origem das consequências associadas.

Assim, conclui-se e confirma-se a necessidade de rever o plano de instrumentação, em fase de execução da obra, uma vez que a interpretação dos dados evidenciou os seguintes aspetos:

- Obras subterrâneas de grandes dimensões não devem ocorrer em simultâneo, pois interferem na monitorização e podem implicar alterações logísticas, menor fiabilidade dos registos e custos adicionais;
- Os extensómetros de comprimento relativamente pequeno, em relação ao recobrimento, demonstraram-se inadequados, pois não registaram deslocamentos significativos. Sendo assim, os extensómetros multiponto podem ser mais adequados;
- Os limites de alerta e alarme definidos em projetos foram maioritariamente ajustados em fase de obra;
- A monitorização permitiu:
 - avaliar deslocamentos em diferentes fases construtivas;
 - comparar valores de alerta e alarme de fase de projeto com os valores medidos em fase de obra;
 - facilitar a tomada de decisões atempadas;
 - evidenciar a necessidade de redimensionar a zona de influência e recalcular os valores de referência (alerta e alarme);
 - reforçar a utilidade da monitorização de acordo com o faseamento construtivo (túnel piloto/alargamento da calote/rebaixo).

A monitorização geotécnica é importante e deve ser utilizada com rigor, sistematização e continuidade, de forma a garantir a fiabilidade dos registos, os pressupostos definidos em fase de projeto e a segurança das estruturas envolvidas.

Capítulo IX

Referências

[página propositadamente em branco]

9. Referências

- Afonso, M.J., Chaminé, H.I., Gomes, A., Fonseca, P.E., Marques, J.M., Guimarães, L., Guilhermino, L., Teixeira, J., Carvalho, J.M., Marques da Silva, M. & Rocha, F. (2009). Urban hydrogeomorphology and geology of the Porto metropolitan area (NW Portugal): a multidisciplinary approach. In: Culshaw M.G., Reeves H.J., Jefferson I. & Spink T. (eds.) Engineering geology for tomorrow's cities. Geological Society of London Engineering Geology Special Publications. Geological Society of London. (doi:10.1144/EGSP22.1; on CD-Rom insert, IAEG Paper 92, 9 pp.)
- Almeida, A. (2006). Geology and urban landscape: the granite in Oporto, NW Portugal. *European Geologist Journal*, 21:4–8
- AYESA (2022). Projeto de Execução. Linha Rubi - Casa da Música - Santo Ovídio. Túneis. Casa da Música-Campo Alegre. Avaliação de Risco de Danos em Edifícios. Planta 1 de 3. (Relatório Inédito).
- AYESA (2022). Projeto de Execução. Linha Rubi - Casa da Música - Santo Ovídio. Túneis. Casa da Música-Campo Alegre. Instrumentação e Monitoramento. Planta 1 de 3. (Relatório Inédito).
- AYESA (2022). Projeto de Execução. Linha Rubi - Casa da Música - Santo Ovídio. Túneis e Poços/Poços. Poço ed Emergência e Ventilação 1 (P1-EV). Contenção Provisória. Instrumentação e Observação. (Relatório Inédito).
- AYESA (2022). Projeto de Execução. Linha Rubi - Casa da Música - Santo Ovídio. Túneis. Casa da Música-Campo Alegre. Túnel de Ligação 1. Revestimento Primário. Sequência Construtiva. (Relatório Inédito).
- AYESA (2022). Projeto de Execução. Linha Rubi - Casa da Música - Santo Ovídio. Túneis. Casa da Música-Campo Alegre. Túnel de Ligação 1. Revestimento Primário. Planta e Perfil Longitudinal Geotécnico. (Relatório Inédito).
- Basset, R. (2012). *A Guide to Field Instrumentation in Geotechnics: Principles, Installation and Reading*. Taylor & Francis Group, LLC.
- Begonha, A., & Sequeira Braga, M.A. (2002). Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties. *Catena* 49:57–76.
- Burland, J. B.; Broms, B. B.; de Mello, V. F. (1977). Behaviour of foundations and structures. State-of-the-art report, Proc. of the 9th ICSMFE, State-of-the-art Volume, pp. 495-546, Tokyo.
- Burland, J.B. (1997). Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. Balkema: *Earthquake Geotechnical Engineering*, Ishihara (ed.), pp. 1189-1201.
- Carrington da Costa, J. & Teixeira, C. (1957). Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, à escala 1/50000, Folha 9-C (Porto). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- CMP (2003). Carta Geotécnica do Porto, à escala 1/10000. Câmara Municipal do Porto, Porto.

CMP (2020). Plano Diretor Municipal (PDM). Relatório - Discussão Pública. Câmara Municipal do Porto, Porto.

Dunnicliff, J. (1988). Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. A Wiley Interscience Publication, USA.

