



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Instrumentação geotécnica manual *versus* automatizada: aplicação na construção de um Túnel na Linha Circular da Metro do Porto

Wilma Elisa Vânia Quiba



isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto

P. PORTO

2022

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Instrumentação geotécnica manual *versus* automatizada:
aplicação na construção de um Túnel na Linha Circular da Metro
do Porto**

*Manual versus automated geotechnical instrumentation: application in the
construction of a Tunnel on the Metro do Porto's Circular Line*

Wilma Elisa Vânia Quiba

1200098

*Estágio apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para
cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em
Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Doutor
António Agostinho Martins Mendonça, Professor Adjunto Convidado no
Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé
Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

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

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

Doutora Maria Isabel Gonçalves Fernandes
Professora Auxiliar com Agregação, Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

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

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, por **Wilma Elisa Vânia Quiba**, em 15 de Novembro de 2022 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **16 (dezassexis) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Dedico esta Dissertação.

Aos meus entes que partiram para a eternidade...

Ao meu Pai *Venâncio Quiba*, que sempre me incentivou a ter o gosto pelos estudos.

A minha Avó *Elisa Jina* (101 anos), que dedicou sua vida ao serviço e obra do Senhor ensinando o amor, união, perdão e partilha aos seus filhos, netos e bisnetos, e a mim em particular, para que eu pudesse aprender os melhores pilares de/e para a vida através da palavra.

Ao meu Avô *Rafael Quiba*, que com a sua boa disposição transmitiu sempre a todos os seus netos, ele é um exemplo de resistência, liderança e de consistência.

A todas as mulheres Moçambicanas que por vários motivos vêem os seus sonhos travados, mas são elas que sustentam famílias com todo o seu suor, e erguem toda uma sociedade.

As crianças e jovens africanos em condição de vulnerabilidade, e que sonham com uma vida e futuro melhores.

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

Ao nosso Xikwembo xa mathimba (Deus todo-poderoso), em 'Quem estão escondidos todos os tesouros da sabedoria e da ciência' (Colossenses 2:3) e a Quem sou e serei eternamente grata pelas inúmeras bênçãos que Ele me tem proporcionado. Para mim, todas estas experiências e in experiências da vida, não teriam sentido se não fossem caminhando com Ele, pois Ele nunca me abandonou e me mostrou o quão posso ser melhor e capaz de conquistar tudo aquilo que almejo.

Deixo também aqui um grande *Kanimambo* para todos os profissionais e académicos envolvidos para que esta dissertação fosse possível, nomeadamente ao orientador Doutor Agostinho Mendonça (ISEP) por ter aceitado guiarme e pelos ensinamentos, e a supervisora Dra. Paula Carminé (Ferrovia|ACA) pela paciência e integração na esfera profissional, ambos auxiliaram-me para que este trabalho fosse possível, e lançaram a semente para explorar e desenvolver o mundo da monitorização geotécnica.

À Direção do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP pelo apoio dado em momentos delicados do curso, em particular ao Professor Helder I. Chaminé que me acolheu no curso de mestrado desde o primeiro momento e, ainda, deu dicas para este trabalho. Minha gratidão também à Doutora Elisabete Esteves (ISEP) por ter acreditado em mim, e à Doutora Liliana Freitas (LABCARGA|ISEP) por ter ajudado na revisão da formatação deste trabalho.

À Ferrovia|ACA pela oportunidade de Estágio e por ter confiado que pudesse fazê-lo em tão pouco tempo, e nesse sentido, pude aprender muito sobre a geotecnia em contexto laboral e prático, como também realizar um desejo muito distante de ser possível, que é o de acompanhar a construção de obras subterrâneas.

Agradeço também aos demais colegas desta experiência de estágio na Ferrovia|ACA que contribuíram genuinamente com materiais, dicas e encorajamento, são eles o Eng^o José António, Eng^o Eduardo Matos, Eng^a Sandra Rocha, Renata Santos e João Loureiro.

Aos Eng^o Luís Rodrigues da TMH Instrumentation e Eng^o André Silva da Measurand-Brasil, agradeço pelos seus valiosos contributos.

Aos meus professores do Departamento de Geologia da Universidade Eduardo Mondlane, nomeadamente o Dr. Gerardo Orosco, Dr. Estevão Sumburane e o Dr. Daúd Jamal que depositaram voto de confiança e que incentivaram a ter gosto pela Geologia e explorar além-fronteiras.

Aos meus professores da licenciatura em geologia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra que torceram para o meu progresso e sucesso, e que sempre foram pessoas generosas e calorosas na minha trajetória académica no ensino superior, especialmente aos Professores Pedro Proença Cunha, Pedro Santarém de Andrade, Maria Manuela da Vinha, Maria Helena Henriques, Pedro Callapez, Eduardo Ivo Alves e Lídia Gil Catarino e Rui Pena dos Reis.

Minha enorme gratidão ao Colégio Kitabu que dentro dos seus valores, teve sempre o compromisso de moldar mentes brilhantes, que com certeza trouxe comigo todos os valiosos ensinamentos nestas trajetórias académicas.

Ao Eng^o Ricardo Jorge da Filstone, agradeço pelo apoio e humanidade no meu percurso académico.

Koxukuru à todos os meus familiares que sempre estiveram comigo em pensamentos, palavras, preces e ações. Começo por agradecer a minha mãe Lily Nomboro, ela é uma referência em várias esferas da minha vida e uma amiga muito especial que sempre se dedicou para que eu e meu irmão tivéssemos acesso à educação e a todas as

ferramentas essenciais para o progresso e sucesso, e de seguida ao meu irmão Sérgio Quiba que sempre se prontificou em ajudar-me.

Os meus tios são também uma peça fundamental para eu ser quem sou, e por isso *Ndilambwualela*: a minha tia Valentina Emília por ter cuidado de mim desde que me conheço como gente e por nunca ter medido esforços para apoiar incondicionalmente e ensinar os valores da vida. À minha tia e madrinha Aurora Nomboro, qualquer agradecimento é tão pouco mas sou grata e reconheço tudo aquilo que tem feito por mim e sem nada em troca, para além de ser a minha sempre Médica e um exemplo de resistência.

A minha tia Zita Nomboro, sempre com uma palavra de amor e alegria no coração, eu agradeço a ela pois sempre acreditou em mim, para além de ser a minha sempre Enfermeira, desde o meu primeiro dia de vida. A minha tia Argentina Nomboro, por ser uma pessoa cuidadosa e acolhedora para comigo desde os tempos que me levava à creche até hoje tendo atenção especial para comigo em todos os momentos aqui em Portugal. Ao meu tio Benjamim Bene por acreditar no meu potencial. A minha tia Georgina Nomboro por ser uma pessoa que teve a preocupação em saber como estou e sempre com uma palavra de afeto e encorajamento. Ao meu tio Arnaldo Nomboro Jr., por ter sido uma das pessoas que me incentivou a continuar com os estudos, e sempre se disponibilizou em ajudar.

Nsakidila aos meus primos que também me incentivam na esfera académica e por serem tão presentes nas várias esferas da vida: Elisa Chalé, Marisa Nomboro, Dalila Bene, Marília Bene, Elisa Januário, Benjamim e Arnaldo Bene.

Agradeço às minhas sobrinhas que são as minhas flores, nomeadamente Yslla, Mya, Amy e Tânia por serem atenciosas comigo e ensinarem sobre vulnerabilidade, amor e cuidado sempre.

Ao meu namorado André Seth, por ter sido uma pessoa muito importante neste trajeto académico e as minhas amigas por serem tão importantes nos vários momentos de minha vida.

Deixei estes agradecimentos para o fim pois não sabia que palavras usar para expressar a minha tamanha gratidão, mas tudo isto mostra que Deus tem colocado as melhores pessoas na minha vida e me abençoa por meio delas.

Somos o conjunto das pessoas que caminham connosco, mas somos também o reflexo de nossos sacrifícios e renúncias. Ter saído para estudar no estrangeiro, mais do que ser uma escolha inocente de uma adolescente *afrikana*, é nascer de novo e descobrir suas próprias forças e fraquezas, é maximizar suas próprias qualidades e reconhecer os próprios defeitos, é caminhar sozinha, mas saber que um dia tudo irá valer a pena. Por fim, é a realização do sonho de um conjunto de pessoas da minha comunidade que infelizmente ainda não tiveram a possibilidade de realizar, mas que me foi possível por meio das oportunidades disponíveis, e acima de tudo motivado pelos exemplos e referências que me são próximas, e por isso serei eternamente grata por estas dádivas.

Tudo o que conquistei até aqui mais do que ser meu, é também daqueles que foram e daqueles que virão, é daqueles que não puderam vencer suas lutas, daqueles que lutaram por mim, e daqueles que Deus me capacitar para lutar por eles.

Este é mais um troço no meio de uma longa caminhada que temos pela frente, não nos esqueçamos de onde viemos, da nossa história, mas principalmente da nossa missão como povo, devemos continuar avante porque o legado deixado foi o de lutas ou de vitórias.

Até aqui O Senhor nos ajudou (I Samuel 7:12), até aqui caminhamos vencendo.

Ubuntu !

Palavras-chave

Monitorização geotécnica; Instrumentação; Automatização; Túnel; Zona envolvente; Ramal-1; Metro do Porto; Linha Circular

Resumo

Ao longo dos tempos, as obras de engenharia vem exigindo a implementação de novas formas de garantir o seu tempo de vida, quer pela forma tradicional recorrendo a cálculos, quer também pelo recurso a instrumentação que vem mostrando ser uma ferramenta com resultados eficazes, permitindo desta forma a previsão e adoção de medidas de gestão de possíveis riscos. Os túneis sendo obras geotécnicas de grande complexidade que trazem benefício no desenvolvimento a nível material, como aos métodos de dimensionamento e construção, e de importância extrema nas grandes cidades, tem contribuído para o desenvolvimento de tecnologias para o seu melhor desempenho. O projeto mencionado, tem como objetivo de melhorar o acesso às áreas centrais da cidade do Porto na zona costeira do Noroeste de Portugal, que se caracteriza como uma cidade que engloba zonas com importantes componentes empresariais, residenciais e de saúde, captando muitos passageiros ao transporte individual. Este trabalho enquadra-se no âmbito das obras de escavação para a conceção do projeto da Linha Circular do Metro do Porto que é uma rota de transporte público que faz o trajeto que se aproxima de uma curva fechada. Pela conceção pretendida, desenvolve-se totalmente em túnel e via dupla, com uma extensão total é de 3 km, dos quais 2,45 km são operacionais, com 4 estações subterrâneas em que 2 delas serão adjacentes às já existentes, nomeadamente à estação de São Bento e a estação da Casa da Música, assegurando assim a ligação entre São Bento e a Rotunda da Boavista. Neste contexto, o Ramal-1, compreende a extensão de 340 m e assegura a ligação entre as Linhas existente A,B,C,E e F do Metro do Porto. Para sustento desta dissertação, vai ser abordada a monitorização fazendo uma comparação entre o método tradicional da monitorização manual e mais recente monitorização automatizada, sendo esta última uma ferramenta com ainda pouca aplicação em Portugal, prevê-se abordar suas vantagens e desvantagens e sua eficácia para túneis. Esta comparação vai ter como base: o enquadramento da dissertação nas atividades da empresa Ferrovia-ACA-Linha Circular A.C.E., monitorização geotécnica de túneis, contexto da obra, plano de instrumentação, e os registos de leituras dos dois métodos de observação.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Geotechnical monitoring; Instrumentation; Automation; Tunnel; Surround area; Ramal-1; Metro do Porto; Circular Line

Abstract

Over time, engineering works have required the implementation of new ways of ensuring their lifetime, either by the traditional way using calculations or using instrumentation which has proved to be a tool with effective results, thus allowing the prediction and establishment of management measures of possible risks. Furthermore, since tunnels are high-quality geotechnical works, which bring benefits to the development at the material level, as well as to the design and construction methods, and of extreme importance in large cities, they have contributed to the development of technologies for their better performance. This project aims to improve access to the central areas of Porto city in the coastal area of Northwest Portugal, which is characterized as a city that includes areas with important business, residential and health components, attracting many passengers to the individual transport. This work is part of the excavation works for the design of the Porto Metro's Circular Line project, which is a public transport route that describes a path approaching a circle or a closed curve. By the intended conception, it develops totally in the tunnel and double track, with a total extension is 3 km, of which 2,45 km are operational, with 4 underground stations, of which 2 of them will be adjacent to the existing ones, namely São Bento and Casa da Música stations, thus assuring the connection between São Bento and Rotunda da Boa Vista. In this context, the Ramal-1 covers a length of 341 meters and provides the connection between the existing Lines A, B, C, E and F of Metro do Porto. To support this dissertation, monitoring will be addressed, comparing manual and automated monitoring since the latter is a tool with little recurrence, and it is intended to address its advantages and disadvantages and its effectiveness for tunnels. This comparison will be based on: the framework of the thesis in the activities of the company Ferrovial-ACA-Linha Circular A.C.E., the geotechnical monitoring of tunnels, the context of the work, the instrumentation plan, and the records of manual and automated monitoring.

(página propositadamente em branco)

Índice

1.	Introdução	3
1.1.	Enquadramento do estágio no trabalho	4
1.2.	Objetivos gerais	4
1.3.	Objetivos específicos	5
2.	Monitorização geotécnica	9
2.1.	Plano de instrumentação	12
2.2.	Equipamentos e grandezas a avaliar na monitorização geotécnica de túneis	13
	Deformações verticais e horizontais no terreno	14
	Deformações verticais e horizontais – edifícios	17
	Controle de fissuras – edifícios e maciço	20
	Tensões - estrutura	21
	Água subterrânea, pressão hidrostática e intersticial - maciço	23
	Medição da temperatura - estrutura	25
2.3.	Fatores de influência na escolha do tipo de instrumentação	26
2.4.	Casos tipo de soluções de monitorização	27
	Projeto de Reabilitação Geral e Reforço Estrutural das Galerias Central e Sul do Túnel de Águas Santas	27
	Observação geotécnica durante a fase de construção da Cave do Edifício Platinum na Cidade de Maputo (Moçambique) - abordado na tese para obtenção de grau de Izel Issufo	28
2.5.	Outras formas de implementação da monitorização geotécnica	29
2.6.	Avaliação e gestão de risco na construção de túneis	31
3.	Contexto de obra: descrição genérica da empreitada e do troço	35
3.1.	Enquadramento Geográfico, Tectónico e Geomorfológico do Porto	35
3.2.	Enquadramento Geográfico, Tectónico e Geomorfológico do Ramal-1	35
3.3.	Enquadramento geológico- geotécnico geral	36
3.4.	Enquadramento geológico- geotécnico do Ramal-1	39
3.5.	Configuração e Geometria ao longo do túnel do Ramal-1	39
3.6.	Condicionantes do túnel do Ramal 1	42
4.	Plano de Instrumentação	47
4.1.	Deformações no maciço	48
	No interior do maciço em profundidade - Inclínómetros	48
	No interior do maciço em profundidade – Extensómetro	49
	Na superfície - Marcas Topográficas	50
4.2.	Medição do Nível Freático	51
	No maciço - Indicadores de nível de água (INA)	51
4.3.	Deformações nas edificações/estruturas	52
	Edifícios na envolvente - Pinos de Nivelamento	52
	Edifícios na zona envolvente - Alvos ou Prismas Refletores	53
	No maciço à superfície - Alvos/ prisma refletores de via	54
4.4.	Deformações na obra	55
	Na obra em construção – alvos/prisma refletores-convergências	55
4.5.	Equipamentos de leitura	56
	Estações totais robotizadas – Equipamentos de leitura topográfica (assentamentos à superfície e convergências no túnel)	56
	Unidade de aquisição (Data logger) – Recolha de dados do extensómetro	58
	Medidor do nível de água - Equipamentos de leitura do nível de água	60
	Sonda inclinométrica – Equipamento de leitura do ângulo nos inclinómetros	60
4.6.	Discussão das causas de dupla leitura Manual e Automatizada	61
	Leitura semi-automatizada	62

4.7.	Procedimentos de instalação dos dispositivos.....	62
	INA – Indicador de Nível de Água.....	63
	Inclinómetro.....	64
	Marca de superfície.....	65
	Pinos de nivelamento.....	66
	Extensómetro.....	67
	Alvos/prisma refletor.....	68
	Prismas de via.....	69
	Condicionalismos na instalação da instrumentação.....	70
4.8.	Plano e procedimentos de leitura.....	70
	Prismas refletores de via e Pontos Centaure.....	71
	Marcas de superfície.....	72
	Inclinómetros.....	73
	Indicador de nível de água.....	74
	Extensómetros de vara monoponto.....	75
	Pinos de nivelamento.....	76
	Alvos/prisma refletores.....	76
	Prismas de convergência.....	76
5.	Registos da monitorização geotécnica ao longo do Ramal-1.....	81
5.1.	Tratamento do registo de dados resultantes das leituras manuais e automatizadas.....	82
	Inclinómetros.....	83
	Indicador de Nível de Água.....	84
	Extensómetro de vara mono-ponto.....	87
	Marcas de superfície.....	91
	Pinos de nivelamento.....	94
	Alvo/prisma refletor (edifícios).....	95
	Alvo/prisma refletor (Linha de Metro existente).....	101
	Alvo/prisma refletor (convergências).....	103
5.2.	Comparação entre as leituras manuais e automatizadas.....	109
	Marcas de superfície e Marcas centaure.....	109
	Pinos de nivelamento vs. Alvos/prismas refletores.....	117
5.3.	Gestão e Avaliação de risco concebido para o Ramal-1.....	120
6.	Conclusões.....	127
7.	Referências Bibliográficas.....	135

Índice de figuras

Figura 1. Fases da monitorização geotécnica.....	9
Figura 2 - Esquema da instrumentação na monitorização de túneis – (Adaptado: Vallejo et al., 2002)	26
Figura 3 - Corte transversal da instrumentação colocada: secção principal e secundária. (Extraído de: Brisa Concessão, Brisa Construção de Infraestruturas, COBA Portugal – Corte transversal – Galeria Central/Plano de Monitorização,2021)	28
Figura 4 - Planta de Instrumentação. (Fonte: Issufo, 2016).....	29
Figura 5 - Esquema do trajeto dos Ramais 1 e 2, sobreposta a uma imagem capturada por aeronave não tripulada (ver legenda Anexo I).....	36
Figura 6 - Perfil típico de alteração de um maciço rochoso de natureza granítica com zona superficial alterada e com solo residual. (Little, 1969).....	38
Figura 7 - Carta de zonamento geotécnico do Porto na escala 1:10000 – (Extraído de Câmara Municipal do Porto – In: COBA, 2003)	38
Figura 8 - Excerto do perfil longitudinal geotécnico do Ramal 1 (Ver Anexo I), Escala: H – 1:1000, V – 1:200. (Fonte: SENER, CJC Engenharia e Projetos, NSE Engineering, Memória Descritiva - Volume 4, 2019)	39
Figura 9 - Injeção e recolha de veículos no Ramal-1. (Extraído de: CJC-Projetos de Engenharia, SENER, NSEENGINEERING, 2019)	40
Figura 10 - Identificação das secções ao longo do troço em túnel na escala 1:500. (Extraído de: CJC-Projetos de Engenharia, SENER, NSEENGINEERING – Túnel de via Ramal-1, Compartimentação - Planta e Perfil Longitudinal Ramal 1, 2019)	41
Figura 11 - Pormenor de secção em túnel de via simples tipo R, com revestimento definitivo – (Extraído de: CJC-Projetos de Engenharia, SENER, NSEENGINEERING - Túnel de via simples, tipo "R" - Secções, pormenores e quantidades, 2019).....	41
Figura 12 - Fotografias capturadas por equipamento aéreo não tripulado, com acompanhamento da autora na zona envolvente dos fatores operacionais para o Ramal-1. a) Localização do Términos. b) Local de conexão entre o Ramal-1 e as linhas A, B, C, E e F.	43
Figura 13 - Fotografias capturadas por equipamento aéreo não tripulado, com acompanhamento da autora na zona envolvente dos fatores de ordenamento do território e patrimonial para o Ramal-1. c) Viaduto Domingos Sequeira. d) Edifício Mercadona.....	44
Figura 14 - Inclínómetro: a) Pormenor do inclinómetro. (Fonte: Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda); b) calha inclinométrica em tubo PVC (Fonte: www.sisgeo.com); c) Ilustração da secção da calha inclinométrica (A-diâmetro externo 80.5mm, B-diâmetro interno 76.6mm). (Fonte: SIXENSE, 2021. Dados técnicos – Calha inclinométrica. SIXENSE/Ferrovia ACA. (Relatório inédito).....	49
Figura 15 - a) Pormenor dos extensómetros. (Fonte: Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda; SIXENSE, 2021). b) Ilustração detalhada do extensómetro monoponto. (Fonte: www.sisgeo.com/products/extensometers/item/mpbx-multipoint-borehole-extensometers.html).....	50
Figura 16 - a) Pormenor da marca de superfície. (Fonte: Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda; SIXENSE, 2021). b) Marca de superfície –ilustração. (Fonte: Dados técnicos – Marcas de superfície. SIXENSE/Ferrovia ACA, 2021)	51
Figura 17 - a) Pormenor de um INA. (Fonte: Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda). b) Tubo piezométrico PVC. (Fonte: www.plafondplast.com/es/tubos-de-pvc-rra-piezometros/).....	52
Figura 18 - a) Pormenor de um pino de nivelamento. (Fonte: Dados técnicos – Marcas de superfície. SIXENSE/Ferrovia ACA, 2021). Manual de procedimento de instalação e medição. b) Imagem do	

pino de nivelamento (Fonte: www.metbusquet.com). c) Fotografia capturada pela autora de pino de nivelamento cravado na fachada de um edifício, na Avenida de França)	53
Figura 19 - a) e c) Ilustração dos alvos/prisma refletor. (Fonte: www.horizon.sg e www.survey.crkennedy.com.au) b) e d) Fotografias capturadas pela autora de alvos/prismas refletores topográficos (parafusados e colados) em edifícios da zona circundante	54
Figura 20 - a) e b) Ilustração de um prisma de via em duas perspetivas. Fonte: (www.mesures-systemes.fr). c) Fotografia capturada pela autora de prisma de via instalado no pavimento de edifício na zona da envolvente do Ramal-1)	55
Figura 21 - Fotografias capturas pela autora da disposição dos alvos/prismas numa secção de convergência. a) 2 prismas colocados na abóbada do túnel numa secção de alargamento ao PK 0+155, b) 2 prismas colocados no hasteal esquerdo do túnel do Ramal-1, PK 0+295 e c) 1 prisma colocado no hasteal direito do túnel do Ramal-1, PK 0+270	55
Figura 22 - Malha dos pontos Centaure (SIXENSE, 2021)	57
Figura 23 - Ilustração da rede de Estações robotizadas e pontos de referência. (Adaptado de SIXENSE, 2021)	57
Figura 24 - Fotografias capturadas pela autora da disposição de uma estação total robotizada. a) localizada em obra no Hospital de Santo António. b) localizada no interior da trincheira coberta/túnel. c) em meio urbano da zona envolvente na Rua General Norton de Matos. d) Pormenor da estação total robotizada: 1-Cyclop, 2-pilar com isolamento metálico, 3- fundação em sapata.	58
Figura 25 - Processo de recolha de dados: a) Unidade de aquisição (<i>datalogger</i>). (Fonte: www.sisgeo.com). c) Porta de entrada de dados (<i>Gateway</i>). (Fonte: www.rstinstruments.com). b) e d) Esquematização da recolha de dados no datalogger, e gestão dos dispositivos na Gateway, no âmbito da monitorização automatizada. (Fonte: www.worldsensing.com/pt).....	60
Figura 26 - Medidor de nível de água. (Fonte: www.geosense.co.uk).....	60
Figura 27 - Sonda inclinométrica. (Fonte: www.geokon.com/GK-604D).....	61
Figura 28 - Fotografias capturadas pela autora do processo de instalação do INA. a) Bolas de bentonite em <i>pellets</i> . b) Colocacao do Tubo liso, em tramos de 3m com tela geotêxtil. c) Tubo com tampão de protecção superior. d) Tampa de protecção do INA ao longo das vias pedonais. e) cimentação e fixação do tubo do INA. f) tampa de protecção do tubo do INA.	64
Figura 29 - Fotografias capturadas pela autora do processo de instalação do inclinómetro. a) Transporte através de grua móvel da armadura com o inclinómetro acoplado. b) colocação da armadura no furo. c) calha já instalada em toda a extensão da armadura, e por cortar d) Fim do processo de colocação da calha cortada (fotografia superior: sem tampa, fotografia inferior: com tampa de fecho do topo).....	65
Figura 30 - Fotografias capturadas pela autora do processo de instalação da marca de superfície. a) abertura de poço de reconhecimento com martelo pneumático. b) vara de aço com 0.65m. c) fixação da extremidade inferior da vara de aço no poço. d) fixação da vara de aço com aro metálico no maciço. e) cimentação. f) colocação da tampa de protecção da marca de superfície.....	66
Figura 31 - Fotografias capturadas pela autora do processo de instalação do extensómetro de leitura automatizada. a) Tubos extensométricos. b) Dispositivo a ser colocado em vara extensométrica e no furo executado. c) colocação de caixa de protecção do extensómetro. d) colocação de cimento para fixação do dispositivo.....	68
Figura 32 - Fotografias capturadas pela autora do procedimento de instalação dos alvos/prisma na estação da Galiza. a) Perfuração no local de instalação. b) fixação do perno. c) fixação da componente com o feixe. d) dispositivo já instalado e disposto para a estação total robotizada..	69
Figura 33 - Fotografias capturadas pela autora do procedimento de instalação de um prisma de via. a) Fixação com recurso à parafusos (dispositivo na fachada ao longo da Rua das Flores. b) Dispositivo disposto à estação total em fachada nas proximidades do Ramal-1	69
Figura 34 - Fotografias capturadas pela autora de alvos/prisma refletor instalados com diferentes disposições e comprimentos, para alcance à estação total. a) dispositivo instalado no hasteal esquerdo do túnel do Ramal-1. b) dispositivo instalado em edifício na Rua das Flores. c) dispositivo	

instalado na cortina de estacas da estação da Galiza. d) dispositivos instalados em série por baixo do viaduto Domingos Siqueira	70
Figura 35 - Frequência de leituras para dispositivos instalados no maciço. (Adaptado de Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda; SIXENSE, 2021).....	71
Figura 36 - Frequência de leituras para dispositivos instalados nos edifícios. (Adaptado de Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda; SIXENSE, 2021).....	71
Figura 37 - Fotografias capturadas pela autora do processo de leitura e aquisição de dados das marcas de superfície. a) Nível - equipamento de leitura e de aquisição dos dados. b) régua ou mira invar posicionada por cima do perno do nivelamento. c) equipa da topografia no processo de leitura com acompanhamento de agente policial.....	72
Figura 38 - Fotografias capturadas pela autora no processo de leituras em inclinómetros. a) Dispositivos de registo dos dados. b) Torpedo – dispositivo de leitura.....	74
Figura 39 - Fotografias capturadas pela autora do procedimento de leitura de um INA. a) Posicionamento do equipamento de leitura. b) Leitura do nível de água.....	75
Figura 40 - Planta sem escala, com identificação dos prismas (rosa) e inclinómetro (cor de laranja), na zona de influência do Túnel do Ramal-1 e da Trincheira coberta. Extraído de: FERROVIAL/ACA – instrumentação do maciço e edifícios – Trincheira coberta, 2021.	81
Figura 41 - Planta sem escala, com identificação dos prismas reflexivos (rosa), marcas de superfície (amarelo), extensómetros (verde), nível de água (azul), na zona de influência do Túnel do Ramal-1. Extraído de: FERROVIAL/ACA – instrumentação do maciço e edifícios – Rama-1, 2021.....	81
Figura 42 - Secção tipo C. (Extraído de: FERROVIAL/ACA – instrumentação/secções, 2021).....	82
Figura 43 - Fotografia capturada pela autora da localização do Inclinómetro no PK 0+330, no maciço exterior à trincheira coberta, na vizinhança do emboquilhamento do túnel.....	83
Figura 44 - Fotografia capturada pela autora da localização do INA ao PK 0+173, no edifício Mercadona	85
Figura 45 - Fotografia capturada pela autora da localização do INA no PK 0+074, Rua Vieira Portuense	86
Figura 46 - Fotografia capturada pela autora da localização do extensómetro no PK 0+286, na Rua General Norton de Matos	88
Figura 47 - Fotografia capturada pela autora da localização do extensómetro ao PK 0+240 (zona de alargamento do túnel), Parque de estacionamento do edifício Mercadona. PK 0+247 (inacessível à data de recolha de informação).....	89
Figura 48 - Fotografia capturada pela autora da localização do extensómetro ao PK 0+154	90
Figura 49 - Marcas de superfície ao PK 0+240	92
Figura 50 - Fotografias capturadas pela autora do edifício X32 na zona envolvente do Ramal-1, com os pinos de nivelamento incrustados na fachada.....	94
Figura 51 - Pilar esquerdo e encontro (Enc.) direito respetivamente, do Viaduto da rua D. Sequeira e as vigas	95
Figura 52 - Fotografia capturada pela autora da localização do Edifício Mercadona e as respetivas secções: secção 1 (amarelo) , secção 2 (azul)	98
Figura 53 - Fotografia capturada por veículo aéreo não tripulado, com acompanhamento da autora e fotografia capturada pela autora, respetivamente, da localização do edifício 8 na zona envolvente do túnel do Ramal-1.....	100
Figura 54 - Fotografia capturada pela autora de alvos/prisma de via numa secção exemplificada ao PK 0+346 (PK 0+319 inacessível)	101
Figura 55 - Cartografia geotécnica da frente, ao PK0+327. Fonte: FERROVIAL/ACA, Cartografia geológico-geotécnica, 2022	104
Figura 56 - Deformações na secção de convergência ao PK+327 (prismas P1-2 e P1-3).....	104
Figura 57 - Cartografia geotécnica da frente, ao PK0+310. Fonte: FERROVIAL/ACA, Cartografia geológico-geotécnica, 2022	105
Figura 58 - Cartografia da frente, no ponto PK0+240. Fonte: FERROVIAL/ACA, Cartografia geológico-geotécnica, 2022	107