Durham Geo Slope Indicator (2004). Guide to Geotechnical Instrumentation. Washington, USA.

Freitas, António (2023). Projeto de Execução - Linha Casa da Música - Santo Ovídio. Volume 04 - Túneis e Poços. Tomo 04.C- Poços. Fundações e Estruturas - Poço P1-EV. Memória Descritiva e Justificativa. AYESA. Quadrante. (Relatório Inédito).

Geokon (2025). Produtos. In: <https://www.geokon.com/> (consultado em 10 de maio de 2025).

GEOSENSE (2021). Piezometers in depth. In: <https://share.google/0bxTw2AcsSzfyRjLK> (consultado em 20 de maio de 2025).

Gesautarquia (2025). História-União das Freguesias de Lordelo do Ouro e Massarelos. In: <https://www.uf-lordeloouromassarelos.pt/freguesia/historia> (consultado a 15 de maio de 2025).

Glisic, B. & Inaudi, D. (2002). Structural Monitoring of Concrete Bridges during Whole Lifespan. Manno, Suíça. (Relatório Inédito).

Guedes Rodrigues, C. F. (2011). Monitorização de Estruturas de Engenharia Civil Apoiada em Soluções de Fibra Ótica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (Tese de Doutoramento). URI: <https://share.google/dfFdnBJ5IngtXohWZ>

Hexagon- Leica Geosystems (2025). Estações Totais. In: <https://leica-geosystems.com/pt-br/products/total-stations> (consultado em 1 de junho de 2025).

Hoek, E. (2007). Practical rock engineering. RockScience: Hoek's Corner.

Hoek, E., Kaiser, P.K., & Bawden, W.F. (1994). Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam: A.A. Balkema.

LaCroix, A. (1933) - Sur quelques granites des environs de Porto. Anais da Faculdade de Ciências do Porto. 18: 43-48.

Madureira de Sousa, A. A. (2015). Estudo de Sistemas Hidrogeológicos no Norte e Centro de Portugal. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. (Dissertação de Mestrado). URI: <https://share.google/WbMmGZLmrPgdxv3J2>

Neiva Ferreira, F. G. (2012). Instrumentação e monitorização na avaliação do comportamento de maciços e estruturas envolventes: caso de poços em meio urbano. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado). URI: <https://share.google/yBwFsyfEQRwNwNDhU>

Newmark, N. M. (1959). Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 15(2):139–160.

NP2074- Norma Portuguesa 2074 (2015). Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas. Instituto Português da Qualidade. Portugal.

Peck, R. B., Karl Terzaghi, Nathan M. Newmark. (1969). Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics. Géotechnique. 19 (2): 171–187.

Pereira, António, Oliveira, João (2023). Projeto de Execução. Linha Casa da Música - Santo Ovídio. Contenção Provisória - Poço P1-EV. Memória Descritiva e Justificativa. AYESA. Quadrante. (Relatório Inédito).

Pistone, R. S. & Pinto da Cunha, A. (2014). Túneis de Portugal. Comissão Portuguesa de Túneis e Obras Subterrâneas.

Portugal, J., Portugal, A. & Santo, A. (2006). Danos em edifícios induzidos por escavações, Portugal. Geotecnia, SPG, nº107.

Quiba, W.E.V. (2022). Instrumentação Geotécnica Manual versus Automatizada: aplicação na construção de um Túnel na Linha Circular da Metro do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Rankin, W.J. (1988). Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. Eng. Geol. of Underground Movements, pp. 79-92.

Rodrigues, C.L.P. (2015). Inventário hidrogeológico e dos potenciais focos de contaminação nas bacias hidrográficas da Asprela e Massarelos: implicações no ciclo hidrológico urbano. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado). URI: <https://share.google/SNwxyBZQIG5vKMgAW>

Santos, M. & Cateira, C. (2018). Caraterização Biofísica- Relatório de Caraterização e Diagnóstico (PDMP). Revisão do Plano Diretor Municipal do Porto. Câmara Municipal do Porto, Porto.

Setpoint Technologies (2025). Structural Health Monitoring. In: <https://setpoint.gr/> (consultado a 5 de julho de 2025).

Silveira, J.F.A. (2013). Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. Oficina de textos. São Paulo, Brasil.

Strauss, A., Bien J., Neuner H., Harmening, C., Seywald, C., Österreicher, M., Voit, K., Pistone, E., Spyridis, P., & Bergmeister, K. (2020). Sensing and monitoring in tunnels testing and monitoring methods for the assessment of tunnels. Wiley, Austria, 21: 1356-1376.

Terzaghi, K. (1945). Theoretical soil mechanics. New York: John Wiley & Sons.

Vieira da Silva, A.M. (2022). Observação e instrumentação de obras geotécnicas: acompanhamento de um caso prático na região do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado). URI: <https://share.google/CLrluX0pwnjs5cpVC>

Ferramentas de IA

OpenAI (2025). ChatGPT (Mar 14 version) [Large language model]: <https://chatgpt.com/> (consultado em 10 de julho de 2025).

[página propositadamente em branco]

Anexos

[página propositadamente em branco]

10. ANEXOS

10.1. Relatórios de Projeto

10.1.1. Sequência Construtiva do TL1- Revestimento Primário

10.1.2. Monitorização e Instrumentação de Casa da Música a Campo Alegre

10.1.3. Instrumentação e Observação de P1EV- Contenção Provisória

10.1.4. Avaliação de Risco de Danos em Edifícios

10.2. Classificação de *Hoek et al.* (1994, 2007)

10.3. Gráficos de Análise de Dispositivos de Instrumentação

10.3.1. Clinómetro do Edifício E05A

10.4. Cronograma de Instalação de Dispositivos de Instrumentação

10.5. Tabelas Comparativas de Limites de Alarme e de Alerta

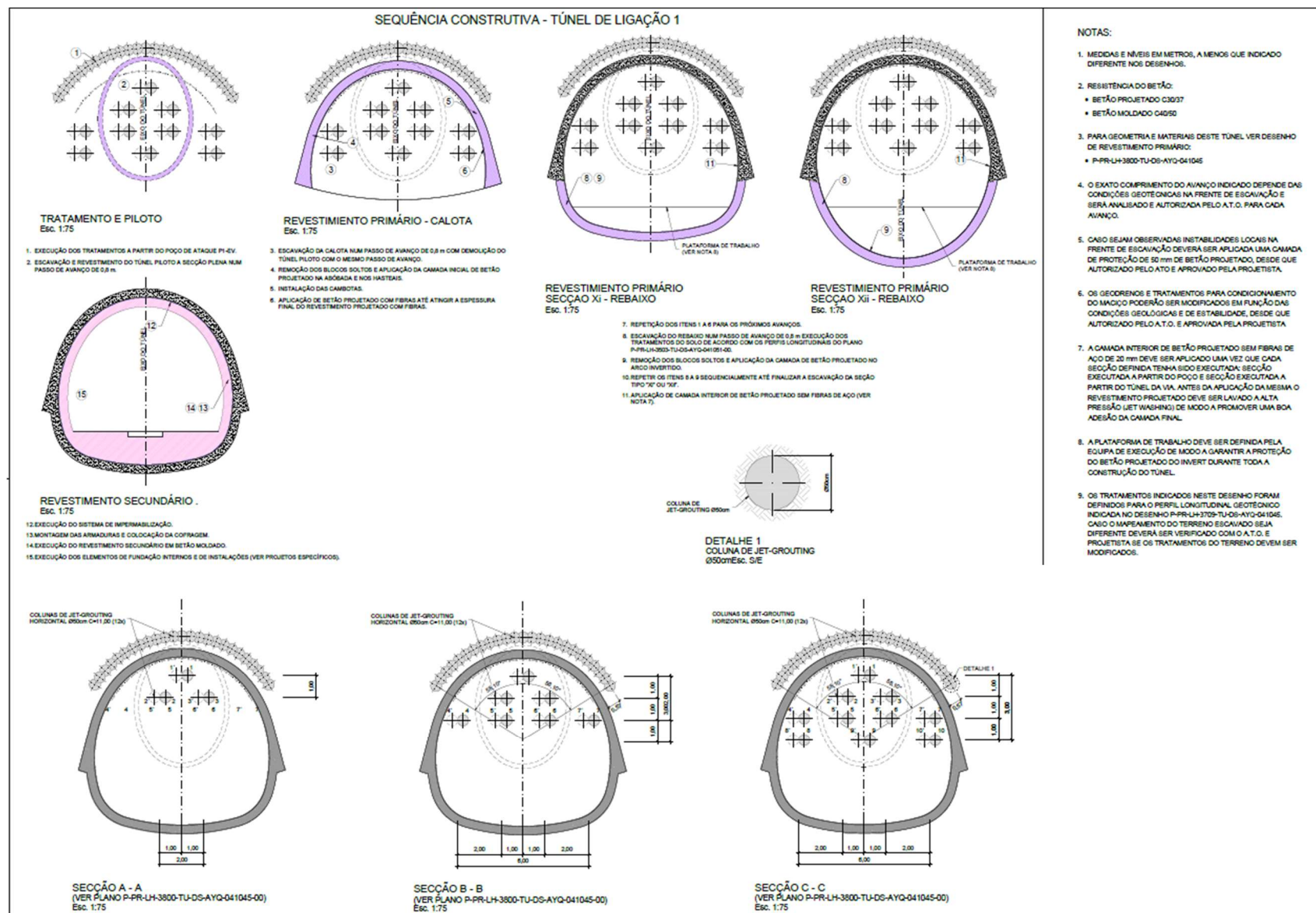
10.5.1. Comparação de Limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação dos edifícios