Figura 59 - Fotografia capturada pela autora da localização da Marca de Superfície ao PK 0+327	110
Figura 60 - Fotografia capturada pela autora da localização da Marca de Superfície ao PK 0+310	112
Figura 61 - Fotografia capturada pela autora da localização da Marca de Superfície ao PK 0+269	114
Figura 62 - Fotografia capturada pela autora da localização da Marca de Superfície ao PK 0+247	115
Figura 63 - Fotografia capturada pela autora da localização da Marca de Superfície e Prisma de via ao PK 0+154	116
Figura 64 - Fotografias capturada pela autora do Edifício X31, na zona envolvente. a) Pormenor do edifício. b) Prismas refletores. c) Posição dos pinos de nivelamento na fachada do edifício.....	118
Figura 65 - Fotografias capturadas por veículo aéreo não tripulado, com acompanhamento da autora, das edificações da zona envolvente do Ramal-1 com a identificação das anomalias.....	123

Índice de quadros

Quadro 1 - Ilustração dos vários tipos de inclinómetro e o coletor de dados	14
Quadro 2 - Ilustração dos vários tipos de extensómetro.....	16
Quadro 3 - Ilustração da vara de aço fabricada, para uma marca de superfície	17
Quadro 4 – Ilustração do sistema de nivelamento	17
Quadro 5 – Ilustração de alvo reflexivo	18
Quadro 6 - Ilustração dos vários tipos de clinómetro	19
Quadro 7 - Ilustração de sismógrafo	20
Quadro 8 - Ilustração dos diversos tipos de fissurómetro	20
Quadro 9 - Ilustração das várias células de carga hidráulica	22
Quadro 10 - Ilustração dos vários tipos de células de pressão total.....	23
Quadro 11 - Ilustração dos vários tipos de piezómetro	24
Quadro 12 - Ilustração de termómetro.....	25
Quadro 13 - Zonamento geotécnico adotado para o projeto da Linha Circular do Metro do Porto. (Fonte:SENER, CJC Engenharia e Projetos, NSE Engineering – Memória Descritiva – Volume 6, 2019)	37
Quadro 14 - Frequência de leitura dos prismas de via e pontos centaure. (Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA- procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, 2022)	72
Quadro 15 - Frequência de leitura das marcas de superfície. Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA- procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, (2022).	73
Quadro 16 - Frequência de leitura dos INA. (Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA- procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, 2022).....	75
Quadro 17 - Frequência de leitura dos extensómetros. (Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA- procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, 2022).....	76
Quadro 18 - Frequência de leitura dos Pinos de nivelamento. (Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA- procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, 2022).....	76
Quadro 19 - Frequência de leitura dos prismas de convergência. Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA- procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, (2022).....	77
Quadro 20 - Formações atravessadas pelo inclinómetro ao PK 0+330.	83
Quadro 21 - Litologias atravessadas pelo INA, no ponto PK 0+173.....	85
Quadro 22 - Litologias atravessadas pelo INA no ponto PK 0+074.....	86
Quadro 23 - Formações atravessadas pelo Extensómetro ao PK 0+286	88
Quadro 24 - Formações atravessadas pelo extensómetro no PK 0+247.	89
Quadro 25 - Litologias atravessadas pelo extensómetro no ponto PK 0+154.....	90
Quadro 27 - Assentamentos e distorções associados à categoria de danos dos edifícios. (Adaptado de Memória descritiva, avaliação de riscos tomo-3, Metro do Porto)	121
Quadro 28 - Enquadramento das categorias e descrição de danos e medidas a serem tomadas. (Adaptado de Memória descritiva, avaliação de riscos tomo-3, Metro do Porto)	122
Quadro 29 - Critérios de avaliação da gravidade das anomalias. (Adaptado de Projeto De Execução Volume 21 – Levantamento Patrimonial e Avaliação de Riscos Tomo 2 - Edifícios Correntes e Especiais Memória Descritiva)	123
Quadro 30 - Estatística do Levantamento Patrimonial dos Edifícios da zona envolvente do Ramal 1. (Adaptado de Projeto De Execução Volume 21 – Levantamento Patrimonial e Avaliação de Riscos Tomo 2 - Edifícios Correntes e Especiais Memória Descritiva)	124

(página propositadamente em branco)

Índice de gráficos

Gráfico 1 - Variação da inclinação no ponto PK 0+330	84
Gráfico 2 - Leitura manual do nível de água no ponto PK 0+173, no parque de estacionamento do edifício Mercadona	85
Gráfico 3 - Leitura manual do nível de água no ponto PK 0+074.....	87
Gráfico 4 - Gráfico da tendência de assentamento do maciço ao PK 0+286	88
Gráfico 5 - Gráfico da tendência das deformações no PK 0+247.....	90
Gráfico 6 - Leitura automática do assentamento à profundidade ao PK 0+154.....	91
Gráfico 7 - Leitura manual do assentamento à superfície no ponto PK 0+240	93
Gráfico 8 - Tendência do assentamento ao longo do tempo ocorrente no Ed. X32, na zona envolvente do Ramal-1	94
Gráfico 9 - Deformações da secção A, aos PK 0+299 e PK 0+302 respetivamente.....	95
Gráfico 10 - Deformações da secção B, aos PK 0+303 e PK 0+300 respetivamente.....	96
Gráfico 11 - Deformações da secção C, aos PK 0+307 e PK 0+295 respetivamente.....	96
Gráfico 12 - Deformações da secção D, ao PK 0+310 e PK 0+293 respetivamente	97
Gráfico 13 - Tendência dos prismas na secção 1 do edifício Mercadona	98
Gráfico 14 - Leituras dos prismas na secção 2 do edifício Mercadona	99
Gráfico 15 - Tendência das deformações no edifício 8, entre os PK 0+205 e PK 0+162.....	100
Gráfico 16 - Tendência das deformações na secção de prismas instalados ao longo da via da linha de Metro existente, ao PK 0+319.....	101
Gráfico 17 - Deformações via Metro ao PK 0+319, entre os dias 19-21 de agosto	102
Gráfico 18 - Variação da temperatura entre os dias 19-21 de agosto. (Obtida através da estação robotizada)	103
Gráfico 19 - Deformações na secção de convergência ao PK+327 (prismas P2 e P3).....	105
Gráfico 20 - Deformações na secção de convergência ao PK+310 (prismas P1-2 e P1-3)	106
Gráfico 21 - Deformações na secção de convergência ao PK+310 (prismas P2 e P3).....	106
Gráfico 22 - Deformações na secção de convergência ao PK+240 (prismas P1 e P3).....	108
Gráfico 23 - Deformações na secção de convergência ao PK+240 (prismas P2 e P3).....	108
Gráfico 24 - Leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto 0+327.....	110
Gráfico 25 - Leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto 0+327, com os novos níveis de referência	111
Gráfico 26 - Histórico das leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto PK 0+310.....	112
Gráfico 27 - Histórico das leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto PK 0+310, com os novos níveis de referências.....	113
Gráfico 28 - Leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto PK 0+269.....	114
Gráfico 29 - Leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto PK 0+247.....	115
Gráfico 30 - Leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, ao PK 0+154	117
Gráfico 31 - Leituras manuais e automáticas do assentamento no edifício X31 da zona envolvente, no ponto PK 0+347	118
Gráfico 32 - Pormenor das leituras manuais e automáticas do assentamento no edifício X31 da zona envolvente, no ponto PK 0+347	119
Gráfico 33 - Leituras manuais e automáticas do assentamento no edifício X31 da zona envolvente, no ponto 0+341	119
Gráfico 34 - Pormenor das leituras manuais e automáticas do assentamento no edifício X31 da zona envolvente, no ponto 0+341	119

(página propositadamente em branco)

Índice de acrónimos ou abreviaturas

- ZOM – Zona de Ossa-Morena
- ZCI – Zona Centro-Ibérica
- PMO – Parque de Material e Oficina
- NATM – New Austriac Tunneling Method
- INA – Indicador de Nível de Água

(página propositadamente em branco)

Capítulo I

Introdução

(página propositadamente em branco)

1. Introdução

Ao longo dos tempos, a Humanidade vem experimentando formas de aproveitar a Terra face as diversas dinâmicas e demandas que vem sendo impostas, e uma delas tem sido as obras subterrâneas. Segundo Lane (2019) é provável que os primeiros túneis tenham sido executados por povos pré-históricos que pretendiam ampliar suas cavernas, mas a partir da Idade Média até ao presente uma vez que a abertura de túneis era limitada principalmente para mineração e engenharia militar, o próximo grande avanço foi o de responder às crescentes necessidades de transporte na Europa no século XVII (Moreira, 2006).

Partindo deste âmbito, as obras subterrâneas, são assim concebidas como o conjunto de tecnologias e sistemas, e podem ser de natureza diversa, compostas pelo terreno envolvente local e um suporte que garante a sua estabilidade.

Para este trabalho, o foco está direcionado nos túneis (e as deformações causadas pela sua construção), que são das estruturas mais antigas e ao longo do tempo tiveram uma evolução significativa, pois a sua finalidade consegue ser transversal no que tange aos recursos minerais como o caso dos túneis de exploração mineira, túneis de escoamento de água, como também é aplicável às vias de comunicação, como por exemplo: túneis ferroviários, túneis metropolitanos e túneis rodoviários.

Na fase de construção de túneis, estão em causa fenómenos de natureza física que implicam modificações como é o caso do alívio das tensões iniciais, que resultam na modificação do estado de tensão do maciço na zona envolvente, causados pela abertura das frentes do túnel e dos deslocamentos, tornando o maciço debilitado em determinadas zonas no decurso das obras.

O método observacional, usado com tanto sucesso por Terzaghi (Rocha, 2013) na mecânica dos solos aplicada, muitas vezes permite máxima economia e garantia de segurança, desde que o projeto tenha a possibilidade de serem feitas modificações à medida que a construção avança.

O método não está isento de limitações. Não deve ser usado a menos que o projetista tenha em mente um plano de ação para cada situação desfavorável que possa ocorrer. As observações devem ser confiáveis, devem revelar os fenómenos significativos, e deve ser igualmente relatado para que sejam tomadas as devidas medidas.

Adicionalmente para o desenvolvimento de um projeto de escavação, seguindo esta metodologia, a abertura de um túnel seja rodoviário ou ferroviário, uma mina ou outro tipo de construção, surge como prioridade fundamental a rigorosa elaboração de um estudo do maciço, relativamente às suas propriedades geológicas, geotécnicas e geomecânicas (Chaminé et al., 2010b).

1.1. Enquadramento do estágio no trabalho

O programa de estágio curricular insere-se no âmbito da culminação de estudos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), parte integrante do Politécnico do Porto (P.PORTO).

Neste sentido, foi escolhido o tema da monitorização geotécnica, onde poderá ser explorada a sua importância no acompanhamento de Obras Geotécnicas, em particular de Obras Subterrâneas, tendo como referência o caso do Ramal 1, da Linha Circular da Metro do Porto.

A opção do tema da monitorização geotécnica teve como base compreender o comportamento das estruturas existentes na zona envolvente da construção do túnel, tais como edifícios, vias, o maciço e a própria estrutura no decorrer da construção de uma obra subterrânea, túnel, com vista à segurança de todos os envolvidos e a aferição do projeto de execução.

A aplicação da monitorização, como suporte ao projeto de obras subterrâneas, vem sendo cada vez mais recorrente para que se possam prever os riscos associados e a forma de ajustar o projeto de execução às condições encontradas, bem como constituir uma ferramenta de base para obras geotécnicas similares a construir futuramente.

A monitorização geotécnica revela-se de extrema importância em projetos de grande risco, tais como projetos de obras enterradas, que é o caso de estudo do Ramal 1, sendo este um troço de ligação entre a Linha Circular e a atual Linha C do Metro do Porto, que converge na estação da Casa da Música atualmente existente.

Tendo em conta a evolução da tecnologia ao longo do tempo, uma das ferramentas será a sua aplicação para a monitorização recorrendo a automatização, enquanto se compara a sua eficácia com a monitorização tradicional, a manual.

No âmbito da empreitada da Linha Circular do Metro do Porto foi tomada a decisão por parte do Construtor de recorrer à automatização em parte da instrumentação a instalar, de forma a poder ter leituras em tempo real, por um lado e por outro, a gerir os meios humanos a disponibilizar em obra. Situação esta que permitiu estabelecer paralelismos entre leituras manuais e leituras automatizadas, tema a abordar nesta Dissertação.

1.2. Objetivos gerais

Sendo a monitorização geotécnica uma ferramenta utilizada na área da Geotecnia, mais concretamente nas escavações subterrâneas, como indicador de desempenho de uma dada obra em construção, nesta Dissertação, propõe-se abordar aspetos como: estado da arte, fazer o enquadramento do troço em estudo sob o ponto de vista geológico, tectónico, geotécnico,

geomorfológico e geográfico. Posteriormente, vai ter em conta a instrumentação da obra em questão e as grandezas associadas a serem avaliadas, e por fim, a análise do registo das leituras obtidas a partir do Software específico de acompanhamento (GEOSCOPE).

O projeto de monitorização consiste na definição de um conjunto de procedimentos que se servem e se apoiam na instrumentação e observação de estruturas geotécnicas de modo a se controlar o seu comportamento. Para este fim, a instrumentação e monitorização da obra e da sua zona envolvente é recomendada, e a implementação de metodologias como a observação manual e automatizado, a frequência de medição, servem como base para se fazer corresponder aos diferentes níveis de vulnerabilidade, consoante a relevância.

A contínua medição e observação recorrendo à instrumentação permitirá avaliar as alterações induzidas pela construção da obra no maciço envolvente e à superfície, nas estruturas, nos edifícios da zona envolvente e nas estruturas de contenção, bem como perceber a adaptação do comportamento da estrutura às condições a que a estrutura ficará sujeita. Possibilita ainda, verificar se de facto tais condições correspondem aos pressupostos do projeto de base, bem como o desenvolvimento de retro análises e de modelos de interação maciço-suporte estabelecido no Projeto.

1.3. *Objetivos específicos*

Tendo em conta a implementação da instrumentação para o controlo do comportamento do Túnel do Ramal-1, da Linha Circular da Metro do Porto ao longo da sua fase de construção, o objeto deste trabalho tem como base a comparação entre a monitorização manual e a leitura automatizada, mencionando a sua importância e eficácia para o registo e leitura dos dados.

Estes dados serão representados em gráficos, que permitirão fazer a sua comparação e análise da sua eficácia para o contexto da monitorização geotécnica, assim como estabelecer uma caracterização qualitativa de ambos os procedimentos.

(página propositadamente em branco)

Capítulo II

Conceitos sobre a instrumentação geotécnica

(página propositadamente em branco)

2. Monitorização geotécnica

A observação de escavações subterrâneas, como túneis, recorrendo à instrumentação geotécnica, é uma ferramenta de verificação, utilizada como ponto de partida para a conceção de uma instalação ou tratamento corretivo, e para garantir a segurança, reduzindo custos, ou controlar os procedimentos de construção.

O projeto de monitorização consiste na definição de um conjunto de procedimentos que se servem e se apoiam na instrumentação de observação de estruturas geotécnicas de modo a se controlar o seu comportamento, quer durante a fase de construção, quer durante a fase de exploração (Sousa, 2020).



Figura 1 - Fases da monitorização geotécnica

Assim, o plano de instrumentação, pode estar subdividido em 3 fases (Dunnicliff, 1988):

1. Fase de construção: medições realizadas durante a construção devem ser projetadas para fornecer informações que podem ser usadas para verificar a validade do projeto ou para permitir a conclusão de trabalho de projeto em andamento. Além disso, essas medidas devem fornecer avisos de possíveis problemas para que soluções possam ser implementadas antes que os problemas se desenvolvam a um estágio em que as medidas corretivas sejam muito caro ou impossível de executar;
2. Fase de exploração: Uma vez concluída a construção de uma escavação subterrânea, por vezes é necessário acompanhar o seu comportamento em serviço. Como exemplo de tal procedimento identifica-se o caso do controlo de deformações em cavernas de aproveitamentos hidroelétricos. Nestas situações as técnicas de controlo utilizadas são idênticas às que se recorrem na fase de exploração, com ênfase nas medições de convergência recorrendo aos prismas ou extensómetros multiponto, e a medições de assentamento com recurso aos extensómetros, devido à excelente estabilidade de longo prazo oferecida por esses dispositivos
3. Fase de encerramento: geralmente acontece quando grandes deformações surgem e por essa razão, a estrutura deverá encerrar. Entretanto, nessa fase, ainda deve ser feito um controlo rígido devido às eventuais construções na zona envolvente;

A monitorização geotécnica revela-se de extrema importância em projetos de maior risco, tais como projetos com grandes escavações e taludes, contenções profundas e túneis, e ainda, em

projetos inseridos em zonas com malhas urbanas complexas, com proximidade de edifícios ou estruturas importantes.

Segundo (EUROCÓDIGO 7, 2010), a observação do comportamento de estruturas geotécnicas deve ter em conta as seguintes grandezas:

1. Assentamentos de edifícios e de outras estruturas adjacentes, em intervalos de tempo pré-estabelecidos;
2. Deslocamentos laterais e distorções;
3. Níveis piezométricos sob edifícios ou em áreas adjacentes, especialmente no caso de serem instalados sistemas de drenagem profunda ou de rebaixamento freático permanente;
4. Deslocamento de estruturas de suporte;
5. Caudais medidos em drenos;
6. Estanqueidade à água;
7. Medições das vibrações.

Assim, particularizando, destacam-se seguidamente os objetivos da monitorização geotécnica em túneis:

- Controlar problemas de estabilidade e deformações causados pela obra em curso;
- Permitir uma comparação entre estimativas de deformações e tensões na fase de projeto, tendo como base os parâmetros geotécnicos obtidos nas campanhas de investigação, e compará-las com a realidade da obra, durante e após a execução;
- Antecipar e adotar as medidas adequadas para evitar deslizamentos de terra, quedas de blocos, ou outros possíveis problemas estruturais com o terreno envolvente e as edificações da zona envolvente, caso seja em meio urbano;

Segundo (Vallejo et al. 2002), durante a construção de um túnel, podem existir situações de natureza geológico-geotécnica, cujo impacto depende principalmente do nível de conhecimento do contexto geológico local.

A solução, em grande parte, está em antecipar as soluções para os problemas que podem surgir, com os meios apropriados e com previsão suficiente, com base no conhecimento do terreno. Em muitos túneis, possivelmente devido à pesquisa insuficiente, ou devido à própria incerteza que sempre subsiste, podem surgir situações imprevistas que potenciem o risco. Consequentemente, é necessário, e deve ser a norma, complementar o trabalho de reconhecimento durante a fase de escavação do túnel. As sondagens de avanço feitas na frente (furos tácticos), ou ainda a partir da superfície, constituem os principais métodos de reconhecimento direto.

As soluções construtivas para problemas geológicos que possam ocorrer, dependem dos seguintes fatores de risco:

- Problemas decorrentes do cruzamento de falhas ou grandes zonas de fratura;

-
- Contactos entre rochas com comportamento geomecânico diferenciado;
 - Grandes cunhas de rocha ou instabilidade de solo, solto ou altamente fraturado, especialmente sob pressão de água;
 - Intersecção de planos de cisalhamento e de pouca resistência, e áreas alteradas;
 - Existência de tensões importantes que dão origem a fortes desconpressões e convergências localizadas;
 - Presença de cavidades;
 - Solos ou rochas expansivas;

O resultado das medições, recorrendo à instrumentação geotécnica, também pode ser utilizado para assegurar um desempenho satisfatório a longo prazo, proporcionar proteção jurídica aos responsáveis pela construção, com também contribuir para o avanço do estado da arte da engenharia geotécnica.

As razões pelas quais a monitorização geotécnica revela-se uma ferramenta de grande importância dividem-se entre:

- a) Arquitetónicas e de conceção;
- b) De construção;
- c) Legais;
- d) Verificação a longo prazo do comportamento da obra em questão;
- e) Melhoramento de relações públicas;
- f) Estado avançado da arte;

Neste enquadramento a instrumentação é utilizada para garantir a segurança, reduzir os custos de construção, e controlar os procedimentos ou tempo de construção.

A segurança, tanto durante como após a construção, é um fator essencial a considerar em todos os projetos de construção, podendo ser avaliada através da observação a longo prazo.

Os dados da instrumentação podem igualmente fornecer elementos para a conceção de um projeto inicial ou de reabilitação.

Onde a construção geotécnica possa afetar as diversas edificações ou infraestruturas públicas ou privadas na zona envolvente, a instrumentação é útil para determinar se existe uma relação entre a construção e a evolução das condições dessas edificações ou infraestruturas e dessa forma permitir o enquadramento de responsabilidade dos deferentes intervenientes.

No âmbito de melhoramento das relações públicas, os projetos de instrumentação, podem ainda possibilitar uma perceção do conceito de segurança pela sociedade. (Dunnicliff, 1993), descreve um projeto pelo qual o proprietário explicou à comunidade local sobre a necessidade e aplicação da instrumentação, de modo a tranquilizar a população abrangida bem como elucidar que a segurança

poderia ser melhorada e ainda poderia reduzir potenciais problemas adversos. Isto resultou numa aprovação mais rápida de o projeto e eliminou muitos dos obstáculos da comunidade.

Por último, faz-se notar que muitos avanços na engenharia geotécnica resultaram de medições de campo enquadráveis nos princípios da instrumentação. As medições feitas por uma das razões específicas de cada projeto, complementarmente têm vindo a proporcionar o avanço geral do conhecimento. Adicionalmente, várias pesquisas práticas têm sido desenvolvidas para verificar e alargar teorias existentes sobre o comportamento do solo e das rochas, e, por conseguinte, fornecer uma base para alargar o estado da arte para a conceção da construção geotécnica.

2.1. Plano de monitorização

O plano de monitorização geotécnica recorrendo à instrumentação, deve ser elaborado antes do início dos trabalhos de escavação no local de implementação, uma vez que seu escopo acarreta riscos em todas as fases da obra, e está relacionado com todos os envolvidos na definição do mesmo.

Segundo APG (2022) e Dunnycliff (1993), o plano de instrumentação é complexo, mas serão mencionadas as fases importantes a ter em conta, como:

- Reconhecimento das condicionantes do projeto em vista;
- Definição dos objetivos da instrumentação;
- Grandezas a avaliar;
- Seleção do tipo de equipamentos;
- Planeamento das quantidades de equipamentos;
- Projeção da localização dos equipamentos;
- Delineamento da frequência de leituras;
- Identificação dos fatores que podem influenciar ao longo do processo das leituras e processamento dos dados;
- Orçamentação;
- Definição dos níveis de referência: alerta e alarme;
- Apresentação de dados;
- Análise dos dados;
- Tomada de decisões face as análises feitas, e adoção de medidas corretivas.

Tendo em conta os aspetos antes mencionados, uma vez aprovado o plano de monitorização, procede-se à instalação e ao acompanhamento de dispositivos de instrumentação de acordo com critérios definidos em projeto. Faz-se notar que o plano de monitorização deverá ser entendido

como documento dinâmico, pelo que poderá ser redefinido sempre que necessário, devido as situações pontuais que possam surgir.

Um aspeto que faz com que os planos de monitorização, recorrendo a instrumentação seja condicionado, está associado à interpretação adequada dos dados em grandes quantidades devido ao número de informações que devem ser processadas e tratadas para obter as conclusões pertinentes, portanto, é muito importante estabelecer a finalidade da instrumentação, pois o excesso de informações com tratamento deficiente, pode ser muito mais prejudicial do que a falta de informações.

Por outro lado, segundo (Vallejo et. al, 2002), as informações necessárias e algumas variáveis fundamentais, como os níveis de alerta e de intervenção, devem ser reguladas para uma observação ainda mais segura. A acessibilidade aos instrumentos após a sua instalação é um fator que se deve ter por referência na definição das leituras. Instrumentos instalados tarde demais, ou instalados e não lidos devido à dificuldade de acesso, ou não adequados para suportar exposição em ambiente subterrâneo também devem ser considerados. Danos provocados pelas operações de construção que resultem em eventuais falhas de registo de leituras também podem ser previstos aquando da conceção do projeto. Por último, deve ser tido em conta uma rede de comunicação que minimize o atraso causado pelo envio os resultados bem como o rigor e profissionalismo adequado das equipas.

2.2. Equipamentos e grandezas a avaliar na monitorização geotécnica de túneis

Segundo (APG, 2022), no projeto de monitorização são definidos instrumentos e metodologias utilizadas, frequência de medição e critérios de deformação ou alteração expectáveis, aos quais se fazem corresponder diferentes níveis de alerta, consoante as respetivas relevâncias. A contínua observação, medição e controlo permitirá perceber a adaptação do comportamento da estrutura às condições reais a que ficará sujeita e verificar se de facto corroboram os pressupostos do projeto. A instrumentação engloba um conjunto de técnicas e de equipamentos que são utilizados em estruturas geotécnicas com o objetivo de fornecer dados sobre o comportamento das mesmas.

Visto que a monitorização é uma ação que se apoia na instrumentação, os objetivos da instrumentação seguem as mesmas diretrizes que os da monitorização.

A seleção de equipamentos baseia-se essencialmente em dois fatores:

- Precisão;
- Princípio de redundância de aquisição de dados;

A localização dos dispositivos, tem em conta aspetos como:

- Onde se espera maior deformação;
- Envolvente da escavação;
- Vértices e pontos centrais de cada edifício;
- Zonas representativas (distancia ou profundidade).

A frequência de leituras pode ser subdividida da seguinte forma:

- Em fase de construção ou escavação;
- Em fase de acabamento;
- Em fase de exploração;

Segundo Torres (2010), os instrumentos implementados em obras geotécnicas podem ser subdivididos em grandezas, em função do fim a que se destinam:


- Medição de deformações verticais e horizontais;
- Medição das cargas e das deformações do suporte;
- Inclinação e rotação;
- Controle de fissuras;
- Tensões;
- Medição dos níveis freáticos e das tensões neutras.

A considerar as grandezas mencionadas, seguidamente listam-se os vários dispositivos correspondentes à sua aplicação.

Deformações verticais e horizontais no terreno

a) Inclinómetro

Quadro 1 - Ilustração dos vários tipos de inclinómetro e o coletor de dados

FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/APLICAÇÃO TIPO (continua)
 <p>www.rstinstruments.com</p>	<p>Inclinómetro de perfil de poço</p> <ul style="list-style-type: none"> – constituído por vários torpedos acoplados em série instalados ao longo do mesmo tubo inclinómetro. Podem fazer a monitorização remota contínua para locais com deformação e movimentos ativos no solo.

 <p>www.measurand.com</p>	<p>Inclinómetros Shapearray (SSA)</p> <p>Sistema inclinométrico automatizado composto por uma sequência de segmentos rígidos intercalados por juntas rotulares, que tornam possível o controle do movimento em qualquer direção sem ter em conta o eixo.</p>
 <p>www.rstinstruments.com</p>	<p>Tubo inclinométrico</p> <p>Utilizado no interior de furos, para deslizamento do torpedo de inclinómetro convencional no seu interior.</p>
 <p>www.sisgeo.com</p>	<p>Inclinómetro – sistema <i>b.r.a.i.n</i></p> <p>Equipamento para a monitorização das deformações do maciço a profundidade, que permite registar os valores obtidos em dispositivo.</p>


b) Extensómetro ou extensómetro de assentamento

Quadro 2 - Ilustração dos vários tipos de extensómetro

FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/ APLICAÇÃO TIPO (continua)
 <p>www.sisgeo.com</p>	<ul style="list-style-type: none">– Extensómetro de varas multiponto <p>É usado para monitorizar deslocamentos verticais a diferentes profundidades até aos 40m (Vallejo et. al, 2002).</p> <p>Também utilizados para controlar deslocamentos no próprio túnel, instalando-se em pontos distintos ao longo do contorno da abóbada, sendo designados extensómetros multi-ponto.</p>
 <p>www.sisgeo.com</p>	<ul style="list-style-type: none">– Extensómetros de Convergência <p>Estruturalmente são uma haste, permitem controlar as mudanças na distância entre dois pontos de ancoragem.</p>
 <p>www.rstinstruments.com</p>	<ul style="list-style-type: none">– Extensómetro de fita <p>Mede as mudanças na distância entre dois pontos fixos de referência, geralmente, no interior do túnel nas secções de convergência, em qualquer orientação, com rapidez e precisão.</p>
 <p>www.sisgeo.com</p>	<ul style="list-style-type: none">– Extensómetros de corda vibrante <p>Utilizados para medições de tensões estruturais nas cambotas ou no betão projetado.</p>

c) Marcas de superfície

Quadro 3 - Ilustração da vara de aço fabricada, para uma marca de superfície


FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/ APLICAÇÃO TIPO
 www.metbusquet.com	– Marcas de superfície aço inox Controlo de assentamentos superficiais

Deformações verticais e horizontais – edifícios

a) Sistema de nivelamento líquido

Os sistemas de nivelamento líquido funcionam com base nos princípios de hidráulica com o objetivo de controlar as deformações nos edifícios. Consiste em colocar os de medidores de nível em série interligados hidraulicamente para um tanque de referência. Cada medidor de nível inclui sensor de pressão que controla a cabeça da célula que contém o líquido que resulta na diferença de elevação entre o medidor e o tanque de referência. A partir deste resultado, pode-se determinar o valor do deslocamento vertical (assentamento) no edifício.

Quadro 4 – Ilustração do sistema de nivelamento

FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/ APLICAÇÃO TIPO
 www.sisgeo.com	– Sistema de nivelamento líquido Controlo de assentamentos diferenciais

b) Alvos reflexivos

Dentro dos diferentes tipos de alvos destaca-se o caso dos de 6 faces que constituem uma inovação no âmbito da instrumentação pois a sua geometria, com 3 camadas de vidro, permite monitorizar os deslocamentos obtidos por método topográfico em todas as direções de um dado edifício sem ter de alinhar constantemente o prisma com o dispositivo de leitura, que é um teodolito ou estação robotizada situação que se verifica para os alvos clássicos planos.

Quadro 5 – Ilustração de alvo reflexivo

FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/ APLICAÇÃO TIPO
 <p data-bbox="204 577 539 611">www.leica-geosystems.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="699 300 1018 333">– Alvos reflexivos planos <p data-bbox="746 349 1353 439">Controlo de assentamentos de edifício através de um ponto fixo</p>
 <p data-bbox="244 1010 579 1043">www.leica-geosystems.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="699 629 1058 663">– Alvos reflexivos de 6 faces <p data-bbox="699 678 1353 768">Controlo de assentamentos de edifício através de um ponto fixo</p>

c) Clinómetro

Os clinómetros permitem medir as inclinações verticais ou horizontais, e as respetivas mudanças ao longo do tempo avaliando a sua variação, e são colocados em edificações, funcionando através de uma força equilibrada de servo-acelerómetro. Podem também fornecer um aviso prévio de potenciais danos estruturais.

A principal vantagem deste equipamento é o seu baixo custo, fácil instalação e utilização, entretanto, a sua limitação está associada ao facto de apenas permitir observar inclinações.

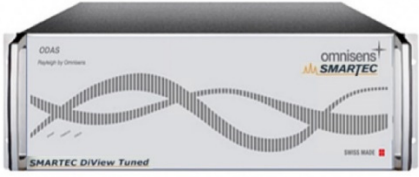
Quadro 6 - Ilustração dos vários tipos de clinómetro

FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/ APLICAÇÃO TIPO (continua)
 <p>www.sisgeo.com</p>	<p>– Clinómetro portátil</p> <p>Medidor de inclinação portátil, contém o inclinómetro de tecnologia MEMS.</p> <p>As medições podem ser feitas em superfícies horizontais ou verticais.</p>
 <p>www.sisgeo.com</p>	<p>– Clinómetro MEMs</p> <p>Utilizado especialmente para testes de carga estrutural e controlo de paredes a longo prazo, com também, monitoram as mudanças de inclinação em um ou dois eixos planos perpendiculares à superfície da placa de base.</p>
 <p>www.sisgeo.com</p>	<p>– Sensores <i>Tilt Beam</i> (TB)</p> <p>Usados tanto em cadeia para medir um deslocamento contínuo quanto em aplicações independentes para medir o deslocamento de inclinação entre dois pontos que são as extremidades do feixe.</p>

d) Sismógrafo

São dispositivos utilizados para registar e medir as vibrações, isto é, os movimentos ou deslocamentos no solo, causados pela propagação de ondas eletromagnéticas, que no caso de escavações subterrâneas, são aplicados devido ao uso de explosivos.

Quadro 7 - Ilustração de sismógrafo

FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/ APLICAÇÃO TIPO
 <p data-bbox="204 555 400 586">www.telemac.fr</p>	<p data-bbox="722 297 1070 329">– Sismógrafo de fibra ótica</p> <p data-bbox="675 349 1350 436">Medições distribuídas e dinâmicas da tensão, e vibração de alta precisão;</p>

Controle de fissuras – edifícios e maciço

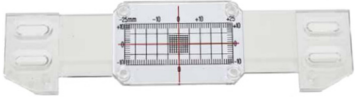
a) Fissurómetro



Os fissurómetros são instrumentos que são aplicados quando se pretende monitorizar fissuras superficiais e juntas em estruturas de betão (edifícios) ou rocha do maciço envolvente do túnel. A escolha do tipo de fissurómetro depende da acessibilidade para realizar a leitura, da precisão pretendida, bem como da amplitude esperada do movimento, e do custo.

São constituídos por duas placas sobrepostas ao longo do seu comprimento, em que a placa inferior encontra-se calibrada em milímetros e a placa superior é transparente. Na placa superior é realizada uma linha que serve de referência às seguintes leituras, e quando se regista uma mudança de largura da fissura, uma placa move-se relativamente à outra, sendo a diferença entre a linha de referência e a escala da placa inferior o deslocamento ocorrido.

Para além dos fissurómetros de medição manual, vindo sendo adotados os extensómetros de leitura automatizada em locais de acessibilidade dificultada, ou quando há a necessidade de fazer o controle em tempo real de uma abertura.

Quadro 8 - Ilustração dos diversos tipos de fissurómetro

FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/ APLICAÇÃO TIPO
 <p data-bbox="204 1843 408 1874">www.sisgeo.com</p>	<p data-bbox="730 1619 1062 1650">– Fissurómetro graduado</p> <p data-bbox="687 1693 1329 1724">Medição manual de abertura de fissuras em edifícios.</p>

 <p>www.sisgeo.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Fissurómetro mecânico <p>Colocado em uma fissura, e permite o levantamento de fissuras em duas direções.</p> <p>Observação em tempo real</p>
 <p>www.sisgeo.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Fissurómetro de corda elétrica e vibrante <p>Destinados a monitorizar o movimento através de fissuras e juntas superficiais em estruturas de betão ou rocha.</p>

Tensões - estrutura

a) Células de carga

As células de carga são implementadas para medir as tensões transmitidas ao solo, bem como a monitorização das variações das tensões exercidas por ancoragens e outros elementos estruturais. As células de carga são instaladas após o tensionamento das ancoragens com o objetivo de observar as cargas exercidas por estes elementos, e de controlar as perdas ou aumento da tensão inicial, tanto na fase de obra, como ao longo da vida da estrutura, para garantir que estes elementos continuem em correto funcionamento.




São constituídas por transdutores que permitem converter pressões em impulsos elétricos, e a sua medição consiste em colocar o dispositivo entre o topo da ancoragem e o terreno. Assim, uma perda de carga numa determinada célula pode permitir identificar uma falha da ancoragem ou perda de material na zona posterior do muro. A situação contrária, como o aumento de carga pode significar que a estrutura necessita de ser intervencionada para evitar que a mesma entre em rotura, que as ancoragens ao redor desta podem estar com problemas ou que a estrutura se encontra carregada em excesso.

As células de carga podem ser subdivididas em:

- Células mecânicas: as deformações são medidas através de dispositivo portátil, geralmente, computador;

- Células hidráulicas: as deformações são medidas com pequenas células contendo uma câmara oleosa e que transmitem o valor obtido, para um transdutor;
- Células elétricas: células metálicas em que a deformação é transmitida à sensores elétricos;


Quadro 9 - Ilustração das várias células de carga hidráulica

FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/ APLICAÇÃO TIPO (continua)
 <p>www.sisgeo.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Células de carga de ancoragem hidráulica <p>São usadas para monitorizar cargas em ancoragens (por exemplo de muros de contenção).</p>
 <p>www.sisgeo.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Células de carga eletro-hidráulicas <p>São especialmente projetadas para controlar estruturas metálicas de escoramentos</p>
 <p>www.sisgeo.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Célula de carga de ancoragem elétrica <p>Utilizado para controlo do desempenho de sistemas de ancoragem (por exemplo em túneis ou escavações subterrâneas)</p>

b) Células de pressão total

São usadas para monitorizar a pressão total e são colocadas no maciço, ou na interface com as estruturas. São constituídas a partir de duas placas de aço inoxidável, soldadas em torno de sua periferia, o espaço anelar entre essas placas é preenchido sob vácuo por óleo. A almofada de pressão é conectada por meio de um tubo de aço inoxidável ao transdutor formando um sistema hidráulico fechado. Um sinal elétrico proporcional à pressão aplicada pode ser lido remotamente em uma variedade de unidades portáteis de leitura ou registradores de dados.

Quadro 10 - Ilustração dos vários tipos de células de pressão total

FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/ APLICAÇÃO TIPO
 <p data-bbox="240 546 547 573">www.rstinstruments.com</p>	<p data-bbox="746 322 1070 349">– Célula de Pressão Total</p> <p data-bbox="699 396 1388 479">Mede a pressão em locais aplanados (no caso dos túneis podem ser aplicadas sob o revestimento).</p>

Água subterrânea, pressão hidrostática e intersticial - maciço

a) Piezómetros

Os piezómetros são instrumentos de monitorização que permitem medir a pressão hidrostática e o nível freático nos terrenos, ou mesmo podem ser utilizados para detetar a profundidade da água nos interstícios.

Existem vários tipos de piezómetros, mas são destacados os seguintes:

➤ Piezómetro de Casa grande

Este tipo de piezómetros é usado em terrenos permeáveis. São constituídos por um filtro de ponta de alta porosidade por onde a água pode circular livremente, ligado a um tubo vertical que comunica com a superfície. Desta forma, o aumento ou decréscimo da pressão hidráulica irá fazer com que o nível da água suba ou desça no interior do tubo.

O procedimento consiste na instalação de um sistema de leitura ou transdutor em furo, registando a pressão intersticial neste ponto que é transmitido para uma unidade de leitura localizado fora do poço.

➤ Tubo piezométrico crepinado

Consiste na instalação de um tubo de PVC crepinado e aberto nas duas extremidades, colocado ao longo do furo. Após a perfuração, a altura atingida pela água é medida no interior do tubo, por períodos longos, durante a fase de construção na fase de exploração, permitindo avaliar condição hidrogeológica do local em questão.

➤ Piezómetro de tubo aberto

Este tipo de piezómetro, é utilizado para determinar as pressões neutras e as subpressões no maciço.

Consiste em isolar uma secção de perfuração com bentonite, e posteriormente instalar um tubo crepinado, exclusivamente nessa secção com abertura na parte superior, medindo a altura da água correspondente a essa secção.

A leitura é realizada através de um indicador do nível da água, que é constituído por um torpedo, contendo uma chave elétrica, um fio graduado e um carretel. Assim, quando o torpedo atinge o nível de água, o circuito elétrico fecha-se e é emitido um sinal sonoro, seguindo-se a leitura direta da profundidade a que se encontra o torpedo através do fio graduado.

Quadro 11 - Ilustração dos vários tipos de piezómetro

FOTOGRAFIA	DISPOSITIVO/APLICAÇÃO TIPO (continua)
 <p>www.sisgeo.com</p>	<p>– Casa grande ou piezómetro fechado</p> <p>Usada para medir a pressão da água em solo permeável através de tubos transdutores inseridos no seu interior;</p>
 <p>www.telemac.fr</p>	<p>– Piezómetro pneumático</p> <p>Obtém a pressão neutra da camada em que o dispositivo está instalado;</p> <p>Adequado para uso em projetos de monitorização de curto e longo prazo.</p>
 <p>www.sisgeo.com</p>	<p>– Piezómetros de corda vibrante multiponto</p> <p>Fornecem medições da pressão da água dos poros em diferentes elevações no mesmo furo.</p>


 <p>www.sisgeo.com</p>	<p>– Piezómetro de corda vibrante</p> <p>Usados para monitorizar a pressão da água nos poros em solos, no interior dos tubos abertos;</p> <p>São instalados nas paredes dos poços, como também podem ser embutidos.</p>
 <p>www.sisgeo.com</p>	<p>– Indicador de nível de água</p> <p>Utilizados para medir o nível de água ao longo do furo, ou ainda nos piezómetros de Casa grande.</p>

Medição da temperatura - estrutura

a) Termómetro

De modo a se ter controlo da temperatura e a sua variação na estrutura, e como fator indicativo de alguma ocorrência, recorre-se aos termómetros, que por sua vez, são colocados na própria estrutura, distribuídos nos diversos locais da obra, como estruturas metálicas uma vez que os metais são bons condutores de calor, ou nas paredes em betão. Também pode se considerar a temperatura como um parâmetro de controlo muito importante para avaliar a influência dos efeitos térmicos nas medições por via de sensores no próprio equipamento como as estações robotizadas.

Quadro 12 - Ilustração de termómetro

FOTO	DISPOSITIVO/ APLICAÇÃO TIPO
 <p>www.sisgeo.com</p>	<p>– Termómetro</p> <p>Configurado para várias medições térmicas em poços, valas ou para ser embutida no betão.</p>

Face a este enquadramento, está representado na Figura 2, uma disposição esquemática dos equipamentos de instrumentação de um túnel tendo em conta os edifícios e o maciço.

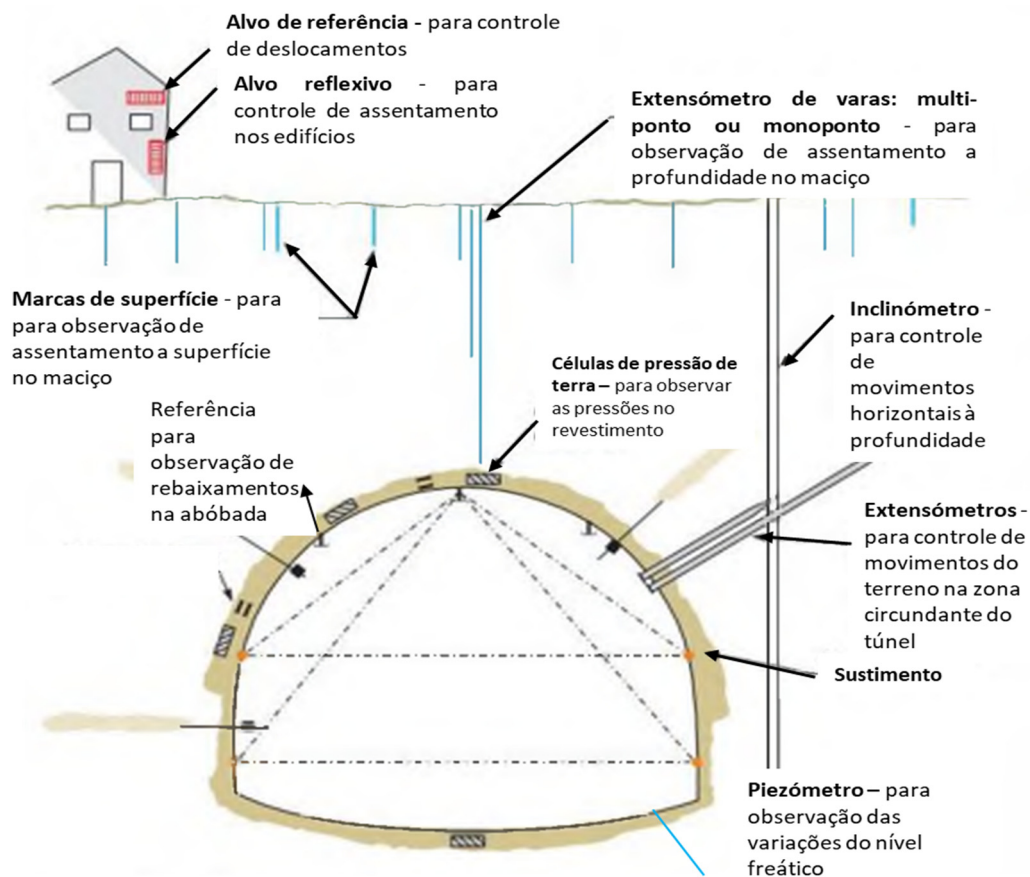


Figura 2 - Esquema da instrumentação na monitorização de túneis – (Adaptado: Vallejo et al., 2002)

2.3. Fatores de influência na escolha do tipo de instrumentação

A importância da instrumentação geotécnica tem sido ampliada por técnicas de desenho ou projeto cada vez mais complexas, desenvolvimentos técnicos recentes, e modificações de programas. Em outros casos, a instrumentação pode mostrar que o desenho projetado é inadequado, o que pode resultar num aumento dos custos de construção.

No entanto, o valor da segurança acrescida e a redução de falhas e a racionalização dos custos de reparação faz da instrumentação uma ferramenta rentável.

A utilização de instrumentação não é apenas a seleção de instrumentos, mas está também relacionada com o processo que alberga as ferramentas de engenharia que tem como base a definição do objetivo e concretiza-se na implementação dos dados.

As várias etapas, cada uma delas é fundamental para o sucesso ou fracasso do plano de instrumentação.

Assim, temos de seguida os fatores que influenciam na escolha do tipo de instrumentação:

- Condições do solo: podem ser o fator com mais peso na escolha da instrumentação a utilizar. É necessário elaborar uma análise às características do solo e de todos os

-
- parâmetros que possam ser necessários ter em conta para se optar pela instrumentação mais correta para o local;
- Condições ambientais: temperatura e humidade afetam a escolha da instrumentação;
 - Custo;
 - Vida útil: duração do plano de instrumentação e observação, ou a verificação de que o instrumento tem proteção contra a corrosão, têm uma forte influência na vida útil do instrumento;
 - Desempenho dos instrumentos: segundo (Vallejo et. al, 2002), ao discutir o uso da instrumentação durante a construção de túneis, enfatizou a necessidade de instrumentos simples e robustos instalados e monitorados de tal forma que a interferência nas atividades de construção seja mínima;
 - Fatores humanos: Comumente associa-se o fator humano a eventuais erros resultantes das leituras manuais de campo ou na transcrição e processamento dos dados, isto porque vários outros fatores interferem no próprio operador. O fator humano tanto pode ser o problema como a solução. O que distingue estes dois fatores é a postura demonstrada pelos intervenientes perante a relevância da instrumentação geotécnica (Silva, 2021).

2.4. Casos tipo de soluções de monitorização

Projeto de Reabilitação Geral e Reforço Estrutural das Galerias Central e Sul do Túnel de Águas Santas

Águas Santas é uma Freguesia no Norte de Portugal, situada da Cidade da Maia.

Para a observação das obras de escavação do túnel, foi concebida a instrumentação de secções específicas das Galerias Sul e Central, de modo a poder controlarem-se os deslocamentos da estrutura quando sujeitas a eventuais solicitações provocadas por evolução do maciço a longo prazo, e nesse sentido, estavam previstos dois tipos de secção, sendo a principal e a complementar. Na secção principal, foram instalados: extensómetro de varas multiponto com duas profundidades de leitura, mini alvos-prisma refletos topográficos e extensómetros de corda vibrante (strain gauges).

Na secção complementar, mais concretamente na interface entre o maciço e o reforço em betão, foram instalados alvos-prisma refletos topográficos.

Para além das secções acima descritas, escolheram-se dois pontos no interior do túnel numa secção em aduela junto ao emboquilhamento, numa zona com nível freático abundante, para a colocação de dois piezómetros.

Definida a instrumentação, foi estabelecida uma frequência de leituras para todos os dispositivos instalados de 1 vez por semana na fase de construção.

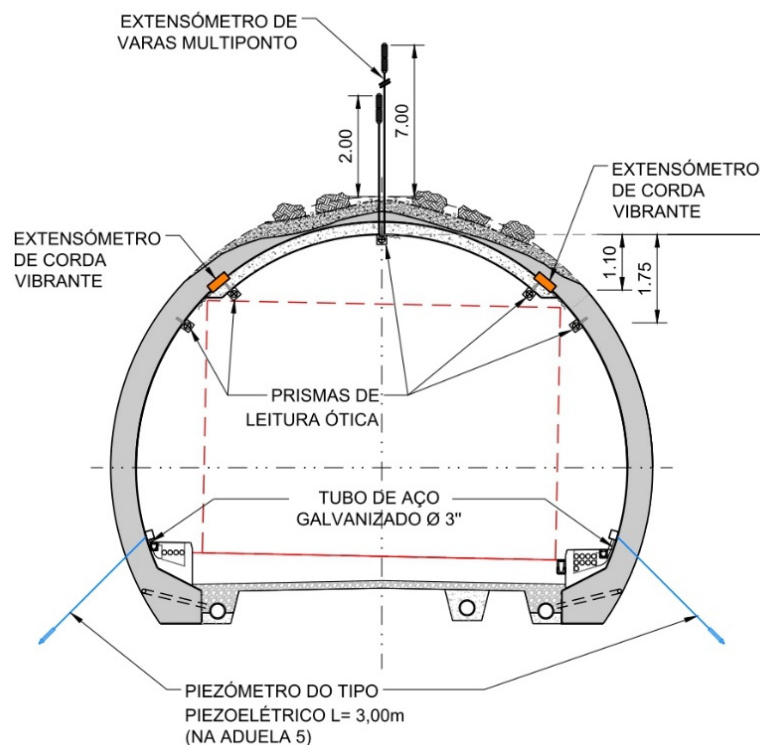


Figura 3 - Corte transversal da instrumentação colocada: secção principal e secundária. (Extraído de: Brista Concessão, Brista Construção de Infraestruturas, COBA Portugal – Corte transversal – Galeria Central/Plano de Monitorização, 2021)

Observação geotécnica durante a fase de construção da Cave do Edifício Platinum na Cidade de Maputo (Moçambique) - abordado na dissertação para obtenção de grau mestre de Izel Issufo

O edifício *Platinum*, insere-se numa zona densamente habitada na cidade de Maputo, capital moçambicana, composta por edificações da época colonial e por infraestruturas sensíveis na zona envolvente, com vias de circulação de automóveis, com tráfego intenso.

Ao longo das pesquisas para a implementação da cave do Edifício *Platinum*, segundo (Issufo, 2016) foram detetadas 3 estruturas edificadas que condicionavam fortemente a construção devido ao método construtivo adotado (tecnologia Top-Down), e que obrigaram a adoção de cuidados adicionais para que a escavação não os afetasse e não colocasse em risco aos habitantes.

Desta forma, concebeu-se um plano de monitorização durante a fase de construção que permitiu a rigorosa observação do comportamento da própria estrutura em construção recorrendo a inclinómetros, e alvos refletores topográficos nas zonas críticas das escavações como edifícios, em

elementos estruturais como vigas de coroamento e lajes, porém as colocações de alguns dos alvos estavam localizadas juntos aos inclinómetros com o objetivo de fazer leituras complementares. Com a conclusão da execução das estacas de contenção, foram instalados inclinómetros no interior das mesmas para permitir a observação de movimentos horizontais ao longo das cortinas, ao passo que os alvos refletivos topográficos nos edifícios foram instalados em fase prévia à escavação e tinham como principal objetivo medir os possíveis deslocamentos nas várias direções (X, Y e Z). O plano de monitorização previa leituras de até 1 vez por semana, com vista a ter interpretações sobre o deslocamento para o interior da escavação da cave do edifício em construção.