10.5.2. Comparação de limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação dos prismas de contenção e respetivas cordas

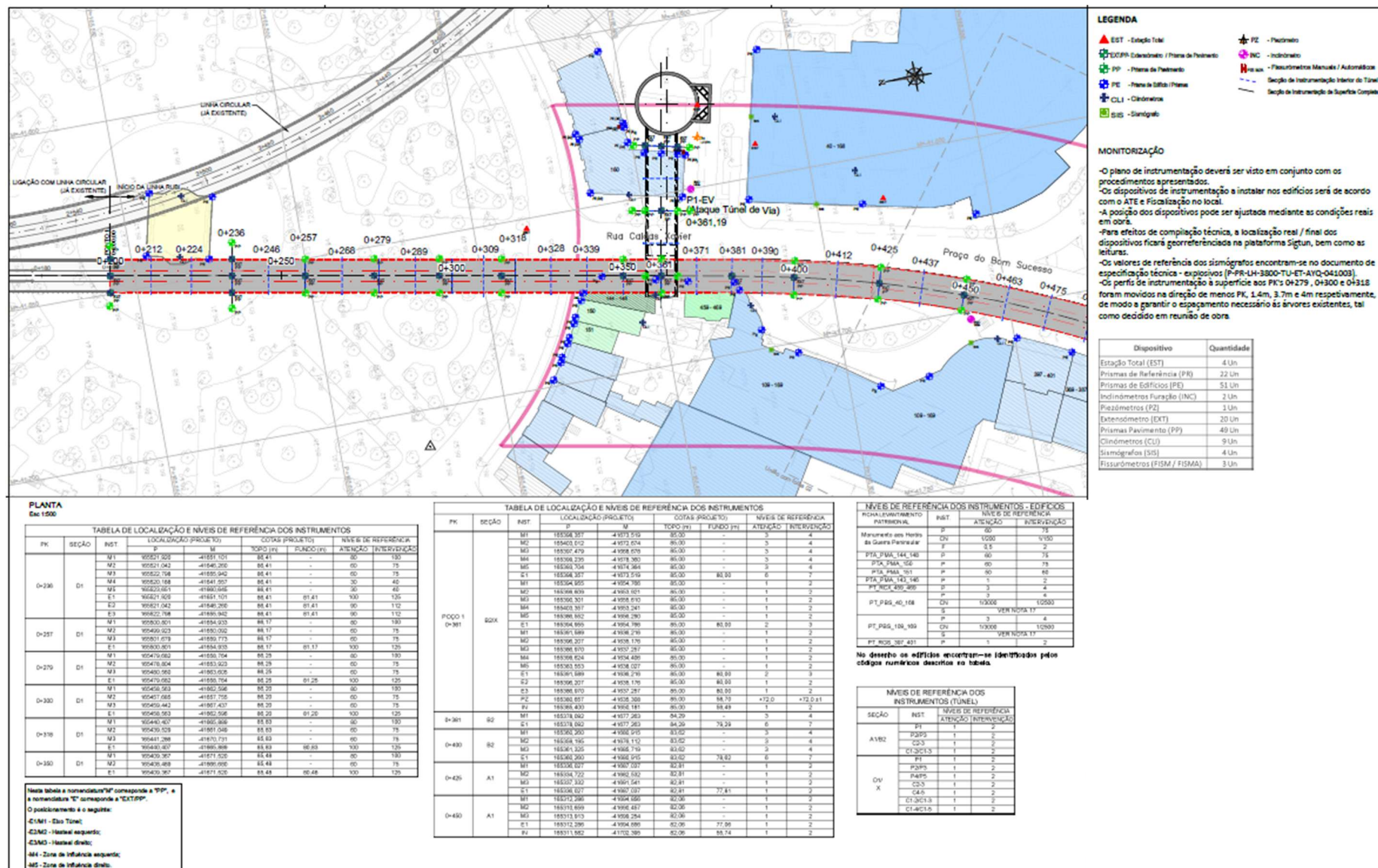
10.5.3. Comparação de limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação do maciço

[página propositadamente em branco]

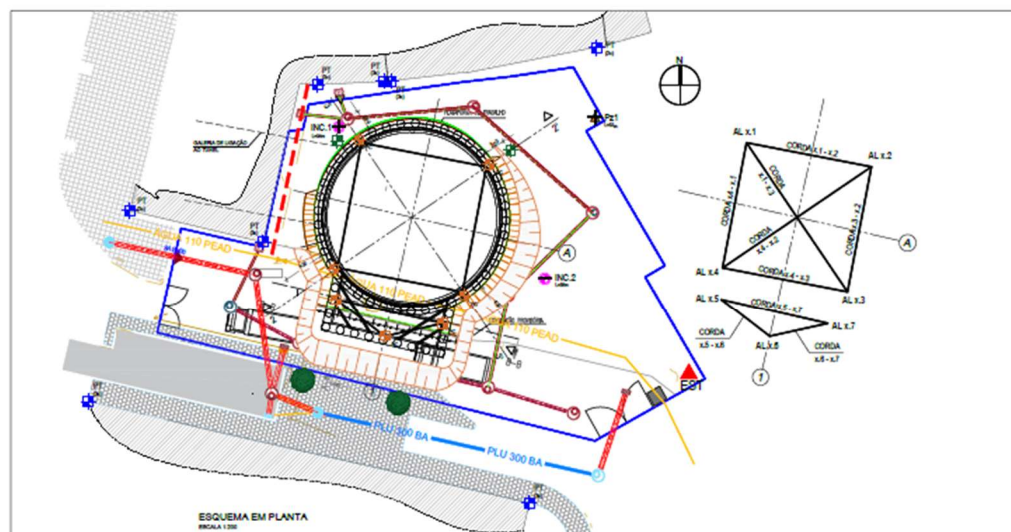
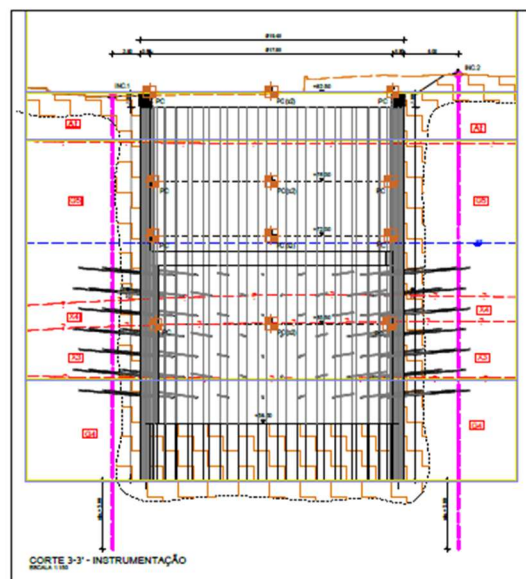
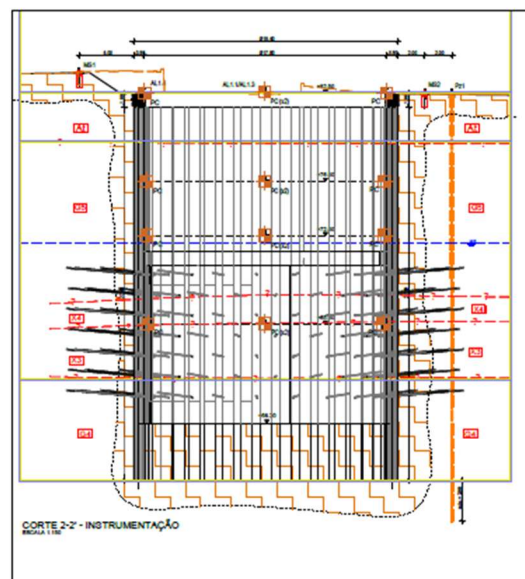
Sequência Construtiva do TL1- Revestimento Primário.



Monitorização e Instrumentação de Casa da Música a Campo Alegre.



Instrumentação e Observação de P1EV-Contenção Provisória.



MONITORIZAÇÃO

-O plano de instrumentação deverá ser visto em conjunto com os procedimentos apresentados.
-A posição dos dispositivos pode ser ajustada mediante as condições reais em obra.
-Para efeitos de compilação técnica, a localização real / final dos dispositivos ficará georreferenciada na plataforma Sigurn, bem como as leituras.
-Os prismas devem ser instalados nas estacas armadas.