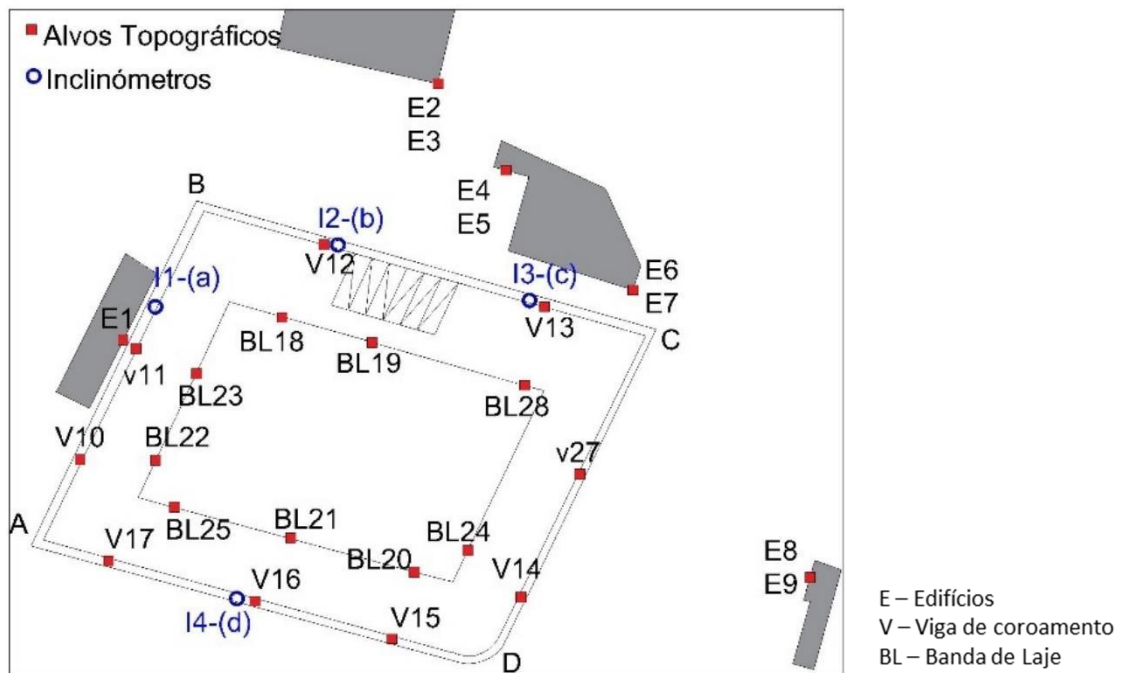


Figura 4 - Planta de Instrumentação. (Fonte: Issufo, 2016)

2.5. Outras formas de implementação da monitorização geotécnica

Para este fim da observação geotécnica, recorre-se a diversos outros métodos de monitorização que podem ser aplicados com o objetivo de controlar o comportamento de estruturas geotécnicas (Giordan et al., 2020), como:

- Cartografia geológico-geotécnica: consiste na reprodução de mapas que têm como base o levantamento das litologias e do estado do maciço em questão;
- Controle visual: onde o acesso adequado está disponível possibilitando assim a observação de anomalias com impacto para obra, em intervalos de tempo estabelecidos;

-
- Fotogrametria: método que recorre ao levantamento de imagens sem contacto direto e recorrendo a raios eletromagnéticos para interpretação do objetivo pretendido (Lopes, 2015);
 - VANT (veículos aéreos não-tripulados): técnica usada para buscar sinais de deslizamentos em uma determinada área, e tem como base, o aproveitamento da resolução dos equipamentos de registo fotográfico e a altitude não muito elevada, que permite que o veículo aéreo não-tripulado encontre evidências, que podem ser representadas como marcas no terreno, de movimentos de terra que não seriam vistos de um avião ou de imagens de satélite. Como vantagem, o aumento na tecnologia dos veículos aéreos não-tripulados, permite uma operação mais segura, rápida, barata e com qualidade para o objetivo pretendido (Gramini, 2015);
 - Controlo das convergências: pretende obter o valor do deslocamento entre pontos opostos, que geralmente são colocados nos hasteais e na abobada do túnel, e pelo método tradicional recorria a um extensómetro de fitas ou prismas reflexivos distribuídos em pontos diferentes na abobada ou a alvos/prismas refletores formando um sistema de cordas;
 - Tecnologia de radar interferométrico de abertura sintética (InSAR): Esta técnica é baseada na exploração de um conjunto de imagens de satélite de radar adquiridas do espaço. O radar de abertura sintética (SAR) é um sistema de radar de imagem montado em satélites. Os satélites captam imagens de radar através do registo preciso da fase de deslocamento entre a superfície do solo e o sensor. Quando várias medições são comparadas ao longo do tempo, a diferença indica deformação do solo ao longo do tempo, e destaca os locais onde existem deformações acentuadas. É uma técnica e ferramenta útil para obter medições de estruturas individuais do terreno em vastas áreas, tanto em ambientes urbanos como não urbanos (www.sixense-group.com).

2.6. Avaliação e gestão de risco na construção de túneis

A instrumentação geotécnica, ao permitir avaliar em tempo real o estado da obra do maciço onde se insere bem como da sua envolvente, constitui uma importante ferramenta de Gestão de Riscos da construção ao:

- Identificar perigos e riscos associados que impactem nos resultados no que respeita aos custos e o planeamento, inclusive para terceiros;
- Quantificar os riscos incluindo seu programa e implicações de custo;
- Identificar ações pró-ativas planeadas para eliminar ou mitigar os riscos;
- Identificar os métodos a serem utilizados para o controle dos riscos;
- Alocar riscos às diversas partes do Contrato.

A instrumentação permitirá assim a identificação de perigos, a avaliação das suas consequências e a probabilidade de ocorrência juntamente com as estratégias apropriadas para ações preventivas e contingentes. Procedimento este que assume particular relevância nas obras enterradas, nomeadamente em túneis em meio urbano, como é o caso da obra em estudo no âmbito da presente Dissertação e que se apresenta nos Capítulos seguintes.

(página propositadamente em branco)

Capítulo III

Contexto de obra: descrição genérica da empreitada acompanhada

(página propositadamente em branco)

3. Contexto de obra: descrição genérica da empreitada e do troço

A empreitada acompanhada no âmbito do estágio corresponde ao túnel do Ramal-1, da Linha Circular do Metro do Porto localizado em área urbana na zona da Boavista na cidade do Porto.

3.1. Enquadramento Geográfico, Tectónico e Geomorfológico do Porto

A cidade do Porto situa-se na região Norte de Portugal, mais concretamente no Noroeste, na margem Norte do Rio Douro, sendo esta uma das mais antigas Cidades da Europa (Afonso et al. 2004), e a segunda maior cidade do país, compreendendo uma área de 41.5Km² (Fernandes, 2003).

Sob o ponto de vista geotectónico, enquadra-se no Maciço Ibérico, i.e., entre os maciços da faixa metamórfica de Porto-Espinho-Albergaria-a-Velha e o Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão, mais concretamente na ZCI - Zona Centro Ibérica, e no seu limite Poente assenta sobre terrenos da ZOM - Zona de Ossa Morena (Chaminé et al., 2003, 2010a). O contacto entre estas duas unidades geotectónicas é materializado pela faixa de cisalhamento Porto-Coimbra-Tomar com orientação predominantemente NNW-SSE, que passa pela zona da Foz do Douro (Chaminé et al., 2003). Esta proximidade do maciço granítico do Porto de uma zona de deformação intensa favoreceu uma elevada rede de fracturação e a circulação profunda de fluídos, seguida de intensa alteração meteórica, atingindo horizontes de alteração superiores a 30m (Begonha & Sequeira Braga, 2002; Babendererde et al., 2004; Almeida, 2006).

Em termos geomorfológicos, a região do Porto corresponde a uma área aplanada que tem origem em cotas baixas, aumentando gradualmente para o setor Sul do Porto, terminando na base de um relevo ingreme que representa o rebordo interior da plataforma, conhecido como o relevo marginal, inclinando ligeiramente para os quadrantes Sul e Oeste (Araújo et al., 2003). Devido a presença de dois tipos de depósitos, existem evidências no terreno de atividade neotectónica, tais como (Araújo et al., 2003):

- Falhas geológicas abundantes (principalmente inversas) que afetam os depósitos mais elevados desta plataforma litoral;
- Os mesmos níveis marinhos parecem ocorrer a diferentes altitudes, desenvolvendo-se um padrão irregular com uma ligeira inclinação de Norte para Sul;

3.2. Enquadramento Geográfico, Tectónico e Geomorfológico do Ramal-1

O troço do Ramal-1, localiza-se entre as coordenadas 41°09'47.7"N; 8°37'55.9"W e 41°09'41.7"N; 8°37'41.4"W, no centro da cidade do Porto, mais concretamente na zona da Boavista, área

O maciço rochoso alterado (W_3) apresenta um comportamento de transição entre solo/rocha associado à concentração de fluxo de água.

O maciço rochoso (W_{2-1}), as principais condicionantes são a estabilidade de blocos e a passagem por zonas de maciço alterado. Estas zonas são investigadas através de furos táticos, no decorrer da escavação do túnel, e sua identificação prévia é de crucial importância para avaliar a necessidade de execução de tratamentos e/ou de drenagem especial.

A Carta Geotécnica do Porto (COBA, 2003), representada na Figura 7, com base no estudo dos principais afloramentos da cidade, refere que as direções de fracturação mais marcadas no granito do Porto são ENE-WSW a NW-SE e que as direções mais tardias, NNE-SSW a NS, são também significativas.

O mesmo documento (COBA, 2003) refere que as descontinuidades observadas apresentam uma cutícula ferruginosa, que as paredes se encontram alteradas e que os preenchimentos argilosos são raros. A fracturação, com orientação variável, é maioritariamente sub-vertical. As sondagens realizadas reconheceram um maciço granítico muito fraturado, com descontinuidades abertas, pouco preenchidas, mas alteradas, com óxidos de ferro depositados nas paredes.

Quadro 13 - Zonamento geotécnico adotado para o projeto da Linha Circular do Metro do Porto. (Fonte:SENER, CJC Engenharia e Projetos, NSE Engineering – Memória Descritiva – Volume 6, 2019)

Zona geotécnica	Litologia	Grau de alteração predominante	Grau de fracturação predominante	GSI Geological Strenght Index
G1	Granito do Porto (de duas micas)	W1	F1	65-85
G2		W2	F2	45-65
G3		W3	F3	30-45
G4		W4	F4	15-30
G5		W5	F5	-
G6	Solo residual	W6	-	-
G7	Aterros e aluviões	-	-	-

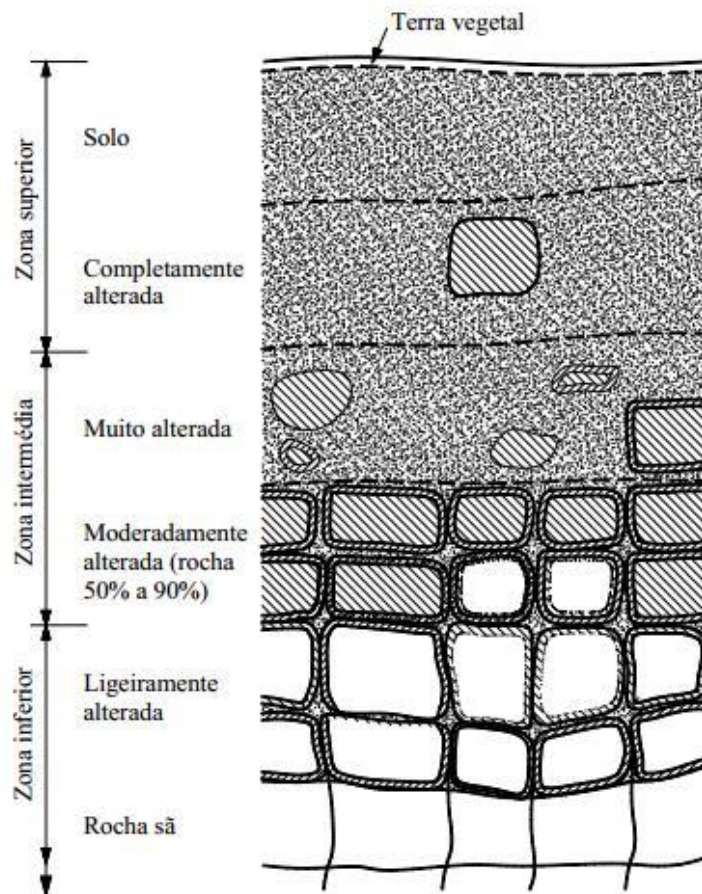


Figura 6 - Perfil típico de alteração de um maciço rochoso de natureza granítica com zona superficial alterada e com solo residual. (Little, 1969)

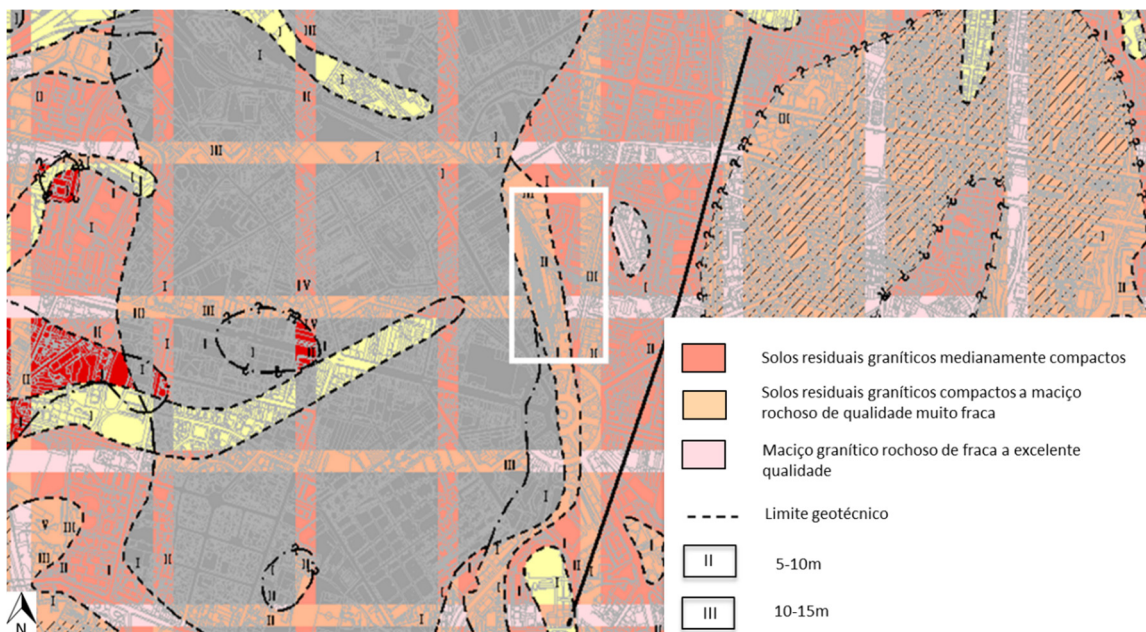


Figura 7 - Carta de zonamento geotécnico do Porto na escala 1:10000 – (Extraído de Câmara Municipal do Porto – In: COBA, 2003)

3.4. Enquadramento geológico-geotécnico do Ramal-1

O troço em túnel do Ramal-1, está essencialmente assente sobre o limite de litologias de depósitos de cobertura (aterro) e o Granito do Porto, iniciando no PK 0+000 até ao PK 0+340, ocupando deste modo 340m (Figura 8).

Do ponto de vista geotécnico, a zona circundante do troço acima descrito, é essencialmente rocha pouco alterada (W_2) a medianamente alterada (W_3), com grau de fracturação variando entre F_{1-2} e F_{2-3} , com um GSI compreendido no intervalo de [30-86], e um RMR variável entre [30-80] que indica um maciço bom a razoável, traduzindo-se deste modo em um zonamento geotécnico G_{2-3} .

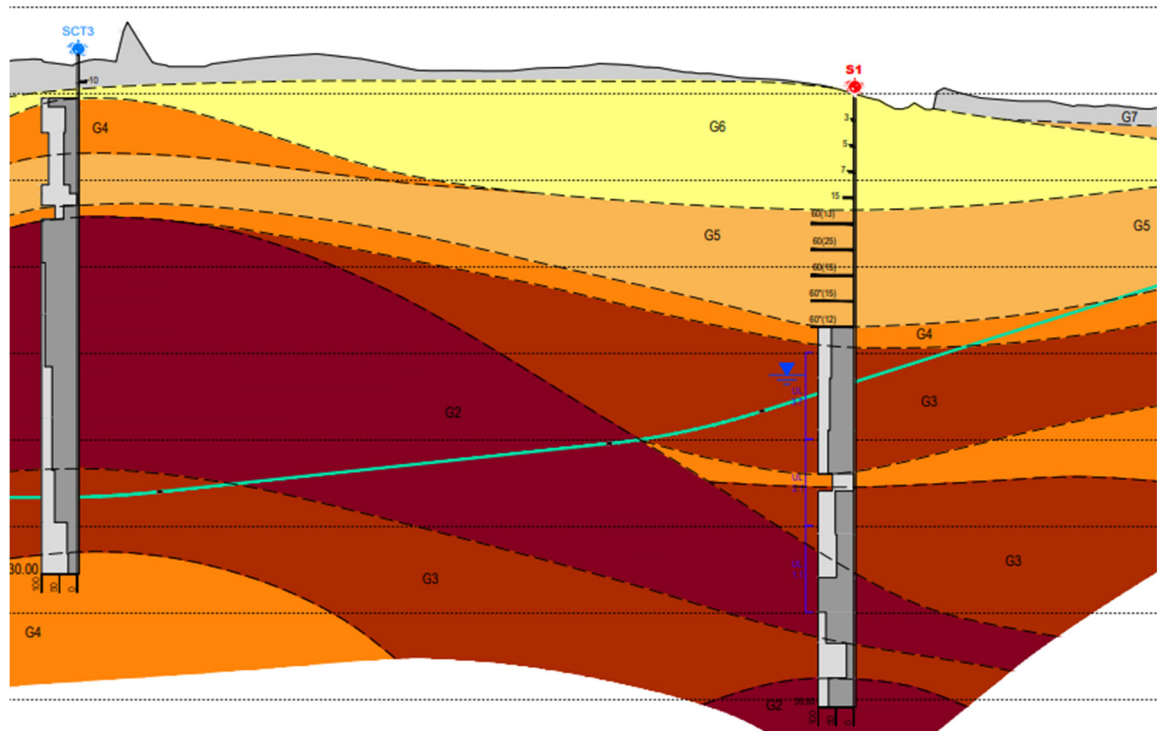


Figura 8 - Excerto do perfil longitudinal geotécnico do Ramal 1 (Ver Legenda no Anexo I), Escala: H – 1:1000, V – 1:200. (Fonte: SENER, CJC Engenharia e Projetos, NSE Engineering, Memória Descritiva - Volume 4, 2019)

3.5. Configuração e Geometria ao longo do túnel do Ramal-1

O Ramal-1 assegura a ligação funcional da Linha Rosa do Metro do Porto, Términus Boavista/Casa da Música e as restantes linhas A, B, C, E e F, e, por via dessa ligação, possibilita o acesso ao PMO de Guifões. Para além do anteriormente mencionado, proporciona ainda a injeção e a retirada de veículos no início e fim do serviço de forma direta e sem recurso a manobras em contra-via.

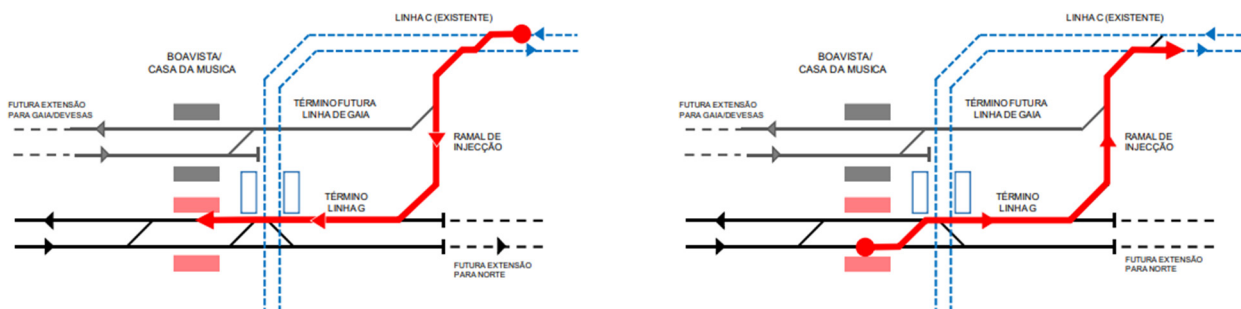


Figura 9 - Injeção e recolha de veículos no Ramal-1. (Extraído de: CJC-Projetos de Engenharia, SENER, NSEENGINEERING, 2019)

Foi concebido em projeto como túnel, sendo que a trincheira coberta existente tem a funcionalidade de via de acesso para os meios pessoais e movimentação de equipamento na fase de obra, como também de assegurar a ligação para o túnel, e o túnel que é o objeto deste trabalho, foi concebido para interligar as linhas já existentes com a Linha Circular do Metro do Porto.

Para a obra subterrânea em apreço, recorre-se ao método de escavação sequencial NATM, que segundo (Pires, 2016), consiste em fazer escavação sequencial em solo ou rocha que permite uma melhor acomodação do maciço devido ao alívio das tensões iniciais, a qual resulta na redistribuição das tensões, e assim, logo após a escavação realiza-se a instalação do sistema de suporte.

O túnel do Ramal-1 é de via simples, e a geometria das secções é variável ao longo da sua extensão de acordo com o projeto e teve como base o comportamento do maciço envolvente, sendo distribuída na seguinte sequência:

- Secção tipo R de via simples – **PK0+000 – PK 0+080** - Câmara de alargamento do Ramal-1 (35m) e o túnel (45m).
- Secção tipo R de via simples: **PK 0+080 – PK 0+140** – Túnel – compreendendo uma extensão de 60m.
- Secção tipo M de via simples: **PK 0+140 – PK0+235** – Câmara de alargamento do Ramal-2 (41m) e túnel, (54m), compreendendo uma extensão total de 95m.
- Secção tipo S de via simples: **PK 0+235 – PK 0+340** – Túnel alargado (10m) e túnel (95m), compreendendo um comprimento total de 105m.

Esta geometria da secção tipo R da Figura 11 é representativa, e foi escolhida para ilustração por ser dominante ao longo da extensão do túnel do Ramal-1, e semelhante a esta encontram-se no Anexo II as restantes secções tipo M e S, que variam até 0.12 metros em largura, e 0.005 metros em altura.

3.6. *Condicionantes do túnel do Ramal 1*

Igualmente ao traçado da Linha circular no geral, existem fatores que na execução do projeto, foram apontados como condicionantes que interferem no traçado do Ramal-1, sob os pontos de vista:

- a) Operacional e de manutenção;
- b) De ordenamento físico e patrimonial.

a) Operacional e de manutenção

- i. Términos: o traçado em planta e perfil foi estudado de forma a permitir a implantação dos aparelhos de mudança de via requeridos pela operação de inversão e estacionamento nos terminos Boavista/Casa da Música e Liberdade, e injeção ou retirada de composições no término Boavista/Casa da Música, para o início ou fim de serviço (Figura 12 a));
- ii. Ligação à rede ferroviária existente entre a zona da estação da Casa da Música e das Linhas A, B, C, E e F, condiciona o traçado do Ramal de injeção, em planta e em perfil, sendo a solução adotada a execução de uma trincheira coberta pouco antes do início do túnel (Figura 12 b)).



a)



b)

Figura 12 - Fotografias capturadas por equipamento aéreo não tripulado, com acompanhamento da autora na zona envolvente dos fatores operacionais para o Ramal-1. a) Localização do Términos. b) Local de conexão entre o Ramal-1 e as linhas A, B, C, E e F.

b) Ordenamento físico e patrimonial

- i. O viaduto da rua de Domingos Sequeira, condiciona o traçado em planta do Ramal de Injeção (Figura 13 a));
- ii. Supermercado Mercadona, foi verificada a compatibilidade do perfil do túnel com a implantação em alçado desta edificação. Com a informação disponível, concluiu-se que é possível passar o túnel por baixo do referido estabelecimento comercial (Figura 13 b)).



a)



b)

Figura 13 - Fotografias capturadas por equipamento aéreo não tripulado, com acompanhamento da autora na zona envolvente dos fatores de ordenamento do território e patrimonial para o Ramal-1. c) Viaduto Domingos Sequeira. d) Edifício Mercadona.

Atendendo ao carácter fortemente urbano da empreitada, o tema da monitorização do Túnel assume uma grande relevância, pelo que se selecionou para acompanhamento no âmbito do estágio. Neste enquadramento, nos capítulos seguintes detalha-se numa primeira fase, o plano de instrumentação implementado com detalhe dos procedimentos de instalação, e por fim os resultados obtidos com a respetiva interpretação.

Capítulo IV

Plano de Instrumentação

(página propositadamente em branco)

4. Plano de Instrumentação

O plano de instrumentação da empreitada tem como base a distribuição dos instrumentos, a quantidade dos mesmos e a periodicidade de leituras, bem como os níveis de referência de alerta e de alarme respetivamente, definidos em projeto.

Para uma melhor perceção do comportamento do túnel do Ramal-1 da Linha Circular do Metro do Porto na fase sua fase construtiva, o âmbito do plano de instrumentação tem em conta:

- As vias das linhas em serviço do Metro do Porto;
- O Viaduto da Rua Domingos Sequeira;
- Edificações, na envolvente, suscetíveis a serem afetadas numa distância de 50m para cada lado do eixo da via;
- O maciço envolvente e
- A própria estrutura em construção.

Os equipamentos instalados, são a principal ferramenta no Projeto, podendo incluir as grandezas a avaliar mencionadas abaixo:

- Controlo de deformações superficiais do maciço e das estruturas e edificações na zona envolvente
- Controlo de deformações no maciço;
- Controlo do nível freático;
- Controlo de deformações na obra;

Tendo em conta estes pressupostos de acordo com o previsto em projeto, até à presente data estão instalados no total 184 dispositivos, dos quais, 123 estão instalados ao longo do túnel, e 63 ao longo da trincheira coberta. Os referidos dispositivos ao longo do maciço envolvente do túnel, distribuem-se da seguinte forma:

➤ **Maciço**

- 12 Extensómetros;
- 12 Prismas na tampa dos extensómetros;
- 18 Marcas de superfície;

-
- 5 Pontos *centaure*;
 - 2 Indicadores de nível de água;
 - **Edificações/estruturas**
 - 30 Pinos de nivelamento (28 substituídos por prismas reflexivos);
 - 8 Alvos/prisma reflexivos (Via Linha de Metro);
 - **Interior do Túnel**
 - 36 Alvos/prismas reflexivos nas secções de convergência.

4.1. Deformações no maciço

No interior do maciço em profundidade - Inclínómetros

Os inclinómetros permitem quantificar movimentos sub-horizontais em profundidade, a partir de variações angulares registadas pela sonda inclinométrica designado torpedo, que desliza no interior da calha inclinométrica. Podem ser utilizados para controlar estruturas de suporte, maciços de terreno natural e aterros, durante as fases de construção e exploração da obra.

Os inclinómetros instalados em obra, são materializados por tubo guia de alumínio ou PVC com diâmetro de até 85mm, dotadas de 4 ranhuras ortogonais que permitem o posicionamento do torpedo (Figura 14).

São instaladas no interior de furos de sondagem ou em furos de estacas de contenção, com diâmetro adequado em função do diâmetro da calha e do método de selagem adotado.

Para que a leitura seja observada, vai-se recorrer a uma sonda inclinométrica que faz a respetiva medição, constituído por uma caixa de leitura, uma sonda e uma bobina de cabo que tem uma marca a cada meio metro e que conecta a sonda e a caixa de leitura.

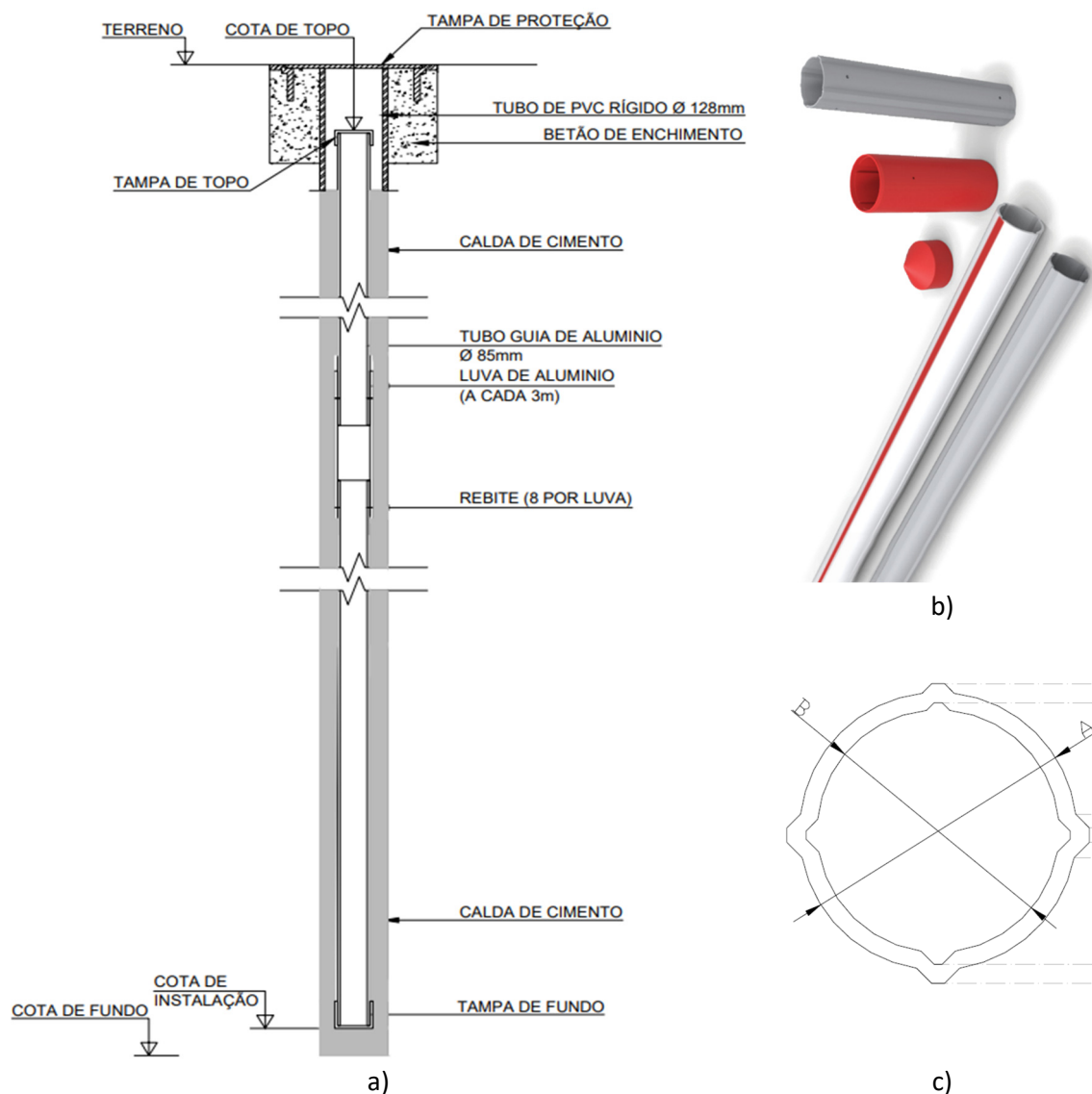


Figura 14 - Inclínómetro: a) Pormenor do inclínómetro. (Fonte: Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda); b) calha inclinométrica em tubo PVC (Fonte: www.sisgeo.com); c) Ilustração da secção da calha inclinométrica (A-diâmetro externo 80.5mm, B-diâmetro interno 76.6mm). (Fonte: SIXENSE, 2021. Dados técnicos – Calha inclinométrica. SIXENSE/Ferrovia ACA. (Relatório inédito))

No interior do maciço em profundidade – Extensómetro

Tal como mencionado no Capítulo 2 deste trabalho, os extensómetros de vara são instalados em furos com a finalidade de monitorizar deslocamentos verticais em profundidade (assentamentos), e neste projeto os extensómetros apresentam uma única vara sendo por esta razão designados monoponto.

Para tal, um equipamento de comprimento pré-estabelecido, consoante a profundidade desejada, é inserido dentro de um furo, e nesse contexto, na Figura 15, estão representados os detalhes do equipamento em estudo

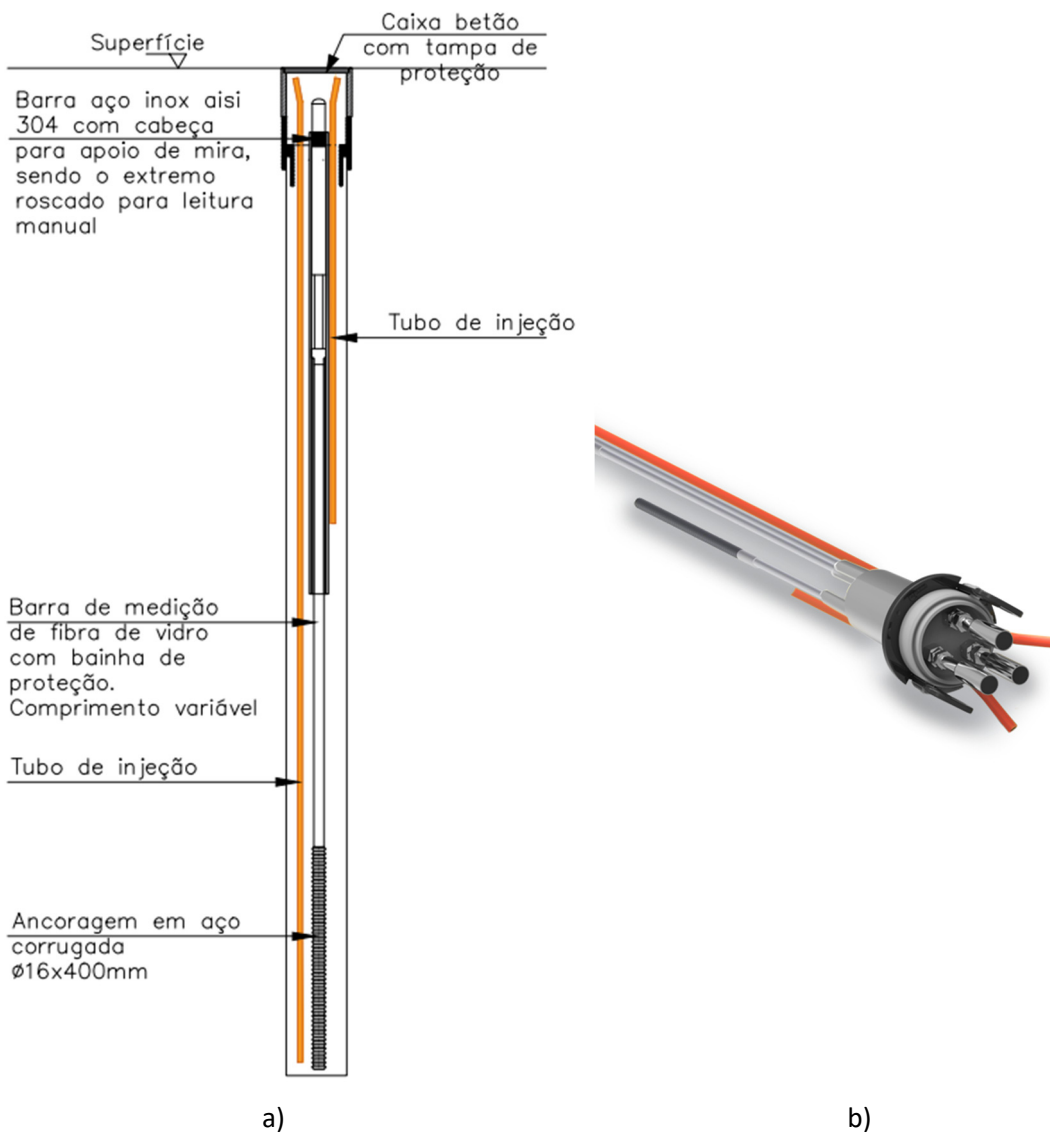


Figura 15 - a) Pormenor dos extensômetros. (Fonte: Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda; SIXENSE, 2021). b) Ilustração detalhada do extensômetro monoponto. (Fonte: www.sisgeo.com/products/extensometers/item/mpbx-multipoint-borehole-extensometers)

Na superfície - Marcas Topográficas

O controlo à superfície de assentamentos verticais, será efetuado através de marcas para nivelamento topográfico de precisão, instaladas de acordo com o previsto no Projeto.

As marcas são constituídas por barra de aço galvanizado, com comprimento compreendido entre os 60 a 80 cm, soldada com uma chapa na base, e com uma calote semiesférica no topo (Figura 16).

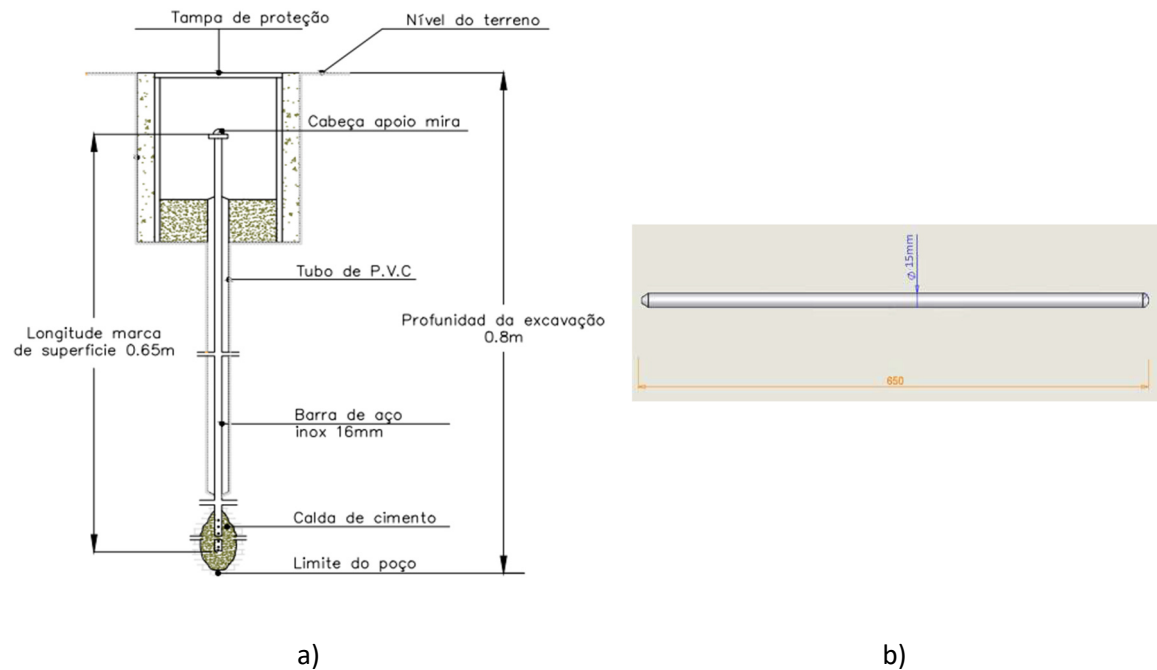


Figura 16 - a) Pormenor da marca de superfície. (Fonte: Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda; SIXENSE, 2021). b) Marca de superfície –ilustração. (Fonte: Dados técnicos – Marcas de superfície. SIXENSE/Ferrovia ACA, 2021)

4.2. Medição do Nível Freático

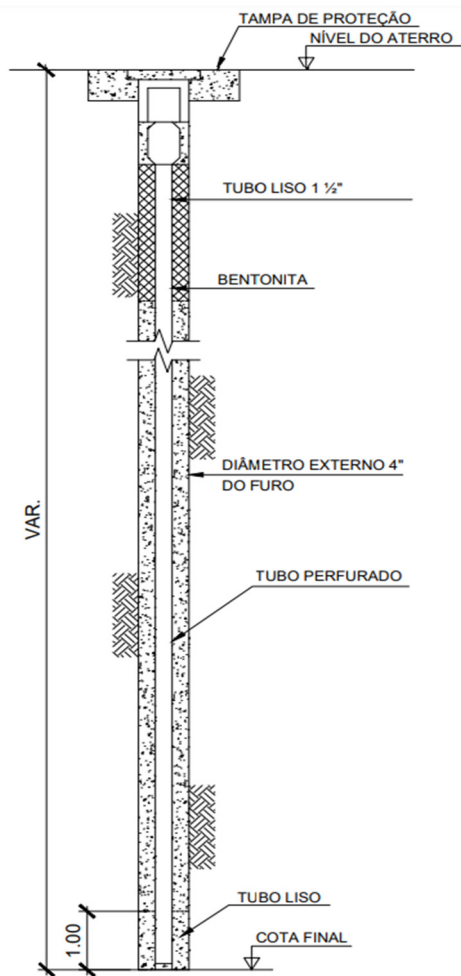
No maciço - Indicadores de nível de água (INA)

O objetivo do Indicador de nível de água é de medir e controlar o nível do lençol freático subterrâneo.

O tubo usado para o indicador de nível de água (Figura 17b)), é um tubo instalado verticalmente no terreno através de perfuração até a altura do lençol freático a controlar, de modo que a altura da água dentro do tubo seja igual ao nível de água do lençol freático. Mediante um levantamento topográfico do topo do Indicador de nível de água e tendo em conta a medição da profundidade do nível de água dentro do tubo, obtém-se o nível do lençol freático em altitude.

A leitura do nível de água dentro do piezómetro é efetuada com recurso a uma sonda elétrica, com sinal sonoro e luminoso, que consistirá fundamentalmente numa fita métrica com um sensor na extremidade inferior e que irá sendo introduzida no furo. A leitura da profundidade a que o nível de água ocorre será direta na fita graduada em centímetros.

Antes da primeira leitura é esgotada a água existente no furo. As primeiras leituras são executadas em dias consecutivos após a instalação, para permitir a avaliação da estabilização dos níveis.



a)

b)

Figura 17 - a) Pormenor de um INA. (Fonte: Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda). b) Tubo piezométrico PVC. (Fonte: www.plafondplast.com/es/tubos-de-pvc-rra-piezometros)

4.3. Deformações nas edificações/estruturas

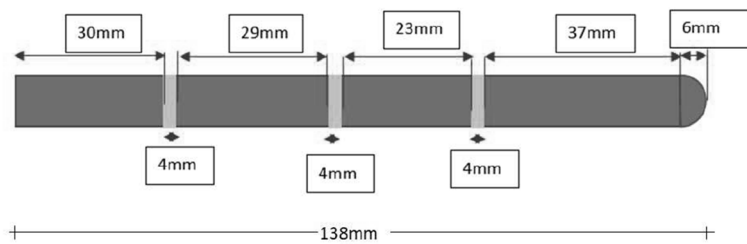
Edifícios na envolvente - Pinos de Nivelamento

Para o controlo das deformações dos edifícios, estão instalados os Pinos de nivelamento que recorrem à leituras topográficas.

Estão instaladas nas fachadas dos edifícios, num mínimo de 2 ou 3 pinos, em dois planos diferentes em relação à obra, em função da posição do edifício.

O equipamento a utilizar para a sua observação será idêntico ao indicado para as marcas de superfície, a régua e o nível.

Cada procedimento de leitura terá de iniciar-se em perno de nivelamento profundo instalado no início da obra e terminar no mesmo ponto fixo, sendo que os resultados obtidos serão apresentados sob a forma gráfica mostrando o deslocamento vertical em função do tempo.



a)



b)



c)

Figura 18 - a) Pormenor de um pino de nivelamento. (Fonte: Dados técnicos – Marcas de superfície. SIXENSE/Ferrovial ACA, 2021). Manual de procedimento de instalação e medição. b) Imagem do pino de nivelamento (Fonte: www.metbusquet.com). c) Fotografia capturada pela autora de pino de nivelamento cravado na fachada de um edifício, na Avenida de França)

Edifícios na zona envolvente – Alvos-Prismas Refletores

Para o controlo de assentamentos em edifícios, estão instalados alvos refletivos em forma de prismas óticos, que no caso dos edifícios em situações de leituras complementares, estão instalados em concordância com os pinos de nivelamento para complementar a análise das leituras.

Os prismas óticos de referência estão dispostos em zonas ligeiramente afastadas da obra para serem consideradas fixas.

Para os alvos instalados nas edificações existentes, as leituras iniciais são feitas 3 vezes antes, de modo que a edificação instrumentada esteja sob influência da obra.



a)



b)



c)



d)

Figura 19 - a) e c) Ilustração dos alvos/prisma refletor. (Fonte: www.horizon.sg e www.survey.crkennedy.com.au) b) e d) Fotografias capturadas pela autora de alvos/prismas refletores topográficos (parafusados e colados) em edifícios da zona circundante

No maciço à superfície - Alvos/ prisma refletores de via

Os prismas de via implantados em estradas, (Figura 20c)) são projetados para serem instalados em tráfego ativo de vias, onde seria perigoso proceder às leituras sem interrupções da área a medir e por isso tem em conta a segurança rodoviária e das equipas de medição topográfica.

Assim o equipamento apresenta grande robustez sendo à prova de água, revestido de cobre de alta precisão e envolto em polímero indestrutível. Para além desta funcionalidade, o prisma de via pode ser instalado na tampa do extensómetro com o objetivo de verificar a influência dos valores à superfície em relação aos valores obtidos em profundidade.

A configuração do equipamento facilita ainda a sua leitura ao possuir uma ampla abertura na zona de fixação do prisma.

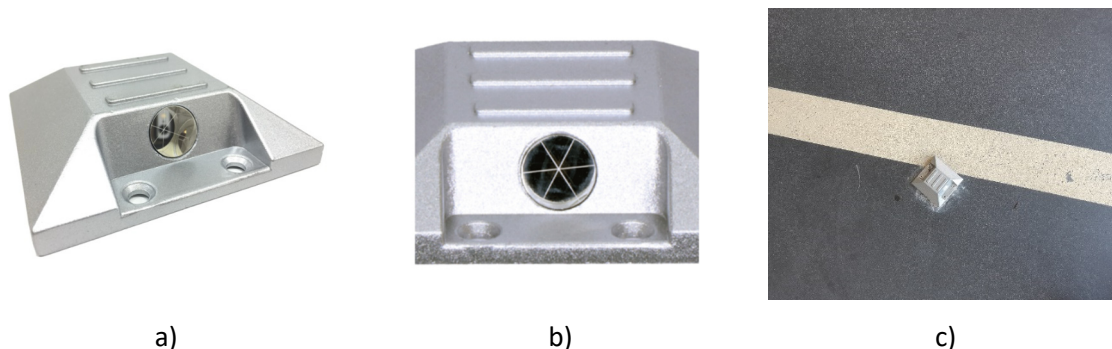


Figura 20 - a) e b) Ilustração de um prisma de via em duas perspetivas. Fonte: (www.mesures-systemes.fr). c) Fotografia capturada pela autora de prisma de via instalado no pavimento de edifício na zona da envolvente do Ramal-1)

4.4. Deformações na obra

Na obra em construção – alvos/prisma refletores-convergências

O método de controlo das convergências no caso dos túneis, estes dispositivos têm lugar em secções definidas em projeto para o efeito, em que são distribuídos 3 ou 6 instrumentos, isto é, um ou dois na abóbada (Figura 21 a)), e um ou dois em cada um dos hasteais (Figura 21 b) e c)), com o objetivo de se obterem deslocamentos transversais ao longo da extensão do túnel, e com base nesta configuração, é feita uma triangulação possibilitando a observação do comportamento do túnel devido as escavações decorrentes.

Os instrumentos para esta finalidade, estão devidamente marcados, tal como seguidamente ilustrado.

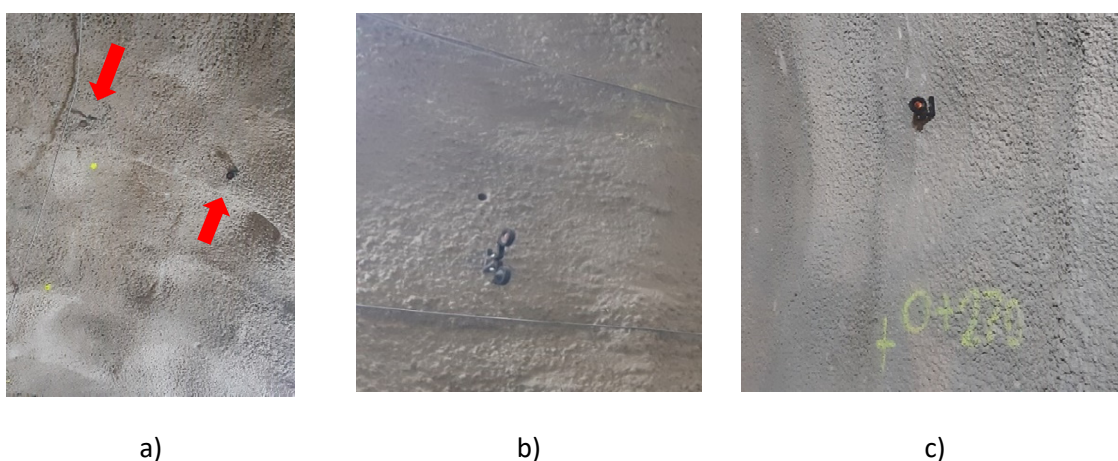


Figura 21 - Fotografias capturas pela autora da disposição dos alvos/prismas numa secção de convergência. a) 2 prismas colocados na abóbada do túnel numa secção de alargamento ao PK 0+155, b) 2 prismas colocados no hasteal esquerdo do túnel do Ramal-1, PK 0+295 e c) 1 prisma colocado no hasteal direito do túnel do Ramal-1, PK 0+270

4.5. Equipamentos de leitura

Estações totais robotizadas – Equipamentos de leitura topográfica (assentamentos à superfície e convergências no túnel)

A estação robotizada tem como base o princípio de funcionamento dos teodolitos, com o acréscimo do facto de poderem fazer a aquisição de dados de modo independente em tempo real, alcançar distâncias e elevações inalcançáveis por meios humanos com alta precisão, e por processar os dados e enviar para uma base de dados.

Para as obras de construção da Linha Circular do Metro do Porto, este equipamento é proposto para monitorizar todos os edifícios identificados dentro da zona de influência das escavações das obras subterrâneas, sendo lidos os prismas refletores instalados nos edifícios e nas estruturas na envolvente ou na estrutura em construção, nomeadamente nas vias em serviço do Metro do Porto, no viaduto Domingos Sequeira, bem como nos prismas de via e nas convergências no interior do túnel.

Tem como objetivo medir e obter os valores de assentamento (Z), podendo igualmente medir e obter os valores em planimetria (X e Y), sendo assim, aplicável para projetos relacionados com a deformação em 3 dimensões (3D).

São equipamentos versáteis e que fazem as medições de deformações através dos prismas até à ordem das centenas de metros, através da calibração com os pontos de referência, podendo também corrigir a temperatura ambiente.

Para além de fazer as medições nos prismas, podem também monitorizar pontos virtuais designados *centaure*, localizados em zonas importantes de serem monitorizadas, porém muito movimentadas ou de difícil acesso, enviando um sinal para um ponto fixo já projetado.

As medições feitas em pontos *centaure* são realizadas por visadas a laser diretamente na superfície do terreno, para o efeito, é realizada uma malha (Figura 22) previamente de acordo com as especificidades do projeto e da área a ser instrumentada. Em seguida, cada visada é verificada no campo para garantir a qualidade da superfície visada antes de iniciar os ciclos automáticos de medição.

Associado a isto importa mencionar os pontos de referência, que são pontos físicos e situam-se fora da zona de influência geotécnica e permitem o reposicionamento virtual da estação robotizada causada pelo movimento da mesma, como também permitem a calibração dos dispositivos à estação robotizada logo após a instalação dos mesmos.

O prisma de referência tem também a funcionalidade de verificar se algum ponto *centaure* sofreu algum movimento, e de corrigir as suas medições.

Estes pontos permitem também que as mesmas referências sejam utilizadas em diferentes estações robotizadas, obtendo deste modo uma rede equilibrada (Figura 23), e com base neste fator, as estações podem estar interconectadas, o que reduz o risco de erros.