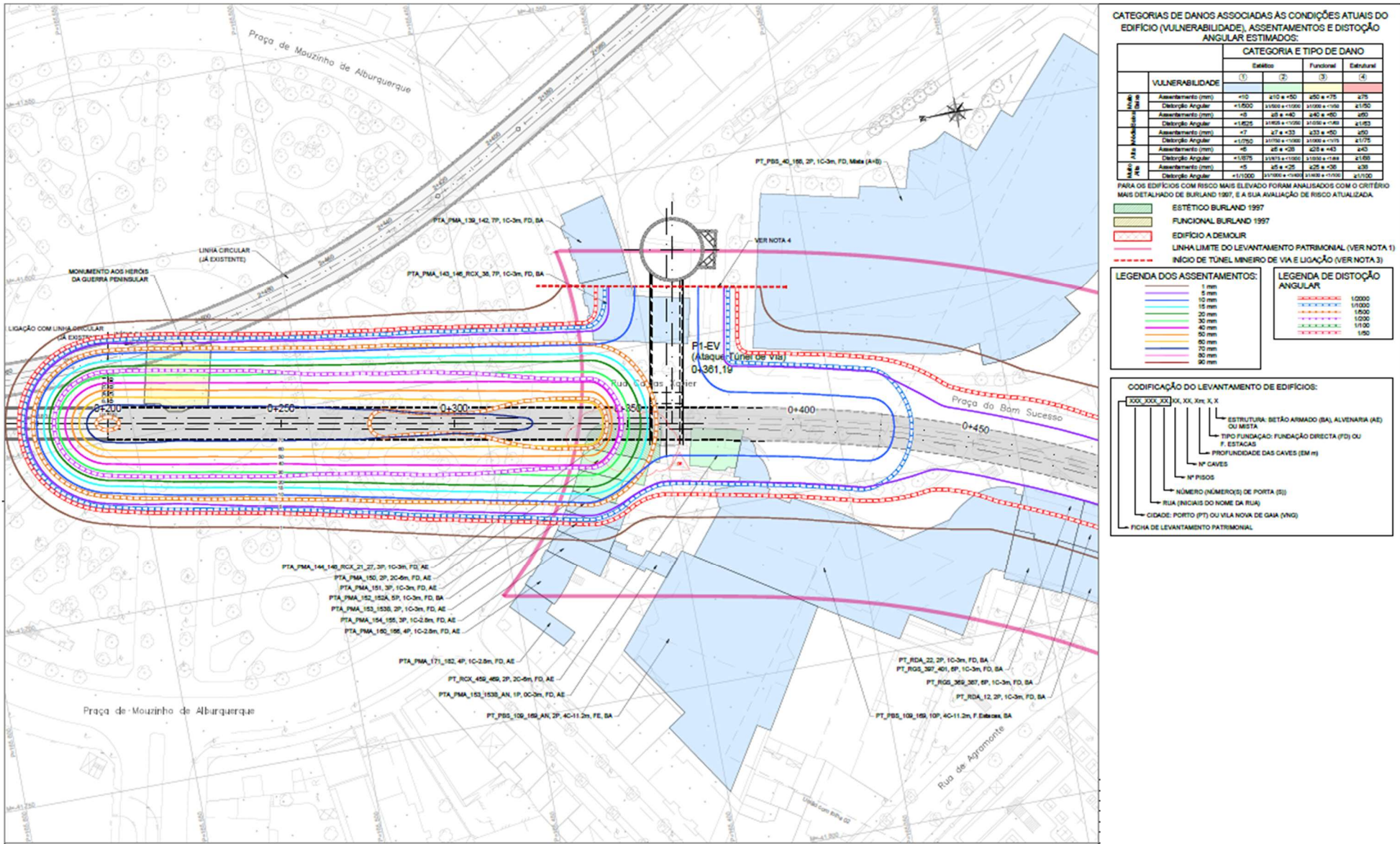
ITEM	COORDENADAS (X, Y, Z)				TIPO DE DISPOSITIVO	MATERIAL	QUANTIDADE	OBSERVAÇÕES
	X	Y	Z	AL				
Prisma de Referência	10	10	10	10	Prisma	Alumínio	1	
Prisma de Referência	10	10	10	10	Prisma	Alumínio	1	
Prisma de Referência	10	10	10	10	Prisma	Alumínio	1	

SIMBOLOGIA

▲ EST - Estação Total	✱ PZ - Pícnometro
● PR - Prisma de Referência	✱ INC - Indivíduo
✱ PP - Prisma de Referência	
✱ PC - Prisma de Referência	

Dispositivo	Quantidade
Prisma de Referência	2 Un
Prisma de Referência	15 Un
Indivíduos	2 Un
Pícnômetros	1 Un

Avaliação de Risco de Danos em Edifícios.

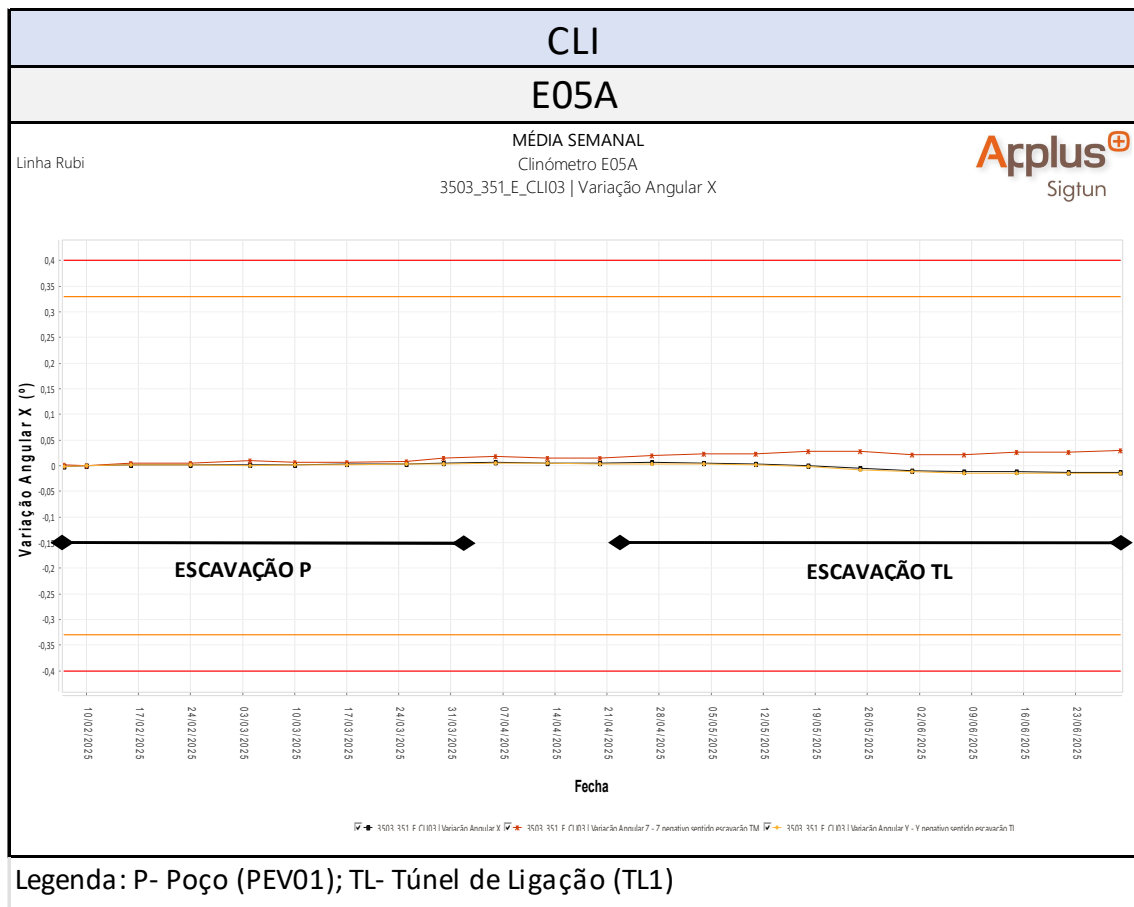


Avaliação da qualidade do maciço rochoso através do GSI (Hoek, 1994, 2007).

Quadro 19. Avaliação da qualidade do maciço rochoso através do GSI (Hoek, 1994, 2007).

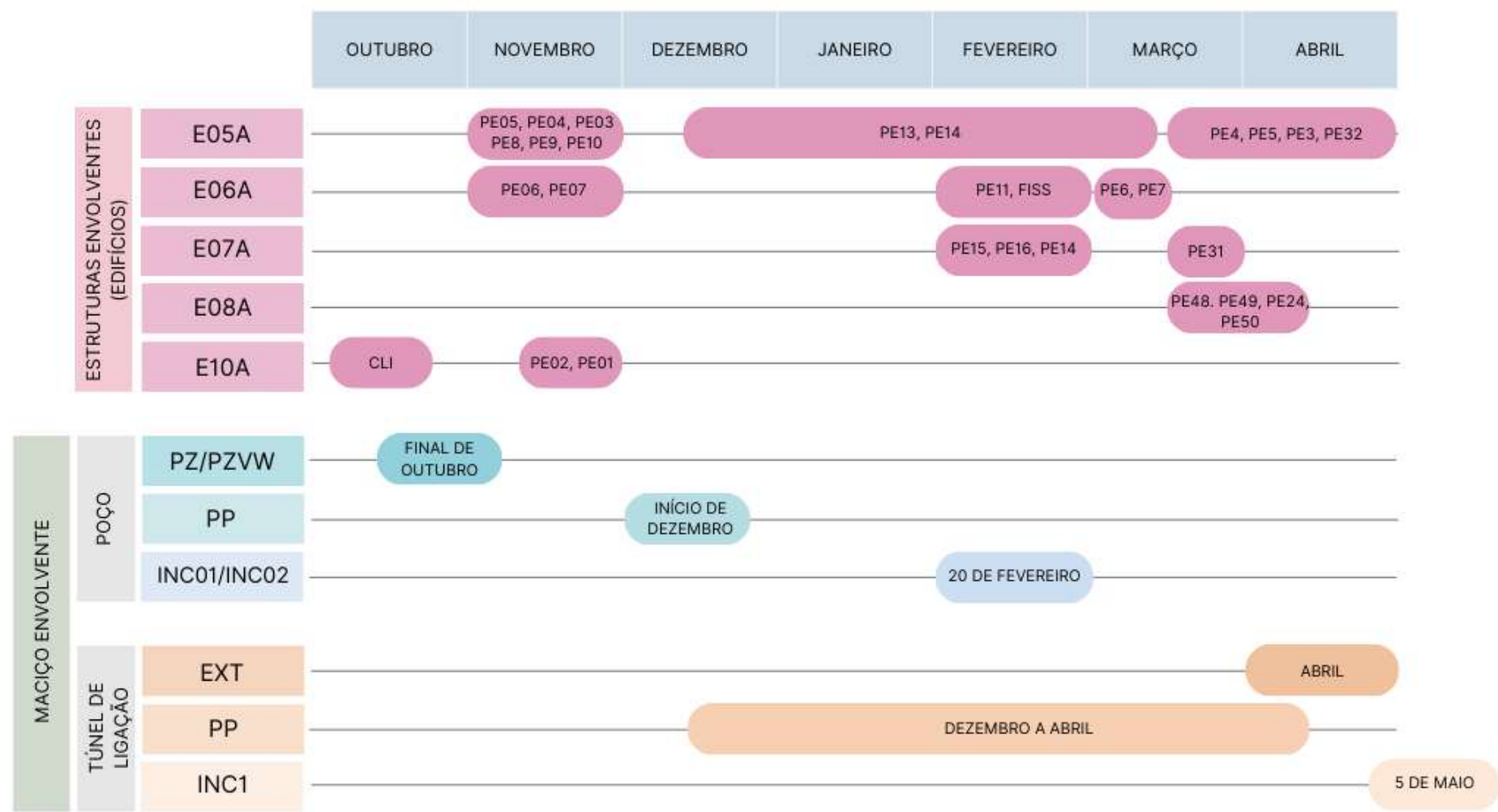
GSI	> 75	55-75	35-55	20-35	< 20
Qualidade do maciço rochoso	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito fraco