Para que o alcance seja garantido em meio urbano, no caso de leituras automatizadas, as estações robotizadas encontram-se a uma altura de aproximadamente 3m, e são constituídas por uma fundação, um pilar isolado termicamente para evitar o impacto da temperatura, e uma proteção contra roubo, vandalismos (Figura 24d)). No interior da obra, as estações estão distribuídas ao longo do túnel para que sejam medidas as convergências, através dos prismas refletores (Figura 24c))

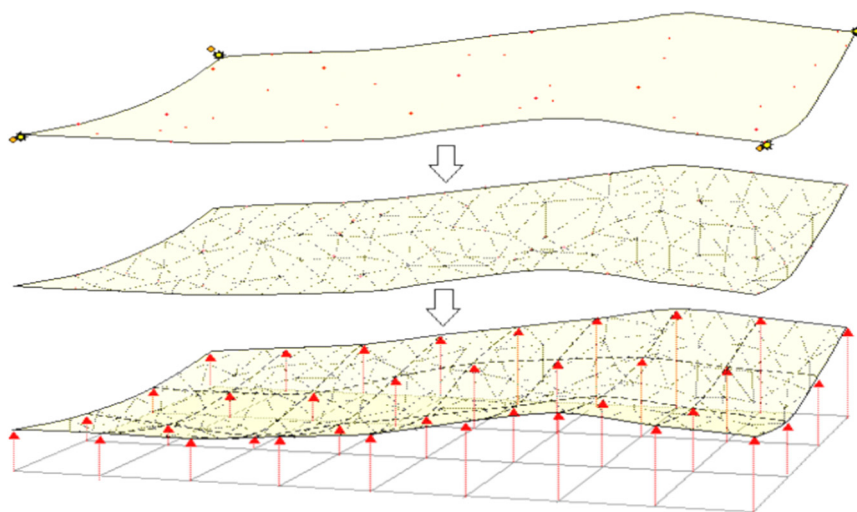


Figura 22 - Malha dos pontos Centaure (SIXENSE, 2021)

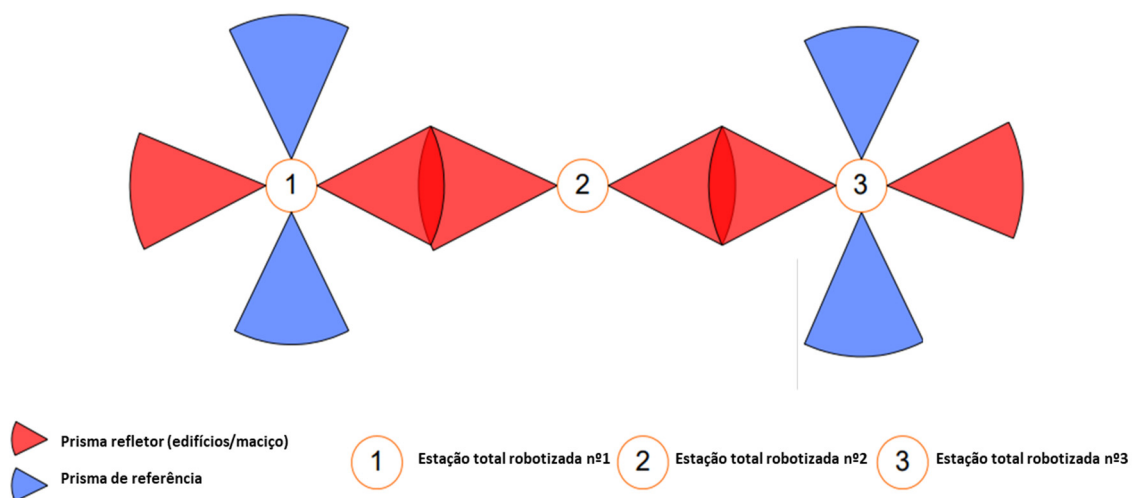


Figura 23 - Ilustração da rede de Estações robotizadas e pontos de referência. (Adaptado de SIXENSE, 2021)



Figura 24 - Fotografias capturadas pela autora da disposição de uma estação total robotizada. a) localizada em obra no Hospital de Santo António. b) localizada no interior da trincheira coberta/túnel. c) em meio urbano da zona envolvente na Rua General Norton de Matos. d) Pormenor da estação total robotizada: 1- Cyclop, 2-pilar com isolamento metálico, 3- fundação em sapata.

Unidade de aquisição (Data logger) – Recolha de dados do extensómetro

A aquisição dos dados é automática, os deslocamentos verticais são medidos na cabeça do extensómetro para albergar o transdutor potenciométrico, o qual está ligado a um nodo instalado dentro da caixa de proteção, que por sua vez a unidade de aquisição capta os dados do sensor a uma taxa de amostragem escolhida, transmitindo-os via rádio para uma porta de entrada de dados

(*Gateway*) que se encontra instalada a uma distância que permita a comunicação entre a mesma e o nodo, bem como de outros dispositivos similares configurados para o mesmo fim na vizinhança. Para que o coletor de dados (*datalogger*) funcione de forma adequada e assim sejam atingidos os objetivos pretendidos, devem-se ter em conta os seguintes requisitos:

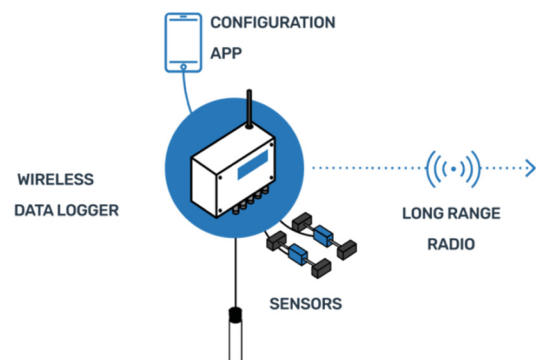
- Assegurar a estanqueidade do nodo através da utilização de um tubo de evacuação de água instalado no fundo da caixa, ou ainda o recurso a um gel de proteção colocado dentro do nodo que permite isolar os seus componentes do contacto com a água;
- A instalação do nodo dentro da caixa deve ser o mais alto possível para evitar ficar submerso, para tal pode fixar-se o nodo na parte lateral superior da caixa;
- Para garantir a transmissão de dados, a tampa da caixa deve ser de material compatível com a transmissão de sinal, geralmente utilizado compósito;

Ao passo que, para que uma observação remota seja eficaz, é importante que a porta de entrada de dados (*Gateway*) cumpra com os seguintes requisitos:

- Possuir fonte de alimentação elétrica independente;
- Estar instalada em posição elevada relativamente aos nodos, para garantir a boa comunicação e o maior número de nodos ligados à própria Gateway;
- Deve dispor de cartão SIM para transmitir os dados para uma página Web (site) localizada em Servidor do tipo FTP (File Transfer Protocol), de onde são enviados os dados para a visualização na plataforma de tratamento de dados (Geoscope).



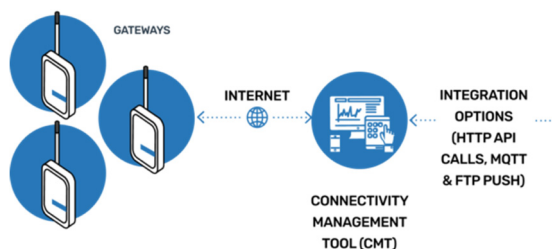
a)



b)



c)



d)

Figura 25 - Processo de recolha de dados: a) Unidade de aquisição (*datalogger*). (Fonte: www.sisgeo.com). c) Porta de entrada de dados (*Gateway*). (Fonte: www.rstinstruments.com). b) e d) Esquemática da recolha de dados no datalogger, e gestão dos dispositivos na Gateway, no âmbito da monitorização automatizada. (Fonte: www.worldsensing.com/pt)

Medidor do nível de água - Equipamentos de leitura do nível de água

O medidor do nível de água (Figura 26) , é constituído por uma ponta metálica acoplado a uma fita métrica, que se coloca no interior do tubo para a deteção do nível de água. O procedimento de leitura consiste na abertura da tampa e na colocação do medidor no tubo, e quando é detetado o nível de água um sinal sonoro é enviado sendo registado o valor da profundidade, obtido no topo do tubo.



Figura 26 - Medidor de nível de água. (Fonte: www.geosense.co.uk)

Sonda inclinométrica – Equipamento de leitura do ângulo nos inclinómetros

A sonda inclinométrica (Figura 27), é constituída pelo torpedo e por um cabo com indicadores distanciados de 0.5m em 0.5m que se coloca na calha inclinométrica até à profundidade total do inclinómetro. Quando se inicia o processo de medição das inclinações, posiciona-se um suporte no topo da sonda inclinométrica que servirá para auxiliar o técnico de medição a executar o procedimento com a maior precisão, como também para poder posicionar o torpedo. Desta forma, com o auxílio de um dispositivo conectado via *Bluetooth* ao suporte do cabo em espiral, vai-se

introduzindo o cabo e registando-se manualmente e de forma contínua os valores lidos de 0.5m em 0.5m.

Os inclinómetros podem fazer a medições em duas direções ortogonais designadas A e B, sendo o valor mais importante o de A, que se obtém quando as rodas do torpedo são colocadas no sentido das maiores deformações (no caso de escavações, ocorre na sua perpendicular).



Figura 27 - Sonda inclinométrica. (Fonte: www.geokon.com/GK-604D)

4.6. Discussão das causas de dupla leitura Manual e Automatizada

A introdução de meios modernos de recolha e processamento de dados pode contribuir para a eficiência da abordagem da monitorização e controle na medida que a aquisição dos dados em tempo real vai permitir uma resposta rápida de forma a antecipar eventuais riscos. Além disso, devem ser necessários desenvolvimentos a este respeito para obter uma avaliação abrangente dos benefícios proporcionados pela sua implementação prática em projetos de túneis.

Tendo em consideração o impacto e a complexidade da obra ao longo da cidade do Porto, considerou-se que para um melhor controlo das estruturas e da zona envolvente, na sua fase de construção, a adoção de tecnologias modernas pudesse ser eficaz, uma vez que oferece resultados em tempo real, bem como a possibilidade de aumento do número de leituras.

Efetivamente as leituras em tempo real são feitas recorrendo à dispositivos distribuídos ao longo da envolvente, e devido ao número de leituras obtido, só se torna possível a sua interpretação e análise através de Software especificamente desenvolvido.

O Software adotado é o GEOSCOPE[®], ferramenta que permite a observação em tempo real dos dados a partir do local de trabalho em gabinete, pode ser também considerado como um sistema aberto de informação para a previsão e a gestão do risco.

As leituras automatizadas têm também em conta que a sua frequência de leituras tende a ser maior nas proximidades do local onde decorre a escavação subterrânea, o que torna mais fácil a sua implementação, ultrapassando as dificuldades que se verificam nas leituras manuais.

Entretanto, importa referir que a evolução da tecnologia tem como base os métodos tradicionais, e por essa razão ainda existem ao longo da obra instrumentos onde as condições locais permitem a implementação de leituras manuais.

As razões pelas quais recorreu-se à aquisição automatizada dos registos, foram as seguintes:

- Leituras em tempo real;
- Leituras em locais inacessíveis ou de intensa ocupação, como são os meios urbanos;
- Limites de alarme para cada instrumento;
- Gestão em tempo real de uma rede de vários instrumentos;
- Leitura de dados e armazenamento dos diversos instrumentos;
- Transmissão de dados para uma plataforma de controlo remoto de tratamento e de publicação, que no caso concreto é o Software GEOSCOPE.
- Complementaridade com as leituras manuais para análise e interpretação de dados.

Leitura semi-automatizada

A leitura semi-automatizada, surge das adaptações feitas ou soluções encontradas no âmbito das leituras automatizadas para que seja possível continuar a ter o registo das deformações.

Assim, as leituras semi-automatizadas, têm um carácter pontual baseado no facto de existirem condicionalismos como a detonação de uma frente com recurso a explosivos (embora existam barreiras de proteção para minimizar os impactos), que poderá influenciar a funcionalidade do equipamento imediatamente mais próximo, como é o caso das estações robotizadas para a leitura das convergências do túnel, através dos prismas refletores.

O procedimento deste tipo de leitura consiste na remoção da estação total robotizada aquando da detonação, e posteriormente (algumas horas depois), é colocada no mesmo local onde voltam a ser feitas as leituras dos valores das convergências que são imediatamente inseridos na base de dados e logo de seguida apresentadas no Software interno (Geoscope) em tempo real, para garantir uma continuidade dos registos.

4.7. Procedimentos de instalação dos dispositivos

Neste tópico, irão ser abordados os procedimentos de instalação da instrumentação que se encontra ao longo do Ramal-1, da Linha Rosa do Metro do Porto. A descrição inicia-se pela instrumentação manual e de seguida aborda-se a instrumentação automatizada.

Faz-se notar que no início do estágio já existia instrumentação instalada no troço em questão, e para poder fazer a descrição do procedimento de instalação, tem-se como referência os locais onde a instalação da instrumentação decorreu ao longo do tempo do estágio curricular.

Assim, abordam-se as peças que compõem determinado dispositivo, a profundidade, como também o tempo de instalação dos mesmos.

Ao longo do acompanhamento da instalação da instrumentação prevista, foi possível constatar que existem alguns condicionalismos, tais como, condições climáticas e a problemática do alcance dos alvos/prismas refletoras à estação total, sendo que para esta última situação, os alvos podem ser instalados com pernos de diferentes comprimentos.

➤ **Instrumentação de leitura manual**

INA – Indicador de Nível de Água

O indicador do nível de água (INA), é constituído por:

- Tubo com ranhuras, em tramos de 3m (macho e fêmea com rosca);
- Tubo liso, em tramos de 3m (macho e fêmea com rosca);
- Areia calibrada de 1mm que tem a função de filtro;
- Bolas de bentonite em *pellets* que têm a função de tampão de estanqueidade;
- Tampão de fundo e do topo do tubo;
- Tela geotêxtil.

Os Indicadores de Nível de Água são constituídos por um tubo de PVC de diâmetro externo de 4 polegadas, ranhurado, com fendas da ordem dos 0,5mm, que permitirão a entrada de água, não condicionando o nível da mesma no interior do tubo, conforme especificado em Projeto.

Os Indicadores de Nível de Água são instalados em furos previamente executados com comprimento superior à profundidade de instalação de cerca de 0,5m.

O indicador de nível de água é colocado tramo a tramo, enroscando-se conforme se baixa o tubo e se vão agregando os tramos sucessivos. Seguidamente, o espaço anelar entre o tubo instalado e o terreno é preenchido com material filtrante na zona onde o tubo é perfurado, no tramo de tubo liso é envolvido por argila/bentonite, com o objetivo de assegurar a estanqueidade do mesmo. O tramo perfurado/ranhurado é envolvido em tela geotêxtil para mitigar um eventual assoreamento do mesmo pela ação da passagem dos grãos de areia ou outros materiais para dentro do tubo. Em cada piezómetro é colocada uma caixa de proteção com tampa metálica para evitar danos ao material, e situações adversas (ver Figura 28).

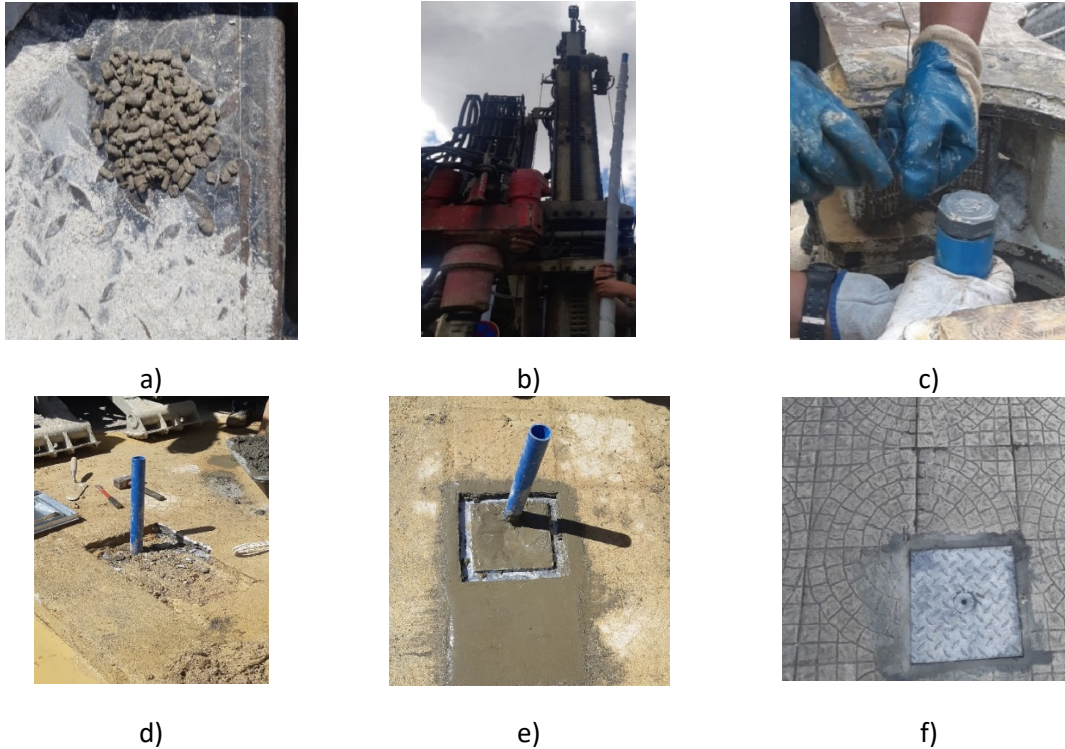


Figura 28 - Fotografias capturadas pela autora do processo de instalação do INA. a) Bolas de bentonite em *pellets*. b) Colocação do Tubo liso, em tramos de 3m com tela geotêxtil. c) Tubo com tampão de protecção superior. d) Tampa de protecção do INA ao longo das vias pedonais. e) cimentação e fixação do tubo do INA. f) tampa de protecção do tubo do INA.

Inclinómetro

O processo de instalação do inclinómetro pode ser feito no maciço ou em estaca, e para esta descrição, será detalhadamente descrito o procedimento acompanhado.

A instalação do inclinómetro decorreu no interior de estacas e teve em consideração a montagem de negativo, e o procedimento de instalação sucedeu como ilustrado na Figura 29, que se pode descrever da seguinte forma:

- Posicionar a armadura na posição vertical e introduzir a calha inclinométrica ao longo de toda a extensão da armadura, e ultrapassando ligeiramente o seu limite superior;
- Fixação da calha inclinométrica metálica na armadura através de abraçadeiras;
- Fechar a calha nas extremidades inferior e superior, respetivamente antes da introdução da calha na armadura;
- Movimentação do conjunto acoplado até ao furo da estaca;
- Colocação do conjunto antes montado, de forma cuidadosa ao longo do furo da estaca;

O procedimento final, segundo o manual de instalação é a betonagem da estaca e a fixação da calha inclinométrica na posição vertical unindo as juntas com rebites e selando a união com silicone e fita adesiva.



a)



b)



c)



d)

Figura 29 - Fotografias capturadas pela autora do processo de instalação do inclinômetro. a) Transporte através de grua móvel da armadura com o inclinômetro acoplado. b) colocação da armadura no furo. c) calha já instalada em toda a extensão da armadura, e por cortar d) Fim do processo de colocação da calha cortada (fotografia superior: sem tampa, fotografia inferior: com tampa de fecho do topo).

Marca de superfície

As marcas de superfície estão instaladas em perfis de instrumentação, e são constituídas por uma cabeça de leitura acoplada na extremidade de um varão de altura 0.60-0.8 metros de comprimento. Estes perfis têm um espaçamento variável motivado pela dificuldade de acesso aos locais de implantação.

O processo de instalação baseia-se em:

- Abertura de poço de reconhecimento de 30×30cm, até aos 0.8 metros de profundidade (Figura 30 a));
- Quando comprovada a não existência de serviços afetados, fixa-se a parte pontiaguda no terreno com recurso à calda de cimento (Figura 30c)), e a parte superior é isolada com anel em PVC que permite o posicionamento das régua de nivelamento (mira invar), possibilitando a leitura de deslocamentos verticais, como também permite a movimentação do perno e movimentos do terreno naquele ponto (ver Figura 30d));

-
- Por fim, coloca-se uma tampa para proteção.

É um processo com grau de dificuldade baixo, e teve em média uma duração de 1 hora e 45 minutos.

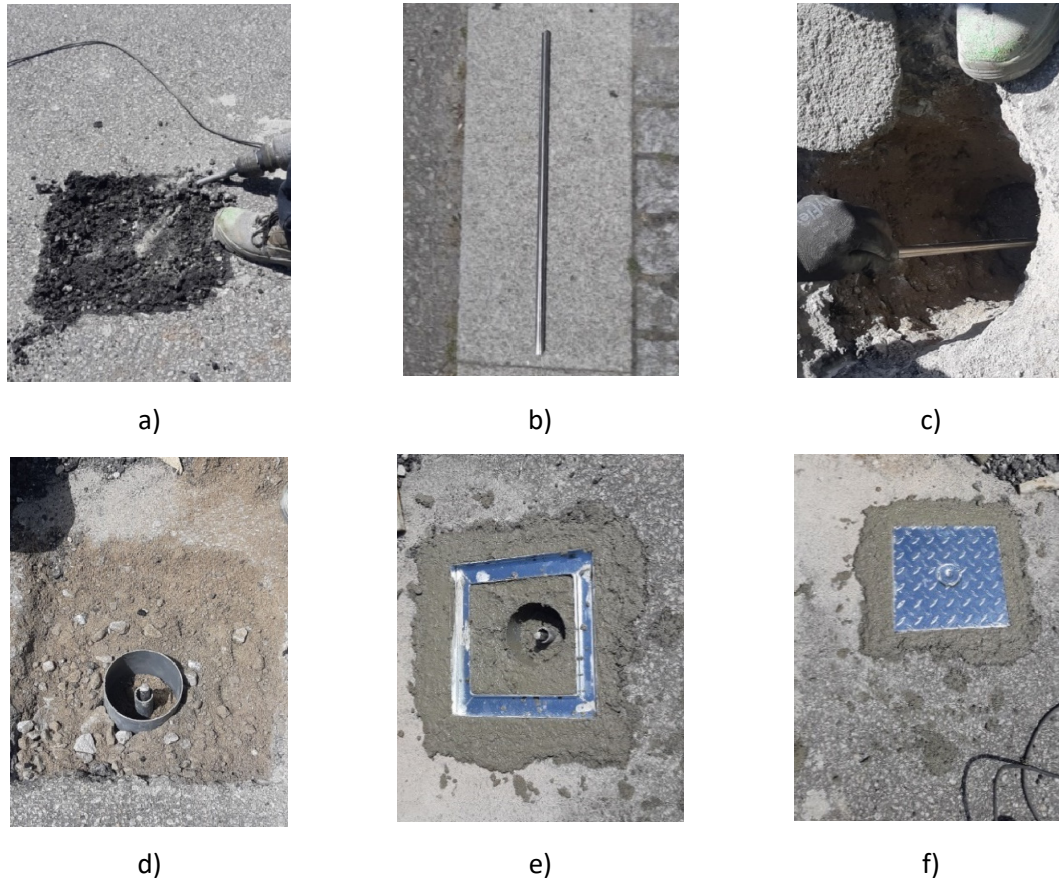


Figura 30 - Fotografias capturadas pela autora do processo de instalação da marca de superfície. a) abertura de poço de reconhecimento com martelo pneumático. b) vara de aço com 0.65m. c) fixação da extremidade inferior da vara de aço no poço. d) fixação da vara de aço com aro metálico no maciço. e) cimentação. f) colocação da tampa de proteção da marca de superfície.

Pinos de nivelamento

Tendo como base os procedimentos adotados pela subempreitada (Sixense, 2021), os pinos de nivelamento são afixados na fachada dos edifícios que se pretendem monitorizar, a aproximadamente 20cm do solo. Efetua-se uma furação na estrutura de aproximadamente 8 cm de profundidade e o furo deve ser limpo de qualquer tipo de resíduo, posteriormente, a sua fixação recorre ao uso de uma resina epóxi, que permite uma adequada e sólida aderência na estrutura.

Estes dispositivos são fabricados em aço inoxidável, e correspondem a pequenas barras com guias com 3 mm de comprimento e cabeça semiesférica.

A extremidade que contém as guias corresponde à parte ancorada na estrutura, ao passo que a parte visível, e que sobressai, varia até os 5 cm.

➤ **Instrumentação automatizada**

Extensómetro

Os extensómetros de vara são instalados em furos (Figura 31), podendo utilizar varas de diferentes comprimentos e possuir um ou mais pontos de medição. Neste projeto os extensómetros apresentam uma única vara, sendo por isso designados extensómetros mono-ponto, e nesse contexto, um equipamento de comprimento pré-estabelecido é inserido dentro de um furo, situando-se a 2 metros da abóbada do túnel.

- Os componentes principais do extensómetro de vara são:
- O local da âncora que está localizada na parte inferior;
- Vara de fibra de vidro protegida com a bainha de revestimento, dimensionada com a profundidade pré-definida no projeto;
- Cabeça de referência para leitura automática;

A sua instalação consiste na abertura de poço de reconhecimento de até 1.5m, e posteriormente procede-se a execução de um furo até à cota de instalação prevista para garantir a correta ancoragem ao terreno circundante, de seguida o conjunto completo do extensómetro é inserido e selado através de calda de cimento, solidarizando a ancoragem da vara com o terreno envolvente, que permite simultaneamente o movimento livre da mesma vara no interior de uma bainha de nylon.

No final, a parte da cabeça do extensómetro é protegida de movimentos, imprevistos e vandalismos, e é colocada uma tampa em material compósito, por ser resistente à passagem de tráfego rodoviário e ao mesmo tempo permite a passagem das ondas de rádio.

A aquisição dos dados é automática, os deslocamentos verticais são medidos na cabeça do extensómetro e através de um nodo instalado dentro da caixa de proteção, que transmite os dados via rádio para uma porta de entrada de dados (*Gateway*).

Durante o acompanhamento dos trabalhos de perfuração, observaram-se situações em que foi necessário fazer ajustes devido à localização, motivados pela existência de canais e cabos de telecomunicação.



a)



b)



c)



d)

Figura 31 - Fotografias capturadas pela autora do processo de instalação do extensómetro de leitura automatizada. a) Tubos extensométricos. b) Dispositivo a ser colocado em vara extensométrica e no furo executado. c) colocação de caixa de proteção do extensómetro. d) colocação de cimento para fixação do dispositivo.

Alvos/prisma refletor

Os alvos/prisma refletores são constituídos por um perno de comprimento variável e geralmente disposto na forma de “L”, em que na extremidade é fixada a outra parte do dispositivo com o feixe. O processo da sua instalação consiste em fazer a marcação do local tendo em conta o alinhamento com outros alvos já existentes, se for o caso, e o alcance da estação total robotizada. Posteriormente, é fixado com uma perfuradora portátil onde será aparafusado o perno, e por fim é ligada a componente superior, que registará os valores (Figura 32).

Para que o dispositivo comece a registar as leituras, inserem-se as suas coordenadas na base de dados do sistema interno da sub-empregada e de seguida, procede-se à sua zeragem na estação total robotizada para que as leituras sejam iniciadas.

De um modo geral, é um processo relativamente rápido que leva em cerca de 5 minutos.

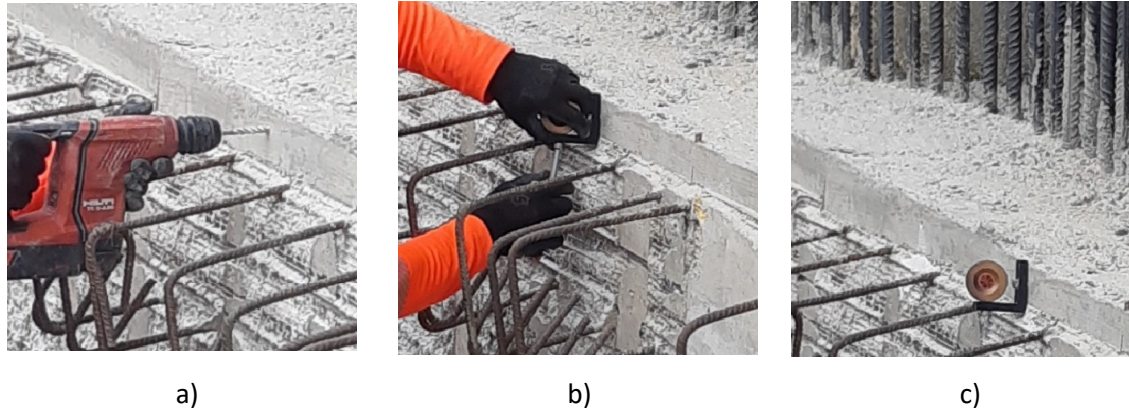


Figura 32 - Fotografias capturadas pela autora do procedimento de instalação dos alvos/prisma na estação da Galiza. a) Perfuração no local de instalação. b) fixação do perno. c) fixação da componente com o feixe. d) dispositivo já instalado e disposto para a estação total robotizada

Prismas de via

Os prismas de via são essencialmente peças unitárias constituídas por um material que permite estar exposto ao longo das vias com o movimento de pessoas e veículos, e a sua fixação é feita com recurso a uma perfuradora portátil nas extremidades. Idêntico ao procedimento final, descrito do alvo/prisma (ver Figura 32), para que o dispositivo comece a registar as leituras, inserem-se as suas coordenadas na base de dados do sistema interno da empresa e de seguida procede-se à sua zeragem na estação total robotizada para que as leituras sejam iniciadas.

Uma vez que são dispositivos colocados na via pública, para que se faça a sua instalação, este procedimento requer que não haja movimento de pessoas e ou veículos e, de um modo geral, é um processo relativamente rápido, que leva aproximadamente 5 minutos.

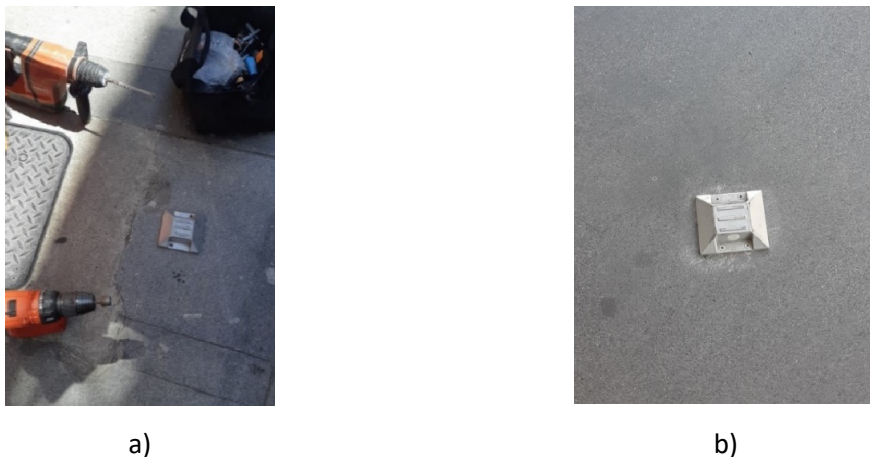


Figura 33 - Fotografias capturadas pela autora do procedimento de instalação de um prisma de via. a) Fixação com recurso à parafusos (dispositivo na fachada ao longo da Rua das Flores. b) Dispositivo disposto à estação total em fachada nas proximidades do Ramal-1

Condicionalismos na instalação da instrumentação

Ao longo do acompanhamento da instalação da instrumentação planejada em projeto, constatou-se que existem alguns condicionalismos neste tipo de obra, tais como, as condições climáticas do dia, a existência de cabos de telecomunicações para os dispositivos instalados no maciço e que por sua vez, poderá implicar que seja escolhido um novo ponto nas proximidades, como também o alcance dos alvos/prismas refletores à estação total, sendo que para contornar esta situação, os alvos podem apresentar-se com pernos de diferentes comprimentos (Figura 34).

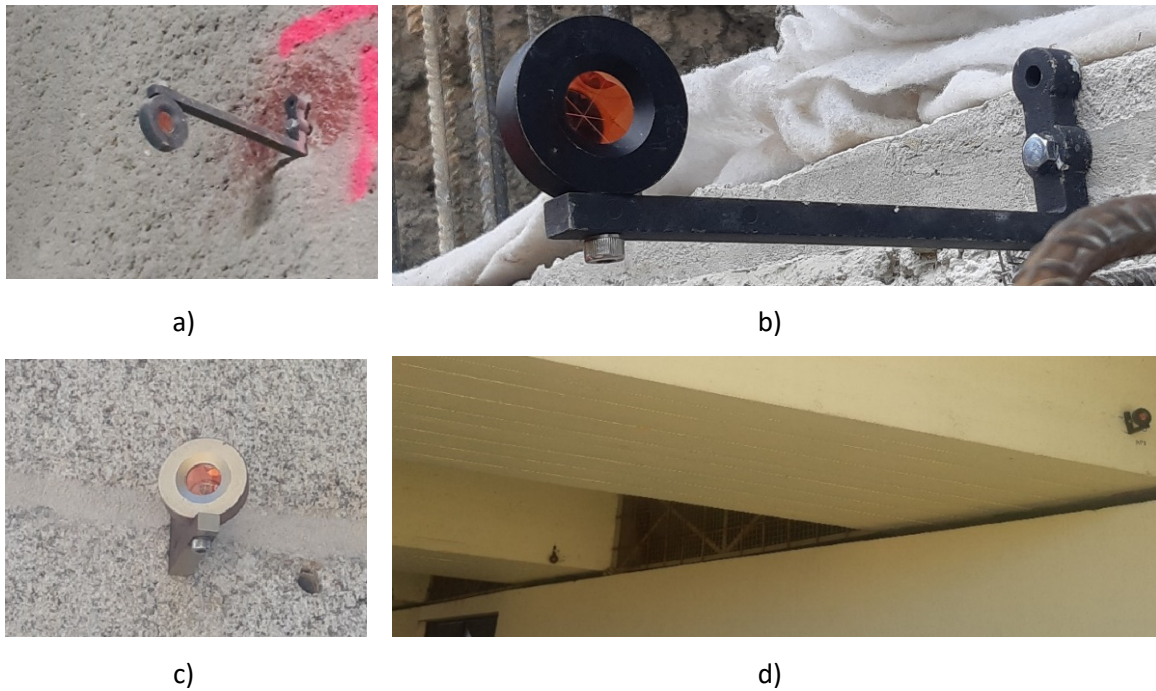
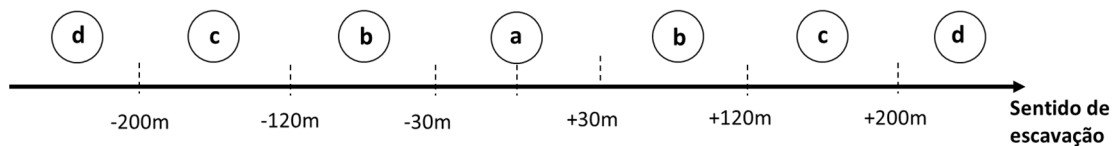


Figura 34 - Fotografias capturadas pela autora de alvos/prisma refletor instalados com diferentes disposições e comprimentos, para alcance à estação total. a) dispositivo instalado no hasteal esquerdo do túnel do Ramal-1. b) dispositivo instalado em edifício na Rua das Flores. c) dispositivo instalado na cortina de estacas da estação da Galiza. d) dispositivos instalados em série por baixo do viaduto Domingos Siqueira

4.8. Plano e procedimentos de leitura

Após a instalação, dá-se o início ao processo de observação. Assim, instalados os instrumentos, são calibrados e zerados pelo menos a 200 metros relativamente à frente de escavação do túnel, como definido em projeto, com o objetivo de se analisar o comportamento do maciço, ou do edifício no ponto em causa, antes do avanço da frente de obra.

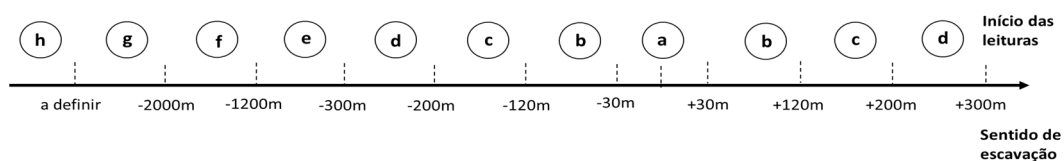
A frequência de medições proposta, foi estabelecida em projeto para o maciço envolvente e para as edificações circundantes, obedecendo ao que foi definido relativamente à evolução da frente de escavação ao longo da fase de construção conforme ilustrados nas Figuras 35 e 36.



Legenda

- a** Leitura 2x por dia
- b** Leitura diária
- c** Leitura 3x por semana
- d** Leitura semanal

Figura 35 - Frequência de leituras para dispositivos instalados no maciço. (Adaptado de Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda; SIXENSE, 2021)



Legenda

- | | |
|---|--|
| a Tipo 1: Leitura 2 vezes por dia
Tipo 2: Leitura diária | e Tipo 1 e 2: Leitura 2x por mês |
| b Tipo 1: Leitura diária
Tipo 2: Leitura 3x por semana | f Tipo 1 e 2: Leitura 1 vez a cada 3 meses |
| c Tipo 1: Leitura 3x por semana
Tipo 2: Leitura 2x por semana | g Tipo 1 e 2: suspender as leituras |
| d Tipo 1 e 2: Leitura semanal | h Tipo 1 e 2: Desmobilizar a instrumentação |

Figura 36 - Frequência de leituras para dispositivos instalados nos edifícios. (Adaptado de Ferrovia/ACA, 2021. Instrumentação - Pormenores, Notas e Legenda; SIXENSE, 2021)

➤ **Instrumentação a superfície**

Prismas refletores de via e Pontos Centaure

Para os pontos *centaure*, calcula-se com uma estação total a cota a partir de uma medição laser diretamente sobre o pavimento, desta forma, os resultados das medições são a mediana calculada a partir de várias medições ao longo do dia (24h), o que permite reduzir erros associados à temperatura e ao operador, porém, pode ser afetado por obstáculos e ruídos, gerando uma leitura anômala, que é desprezada com o tratamento dos dados. Neste enquadramento, a leitura procede-se conforme o Quadro 14.

Quadro 14 - Frequência de leitura dos prismas de via e pontos centaure. (Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA- procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, 2022)

Distância (m)	Método de leitura	Frequência de leitura
±120	Automático	6 leituras por dia (apresentando-se a mediana das leituras efetuadas)
±200	Semi-automático	3 leituras por semana
>200		1 leitura por mês

Marcas de superfície

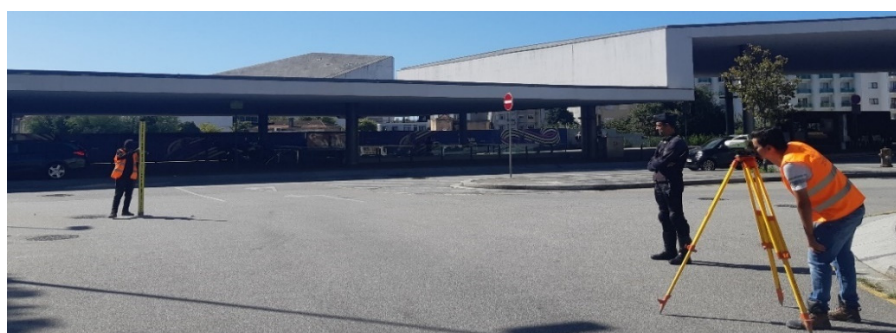
O método que se recorre para a leitura das marcas de superfície baseia-se em fazer um percurso com um nível e mira invar (Figura 37), por onde a cota é transportada com uma medição e dadas as condições, estas medições podem ser afetadas por vários fatores como a temperatura, visibilidade, erro do dispositivo e erro do operador. Neste enquadramento, a leitura procede-se conforme exposto no Quadro 15.



a)



b)



c)

Figura 37 - Fotografias capturadas pela autora do processo de leitura e aquisição de dados das marcas de superfície. a) Nível - equipamento de leitura e de aquisição dos dados. b) régua ou mira invar posicionada por cima do perno do nivelamento. c) equipa da topografia no processo de leitura com acompanhamento de agente policial.

Quadro 15 - Frequência de leitura das marcas de superfície. Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA-procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, (2022).

Distância (m)	Método de leitura	Frequência de leitura
±30	Manual	2 leituras por dia
±120		3 leituras por semana
±200		1 leitura por semana
>200		Leitura 1 vez por mês até 2 meses

➤ Instrumentação em profundidade

Inclinómetros

Quanto à leitura dos Inclinómetros, são feitas em intervalos regulares de 0,5 m ao longo da profundidade. Pela comparação das leituras numa certa data com a inicial, obtém-se a variação de inclinação em cada intervalo de medição. Através de constante K intrínseca do aparelho, serão então determinados os deslocamentos horizontais em cada intervalo, que são somados acumulativamente em relação a um ponto fixo no fundo da calha inclinométrica, para fornecer o deslocamento horizontal ao longo da profundidade.

Assim, as medições realizam-se da seguinte forma:

- Conectar o equipamento através do Bluetooth;
- Abre-se a tampa da calha inclinométrica;
- Introduce-se a sonda inclinométrica dentro da calha segundo a direção correta que é perpendicular à estrutura a medir;
- Baixa-se a sonda até a base da calha inclinométrica;
- Liga-se a caixa de leitura, introduz-se a sonda no tubo até à profundidade em metros que tem a calha, realizando medições a cada 0,5 m;
- A seguir realiza-se o mesmo procedimento, mas para este parâmetro secundário, deve-se girar a sonda 90 graus em relação à posição anterior, entretanto este parâmetro não é de grande relevância para o parâmetro em análise pois mede o deslocamento paralelo à frente a escavar;
- Gravar os dados em dispositivo, e desligar a caixa de leitura;
- Fechar a tampa da calha inclinométrica;
- Colocar a tampa de proteção.



a)



b)

Figura 38 - Fotografias capturadas pela autora no processo de leituras em inclinómetros. a) Dispositivos de registo dos dados. b) Torpedo – dispositivo de leitura.

Indicador de nível de água

Quanto à leitura dos INA, recorre-se a uma sonda indicadora de nível de água (Figura 39 a)) que mede a profundidade da água dentro do tubo (Figura 39 b)), e processa-se da seguinte forma:

- Abertura do indicador de nível de água;
- Colocação da sonda indicadora de nível de água na parte superior do tubo;
- O cabo desliza fazendo com que a sonda indicadora de nível de água desça por dentro do tubo;
- A sonda indicadora de nível de água começa a emitir sinal sonoro e acende uma luz, o que significa que se alcançou o nível de água no tubo;
- Medição através da leitura no cabo graduado da profundidade da sonda no tubo;
- Tomar nota desta medida na ficha de leituras;
- Retirar a sonda e fechar o indicador de nível de água;
- Colocar a tampa de proteção.



a)



b)

Figura 39 - Fotografias capturadas pela autora do procedimento de leitura de um INA. a) Posicionamento do equipamento de leitura. b) Leitura do nível de água.

Relativamente à frequência das leituras, tem-se em conta os aspetos seguintes:

- Quando há atividade de escavação: leitura diária nos INAs próximos da escavação;
- Durante período de obra, sem atividades de escavação em andamento: leitura uma vez por semana;

Quadro 16 - Frequência de leitura dos INA. (Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA- procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, 2022).

Distância (m)	Método de leitura	Frequência de leitura
±30	Manual	1 leitura por dia
±120		3 leituras por semana
±200		1 leitura por semana
>200		1 leitura por mês até 2 meses

Extensómetros de vara monoponto

Para começar a leitura automática dos extensómetros de vara é necessário realizar as medições iniciais, ou seja, a zeragem e estas medições começam a ser registadas em contínuo uma vez instalado o extensómetro, tendo como base a frequência de leitura definida.

A aquisição dos dados é automática (ver Figura 24), os deslocamentos verticais são medidos na cabeça do extensómetro através de um coletor de dados e do nodo instalado dentro da caixa de proteção, que por sua vez, transmite os dados para uma Gateway via ondas de rádio.

Para leituras complementares dos extensómetros com prisma de via na tampa, a leituras dos mesmos procede de modo igual aos prismas de via.

Quadro 17 - Frequência de leitura dos extensômetros. (Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA- procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, 2022).

Distância (m)	Método de leitura	Frequência de leitura
±30	Automático	2 leituras por dia
±120		1 leituras por dia
±200		3 leituras por semana
>200		1 leitura por mês até 2 meses

➤ **Instrumentação nos edifícios**

Pinos de nivelamento

O método de leitura dos pinos assemelha-se ao método de leitura nas marcas de superfície que, para a obtenção dos valores dos deslocamentos, necessita de um nível digital, um tripé para servir de suporte e uma mira invar. O percurso de leituras é feito em circuito fechado, utilizando o método geométrico, que consiste em medir as diferenças de nível de maneira direta.

Quadro 18 - Frequência de leitura dos Pinos de nivelamento. (Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA- procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, 2022)

Distância (m)	Método de leitura	Frequência de leitura
±120	Manual	6 leituras por dia
±200		3 leituras por semana
>200		1 leitura por mês

Alvos/prisma refletores

Os prismas, são semelhantes aos pontos Centaure, com a particularidade de as medições serem feitas por infra-vermelhos, tendo em conta a capacidade da estação total ter a capacidade de identificar com exatidão a posição dos prismas para determinar as suas coordenadas tridimensionais. Este método é mais preciso que as medições laser, e mais exato, graças à repetibilidade e redundância das medições.

➤ **Instrumentação no interior do túnel**

Prismas de convergência

No interior do túnel distinguem-se duas situações:

- Logo que possível após a execução do revestimento provisório são instalados os alvos refletores e iniciam as leituras automáticas;

-
- As leituras continuam automáticas até uma distância de 200m da frente de escavação, depois passam a semiautomáticas;

Quadro 19 - Frequência de leitura dos prismas de convergência. Adaptado de SIXENSE, Ferrovia/ACA-procedimento de instrumentação Ramal-1, Ramal-2 e Términus, (2022).

Distância (m)	Método de leitura	Frequência de leitura
0-100	Automático	6 leituras por dia
100-200	Semiautomático	3 leituras por semana
>200		1 leitura por mês até 2 meses

Tendo em consideração o procedimento e a frequência das leituras dos dispositivos apresentados, de seguida serão apresentados os resultados obtidos bem como a sua interpretação.

(página propositadamente em branco)

Capítulo V

Resultados e discussão

(página propositadamente em branco)

5. Registos da monitorização geotécnica ao longo do Ramal-1

Neste Capítulo, serão apresentados os registos das leituras dos dispositivos distribuídos na zona envolvente do Ramal-1 e procedendo-se à representação gráfica dos dois tipos de leitura implementados.

Foram escolhidos alguns dispositivos ao longo da zona de influência das escavações, e estão de seguida representados em planta para posterior análise e interpretação.

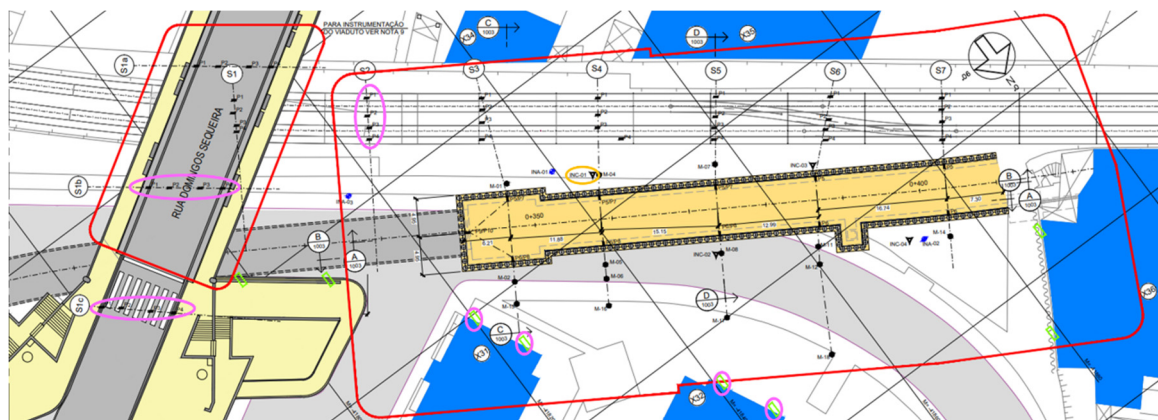


Figura 40 - Planta sem escala, com identificação dos prismas (rosa) e inclinómetro (cor de laranja), na zona de influência do Túnel do Ramal-1 e da Trincheira coberta. Extraído de: FERROVIAL/ACA – instrumentação do maciço e edifícios – Trincheira coberta, 2021.

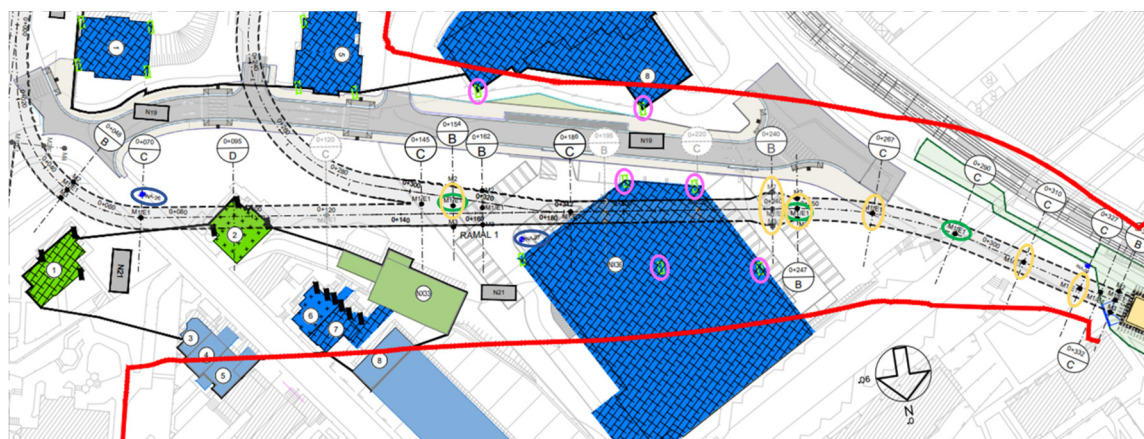


Figura 41 - Planta sem escala, com identificação dos prismas reflexivos (rosa), marcas de superfície (amarelo), extensómetros (verde), nível de água (azul), na zona de influência do Túnel do Ramal-1. Extraído de: FERROVIAL/ACA – instrumentação do maciço e edifícios – Rama-1, 2021.

Igualmente à planta, são também representados os tipos de secção de instrumentação (Anexo 2), que se encontram ao longo do túnel, com o objetivo de elucidar sobre a disposição dos mesmos em relação ao túnel, bem como os dispositivos que se encontram no interior do mesmo.

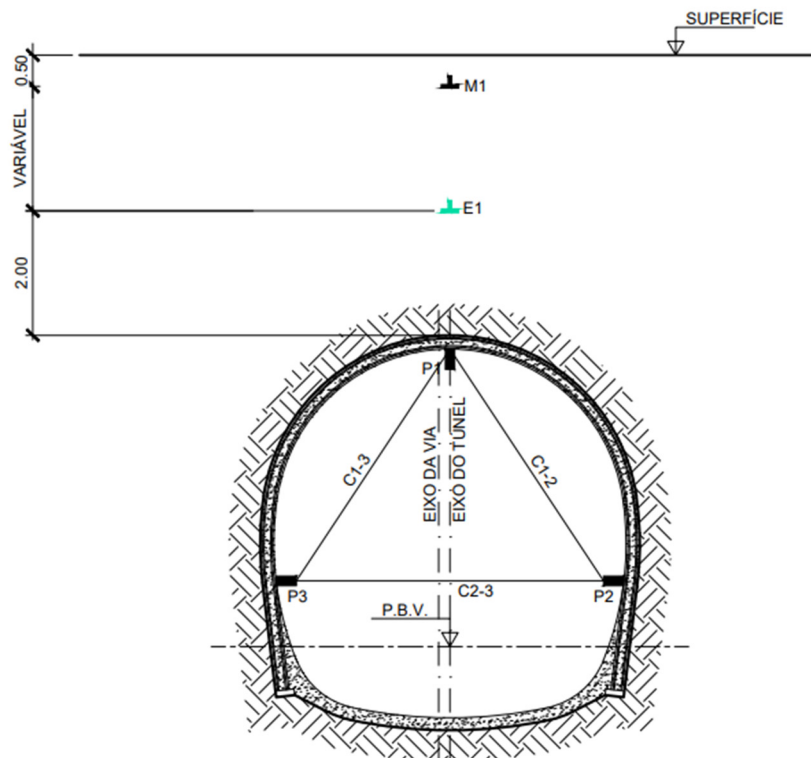


Figura 42 - Secção tipo C. (Extraído de: FERROVIAL/ACA – instrumentação/secções, 2021)

A secção de instrumentação acima representada na Figura 42, é a mais dominante ao longo do Ramal-1, e a sua diferença relativamente às demais, nomeadamente A, B e D, consiste no acréscimo de marcas de superfície ou ainda, extensómetros.

5.1. *Tratamento do registo de dados resultantes das leituras manuais e automatizadas*

O tratamento dos dados começou pela exportação dos gráficos no Software GEOSCOPE[®], que de seguida são colocados no Software Excel[®] dipostos em duas colunas, das quais a primeira inclui as datas das leituras que transpondo graficamente situam-se no eixo das abcissas, e a segunda coluna quando representada graficamente, é representada no eixo das ordenadas.

Para a representação gráfica referida dependendo da grandeza em verificação a profundidade em milímetros (mm) ou em metros (m), em função do tempo em meses agrupados todos os registos observados durante cada mês, sendo este tempo dividido num intervalo de 30 dias, iniciando desde a data da primeira leitura do dispositivo em estudo, até 1 de setembro do corrente ano, data que foi adotada para finalizar a colheita dos dados. Quando não existirem registos para essa data, considerou-se a data mais próxima.

Os registos das leituras serão representados pelo tipo de dispositivo e o respetivo ponto quilométrico, de acordo com a sequência decrescente das escavações do túnel que iniciaram no dia

12 de abril do corrente ano, iniciando ao PK 0+340 e progrediu até ao PK 0+154, correspondente à última data da recolha de dados. Posteriormente, vai ter em conta os níveis de referência, de alerta e de alarme, estabelecidos em projeto que tiveram como base as tensões e deformações admissíveis para o maciço e para as edificações da zona envolvente. Por fim é apresentada uma interpretação dos registos ao longo do tempo observado.

Inclinómetros

No caso dos inclinómetros, tem-se em conta o deslocamento em milímetros (mm) no eixo das abcissas, e a cota em metros (m) no eixo das ordenadas, em que um gráfico representa os registos das variações diárias.

O início do registo das leituras tem como base a data de zeragem dos mesmos, o que se reflete na maioria das representações gráficas dos dispositivos.

Para uma ilustração elucidativa, serão colocadas as fotografias do local em estudo, e o registo das leituras manuais estão representados pela coloração laranja, enquanto o registo das leituras automatizadas estão representados pela coloração azul.



Figura 43 - Fotografia capturada pela autora da localização do Inclinómetro no PK 0+330, no maciço exterior à trincheira coberta, na vizinhança do emboquilhamento do túnel

Quadro 20 - Formações atravessadas pelo inclinómetro ao PK 0+330.