Média semanal da variação angular X, Y e Z do clinómetro no E05A.



Cronograma de Instalação de Dispositivos de Instrumentação.

CRONOGRAMA 2024/2025
INICIAÇÃO DE LEITURAS



Comparação de Limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação dos edifícios.

DISPOSITIVO DE INSTRUMENTAÇÃO	EDIFÍCIOS		LIMITES APLICADOS EM OBRA		LIMITES DEFINIDOS EM PROJETO	
			ALERTA	ALARME	ALERTA	ALARME
PRISMAS DE EDIFÍCIOS (PE)	E05A/160		46	49	1	2
	E06A		6,7*	8,7*	-	-
	E07A/144_148		50	53	60	75
	E08A/459_469		4	6	3	3
	E10A/40_168		11	14	3	4
CLINÓMETROS (CLI)	E07A		2	2,5	1/3000	1/2500
	E08A		0,33	0,4		
	E10A		0,33	0,4		
SISMÓGRAFO (SIS)	E10A	Velocidade X, Y, Z e C	6	-1 e 12	NP 2074: 2015	NP 2074: 2015

Comparação de limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação dos prismas de contenção e respectivas cordas.

DISPOSITIVO DE INSTRUMENTAÇÃO		LIMITES APLICADOS EM OBRA		LIMITES DEFINIDOS EM PROJETO	
		ALARME	ALERTA	ALARME	ALERTA
POÇO					
PRISMAS DE CONTENÇÃO (PC)		21	25,5	18-21	22-25,5
CORDAS		18	26	-	-
TÚNEL					
PRISMAS DE CONTENÇÃO (PC)	(0+003); (0+014); (0+023)	5	7	1	2
	(0+033)	20	30	-	-
CORDAS		18	21	-	-

Comparação de limites de alerta e alarme dos dispositivos de instrumentação do maciço.

DISPOSITIVO DE INSTRUMENTAÇÃO		LIMITES APLICADOS EM OBRA		LIMITES DEFINIDOS EM PROJETO	
		ALARME	ALERTA	ALARME	ALERTA
POÇO					
PRISMAS DE PAVIMENTO (PP)		21	25,5	-	-
INCLINÓMETRO (INC)		18	26	5	7
TÚNEL					
PRISMAS DE PAVIMENTO (PP)	(0+003); (0+014); (0+023)	5	7	1-3	2-4
	(0+033)	20	30	-	-
EXTENSÓMETRO (EXT)		73	77	1-6	2-7
INCLINÓMETRO (INC)		5	7	5	7

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Eu, **Daniela Sofia Ribeiro Canelhas**, N.º CC: 15740499,

Declaro ter conduzido e desenvolvido este trabalho académico com integridade e ética. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à elaboração da dissertação/projeto/estágio.

Declaro ainda que pontualmente recorri a ferramentas de inteligência artificial (IA) — texto, imagem, vídeo ou outro formato — apenas para fins académicos de pesquisa avançada de tópico específico e ainda fiz devida citação deste recurso sem colocar em causa os direitos de autor ou uso indevido de informações ou falsificação de conteúdos.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

ISEP, Porto, 28 de setembro de 2025

Daniela Sofia Ribeiro Canelhas