Litologia: Granito	
Profundidade (m)	Grau de alteração e outros materiais
0 - 9	W5
9 - 13,5	W3

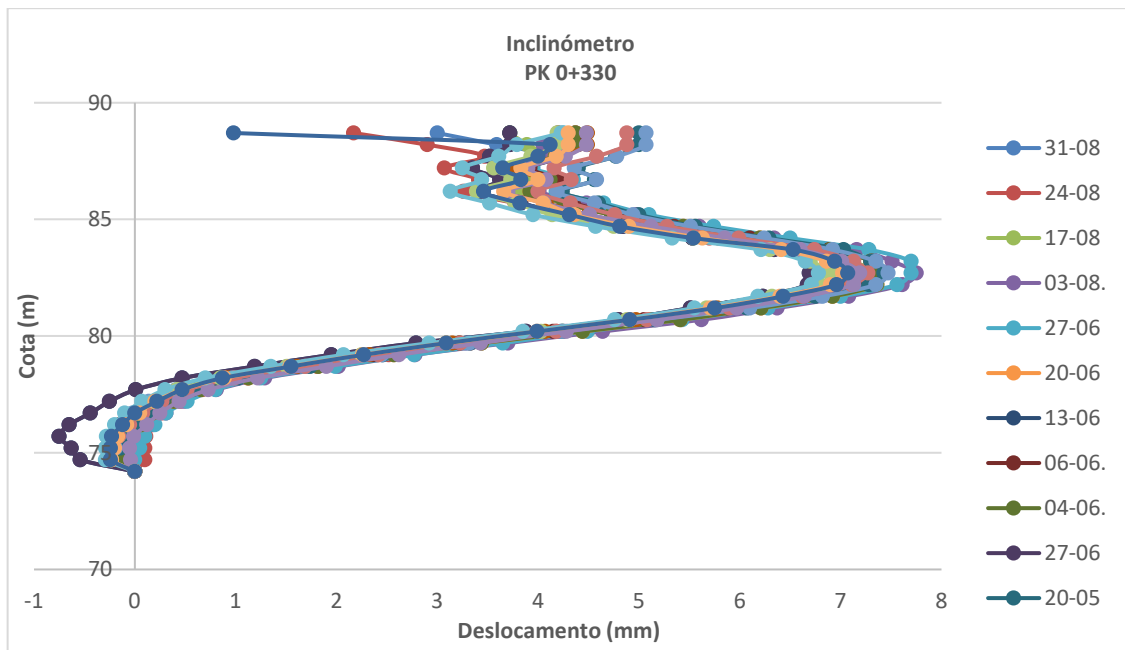


Gráfico 1 - Variação da inclinação no ponto PK 0+330

O inclinómetro situado no PK0+330, foi instalado no dia 26 de Junho do corrente ano, com uma extensão de 13,5m. A localização do mesmo tem como principal objetivo o controle de deformações no emboquilhamento do túnel.

Tendo como base o gráfico acima representado, pode-se verificar que os deslocamentos ocorrem no sentido do interior do túnel.

Este deslocamento é crítico entre a cota 80 a 84 metros, que se registou ao longo do período de leituras, desde a instalação do dispositivo até a última data de colheita dos dados.

Indicador de Nível de Água

Com vista a ter a informação do nível de água a uma distância de 7.85 metros em relação ao eixo do túnel, na Figura 44 abaixo está representado o Indicador de nível de água que teve o início dos registos no mês de abril até a última data de colheita de dados que aponta para 1 de Setembro.



Figura 44 - Fotografia capturada pela autora da localização do INA ao PK 0+173, no edifício Mercadona

Quadro 21 - Litologias atravessadas pelo INA, no ponto PK 0+173

Litologia: Granito	
Profundidade (m)	Grau de alteração e outros materiais
0 – 1.5	W5
1.5 - 7	W5 – caulinzado
7 – 15	W5
15 – 18	W4 – W3
18 - 24	W5 – W4

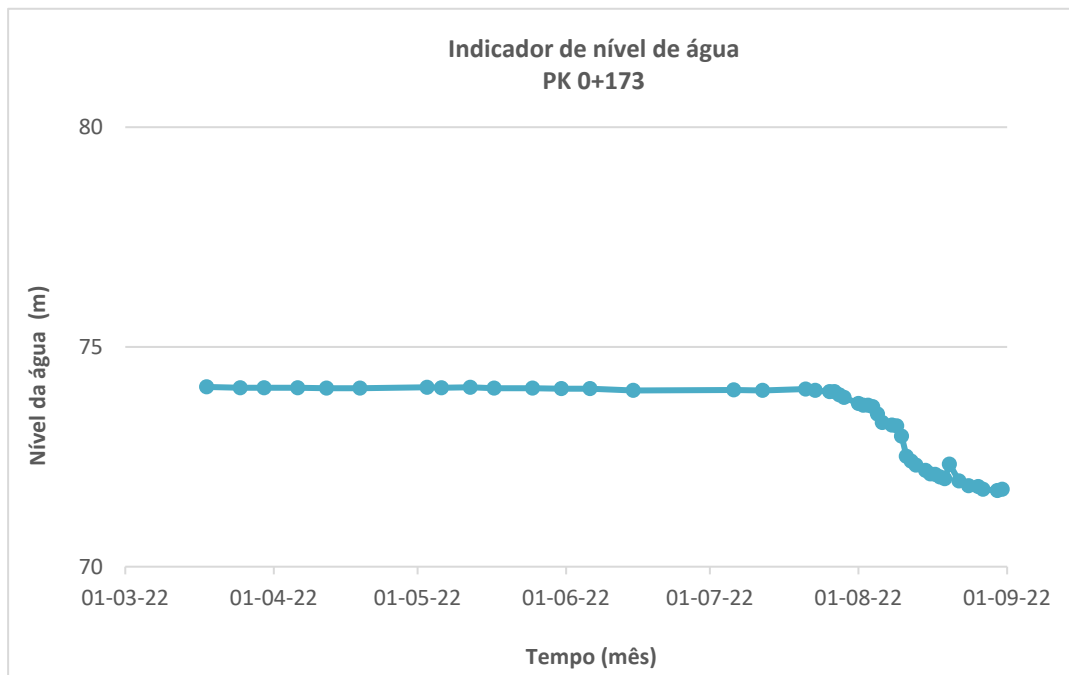


Gráfico 2 - Leitura manual do nível de água no ponto PK 0+173, no parque de estacionamento do edifício Mercadona

A partir do Gráfico 2, faz-se notar que desde o início da observação, o nível de água manteve-se quase constante até ao início do mês de Agosto data a partir da qual o nível freático começou a ser rebaixado, entre a cota 74 e 71,5m, correspondente a aproximadamente 2,5m.

Tal variação do nível freático teve como influência os trabalhos de escavação do túnel decorrentes nas proximidades (até 30m), e partir desse momento, a tendência do gráfico mostra, apesar de mais suave um contínuo rebaixamento.

De seguida, na Figura 45 está representado o Indicador de nível de água situado na Rua Vieira Portuense e dista a 6.63 metros metros em relação ao eixo do túnel.



Figura 45 - Fotografia capturada pela autora da localização do INA no PK 0+074, Rua Vieira Portuense

Quadro 22 - Litologias atravessadas pelo INA no ponto PK 0+074

Litologia: Granito	
Profundidade (m)	Grau de alteração e outros materiais
0 – 0.6	Aterro
0.6 – 10.9	W5-W4
10.9 - 22	W3
22 - 27	W2

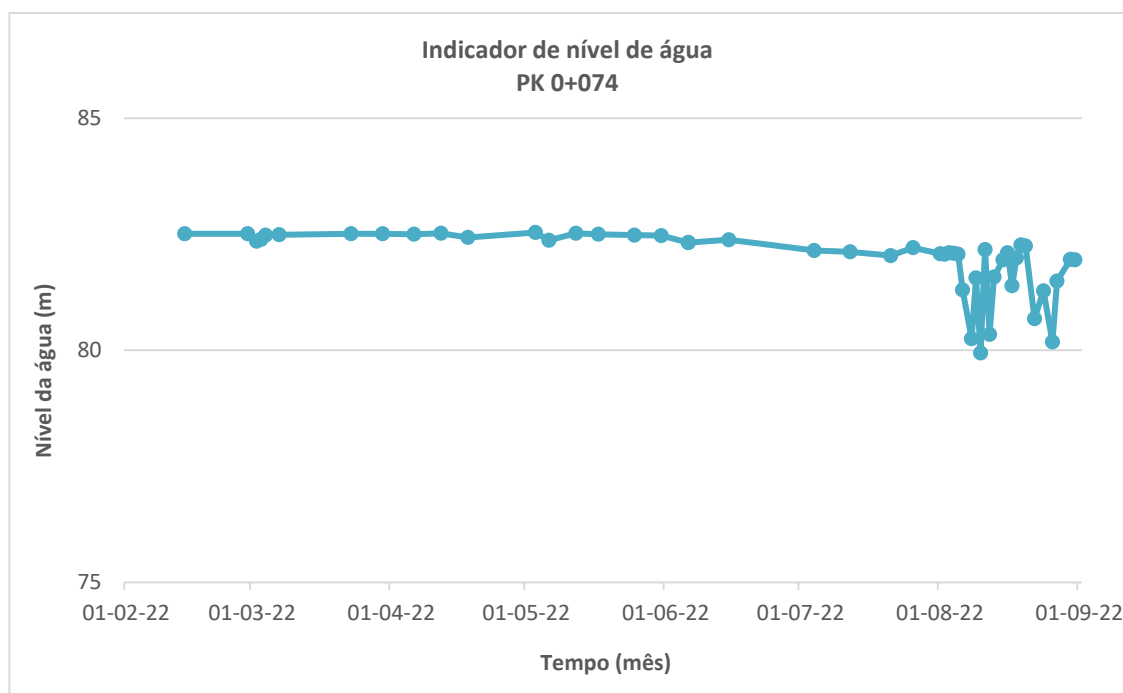


Gráfico 3 - Leitura manual do nível de água no ponto PK 0+074

A partir do Gráfico 3, percebe-se que desde o início das leituras, em meados de Fevereiro até início do mês de Agosto verifica-se que o nível freático variou ligeiramente entre os 82,5 até 82m, na casa dos 0,5m, pelo que se pode considerar que é estável.

A partir do início do mês de Agosto, o nível começou a diminuir e a oscilar, ao mesmo tempo que nas proximidades encontram-se dois furos de captação de água, que pode ser associado a este fator cuja descarga e recarga pode provocar as oscilações medidas do nível de água. Entretanto observa-se que quando as frentes estiveram em tratamento e o furo não esteve em uso, o nível de água mostra-se com valores próximos da tendência primeiramente referida

Extensómetro de vara mono-ponto

Neste ponto, estava previsto em projeto que fosse instalado o extensómetro ao PK0+290, mas por existirem condicionalismos relacionados com serviços afetados, foram feitos ajustes e o extensómetro passou a ser instalado ao PK 0+286, com prisma de via na tampa (Figura 46) em secção de túnel tipo C de via simples, e localiza-se no eixo do túnel, a 2m metros em relação à abóbada do túnel.



Figura 46 - Fotografia capturada pela autora da localização do extensómetro no PK 0+286, na Rua General Norton de Matos

Quadro 23 - Formações atravessadas pelo Extensómetro ao PK 0+286

Litologia: Granito	
Profundidade (m)	Grau de alteração e outros materiais
0 – 1	Areia e <i>tout-venant</i>
1 – 1.8	Aterro e solos arenosos
1.8 – 5.6	W5

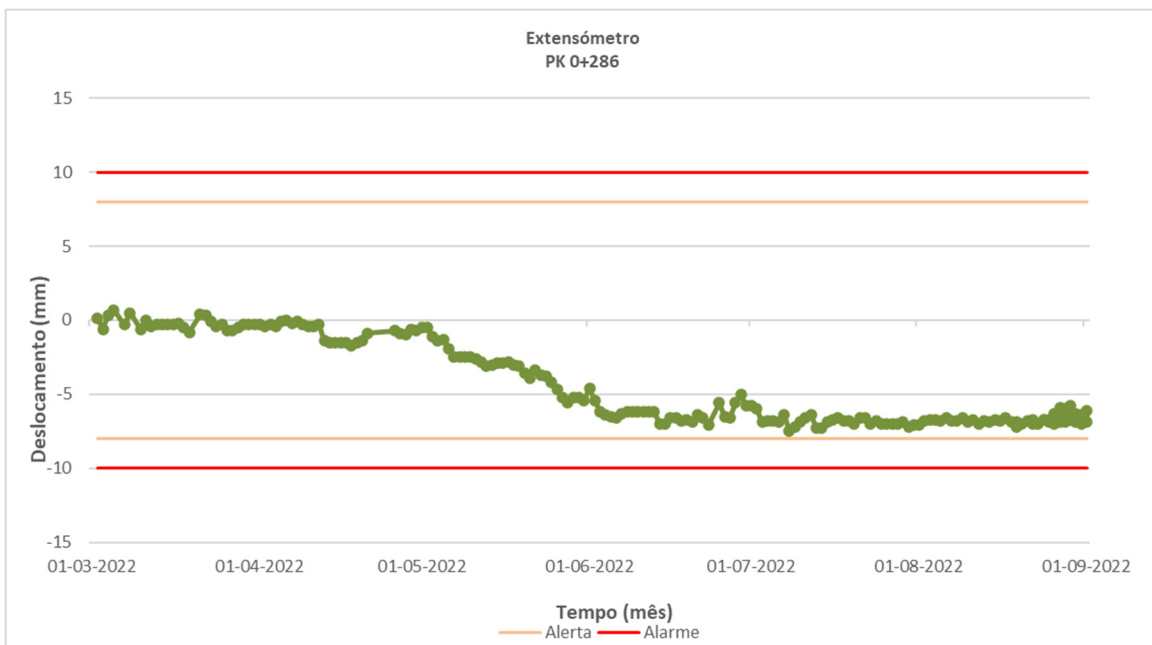


Gráfico 4 - Gráfico da tendência de assentamento do maciço ao PK 0+286

Percebe-se pela tendência do gráfico que, as escavações tiveram impacto no estado do maciço, o que influenciou as deformações do mesmo. Desde o mês de maio até aos meados do mês de junho,

o maciço envolvente do túnel apresenta tendência de assentamento, próximo de atingir aos níveis de referência de alerta. A partir dos meados de junho estabilizou-se embora próximo do nível de referência de alerta (8mm), isto porque as escavações já não estavam a decorrer até pelo menos uma distância de até 30m.

Nos finais do mês de agosto esta ocorrência ficou sem efeito, o pode ser compatível com interferências no equipamento. Neste contexto, os níveis de alerta e de alarme não foram ultrapassados, respetivamente 8mm e 10mm.



Figura 47 - Fotografia capturada pela autora da localização do extensómetro ao PK 0+240 (zona de alargamento do túnel), Parque de estacionamento do edifício Mercadona. PK 0+247 (inacessível à data de recolha de informação)

Quadro 24 - Formações atravessadas pelo extensómetro no PK 0+247.

Litologia: Granito	
Profundidade (m)	Grau de alteração e outros materiais
0 – 7	W5
7 – 7.6	W5 – W4
7.6 – 9.3	W4

O gráfico abaixo representa os deslocamentos no PK0+247, em secção do tipo B de via simples, de um extensómetro com um prisma de via na tampa. A localização do dispositivo neste ponto deve-se ao facto de se localizar em um estabelecimento comercial com alguma movimentação tendo como objetivo de controlar as deformações e a automatização. Possui 9.3m de comprimento e localiza-se no eixo do túnel, a 2 metros da abóbada. O gráfico mostra estabilidade ao longo do tempo, desde os finais do mês de abril até à data última de colheita dos dados, o que se traduz numa estabilização do estado das tensões naquele ponto, tanto à profundidade como à superfície. Neste enquadramento, não foram ultrapassados os níveis de alerta e de alarme, respetivamente 8mm e 10mm.

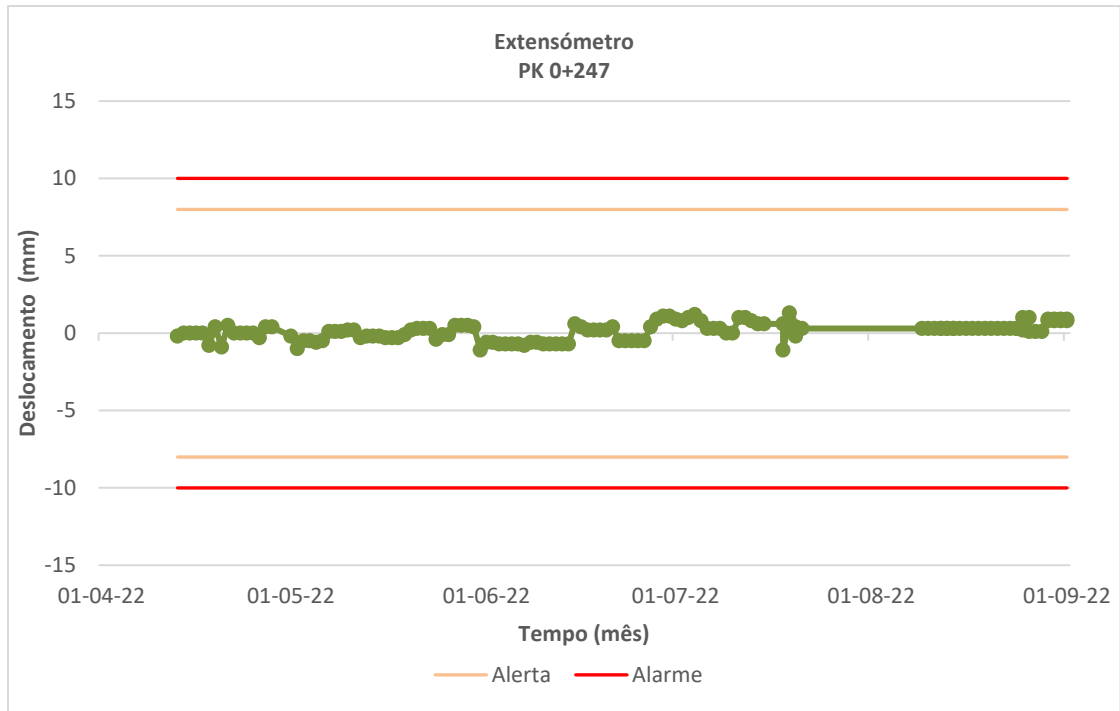


Gráfico 5 - Gráfico da tendência das deformações no PK 0+247



Figura 48 - Fotografia capturada pela autora da localização do extensômetro ao PK 0+154

Quadro 25 - Litologias atravessadas pelo extensômetro no ponto PK 0+154

Litologia: Granito	
Profundidade (m)	Grau de alteração e outros materiais
0 – 7.3	W5
7.3 – 8	W5-W4
8 - 12	W4
12 – 13.1	W5

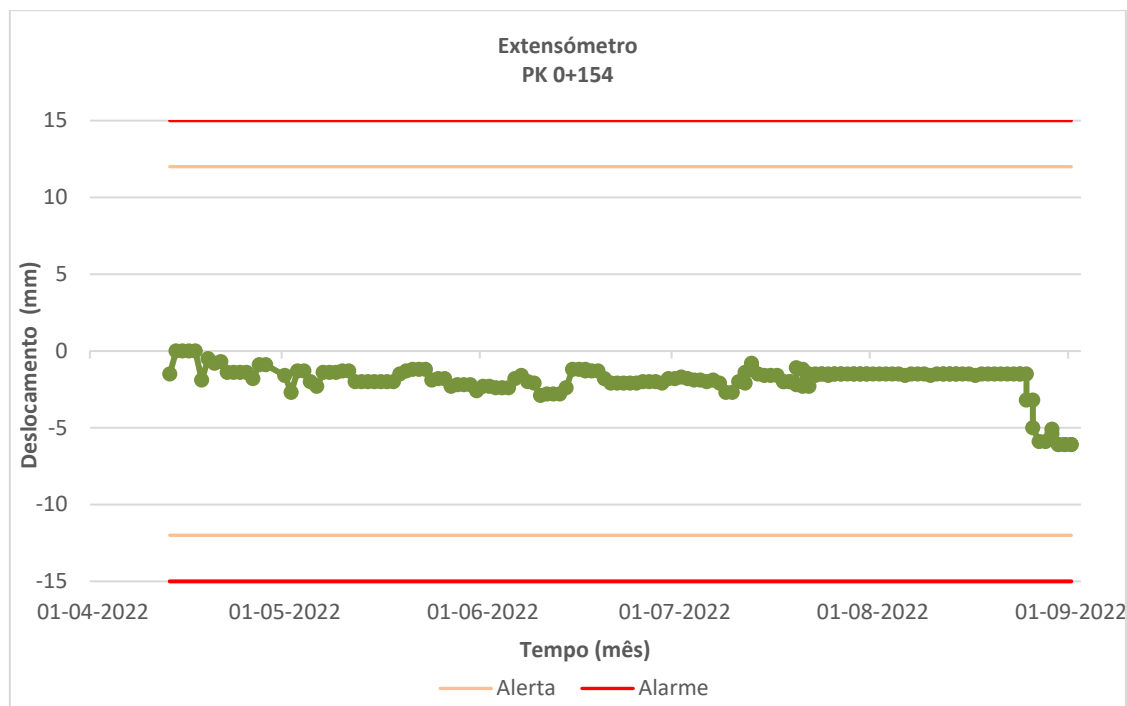


Gráfico 6 - Leitura automática do assentamento à profundidade ao PK 0+154

O extensómetro situado no ponto quilométrico PK 0+154, está instalado com um prisma de via na tampa em secção do tipo B na câmara de alargamento para o Ramal-2. A localização do dispositivo neste ponto quilométrico, deve-se ao facto de ser uma frente com intensas deformações por ser uma secção de alargamento onde se inicia a bifurcação dos ramais 1 e 2. Situa-se no eixo do túnel a 2 metros da abóbada, compreendendo 13.1m de extensão.

Analisando o gráfico verifica-se que desde o início das leituras, em finais de abril, até à data última de colheita dos dados, mostrou variações entre 0 até aos -2mm de profundidade, e por isso pode-se considerar possuir alguma estabilidade. A partir do início do mês de setembro, com as escavações decorrentes, o gráfico mostra uma queda brusca nos valores correspondente ao assentamento em profundidade e à superfície, com um máximo da ordem dos 6mm.

Neste enquadramento, os níveis de alerta e de alarme 12mm e 15mm, respetivamente não foram ultrapassados.

Marcas de superfície

As marcas de superfície abaixo ilustradas, estão localizadas no parque de estacionamento do edifício do Mercadona, por cima da secção de alargamento do túnel, numa secção do tipo B de via simples. Tais marcas situam-se ao eixo (M1) e hasteais, lado direito (M2) e esquerdo (M3) sendo que a marca M1 se situa no eixo do túnel e as restantes marcas M2 e M3, situam-se a 4.35 metros para cada um dos lados do eixo.

A sua instalação em série deve-se às dimensões do túnel naquele ponto sendo um local de maior dimensão, acrescentando ao facto de que se trata de uma secção com maior potencial de ocorrerem deformações devido ao comportamento reológico, e por isso devem ser rigorosamente controlados.

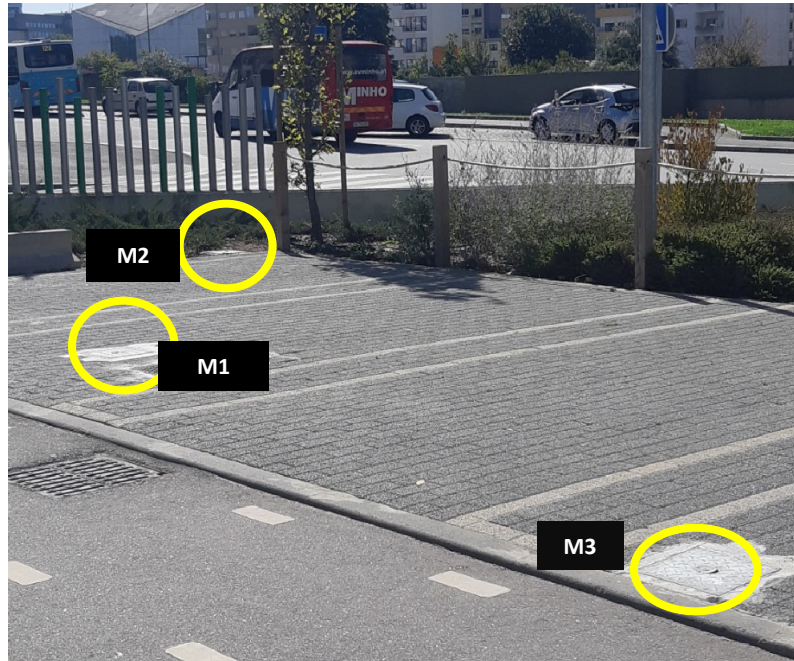


Figura 49 - Marcas de superfície ao PK 0+240

Os gráficos das três marcas nesta secção, apresentam valores próximos entre si registando todos eles oscilação, o que pode significar que a atividade das escavações e o uso de explosivos para a detonação das frentes, que tem influência na parte superior do maciço da zona envolvente do túnel.

Atendendo a estas situações os registos obtidos poderão ser caracterizados como expectáveis para aquele local.

Foram adotados níveis de referência diferentes para as marcas M1, M2 e M3, sendo assim atribuído em projeto os níveis de alerta 8mm e alarme 10mm para M1, e para as marcas M2 e M3 4mm e 5mm, respetivamente. Estes valores resultam do facto da zona de instalação da marca M1 corresponder a um local onde o maciço poderá apresentar deformações mais acentuadas, relativamente aos hasteais, onde estão localizadas as marcas M2 e M3.

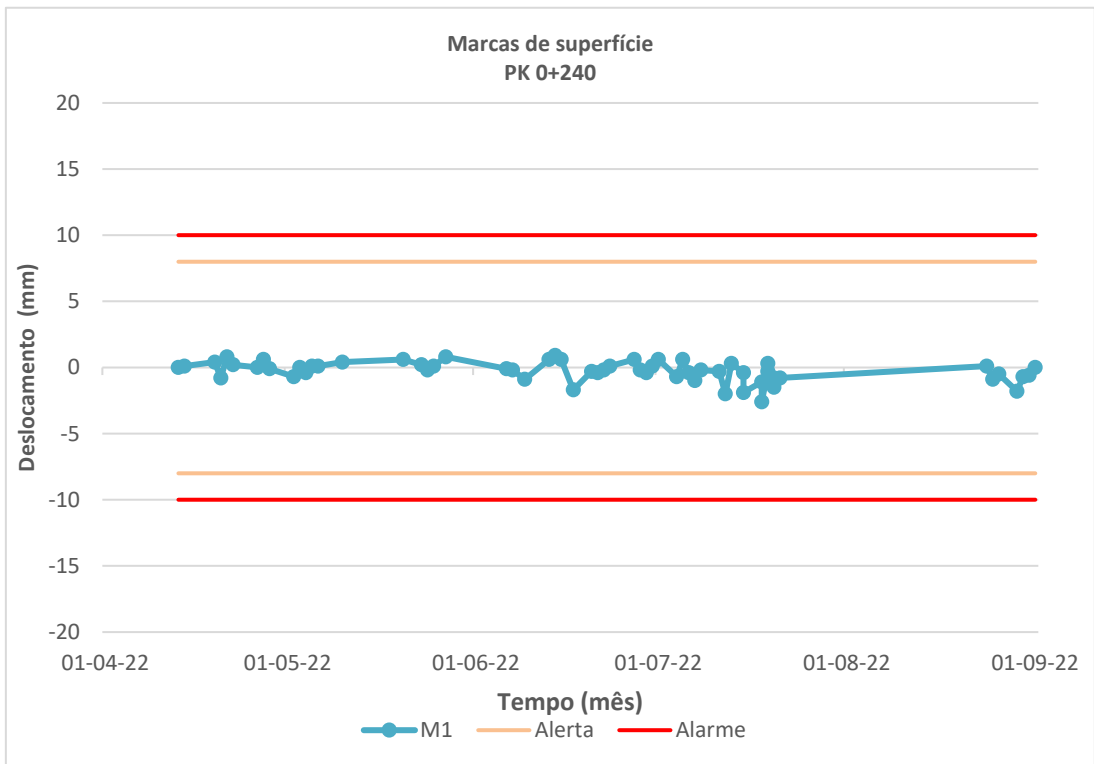
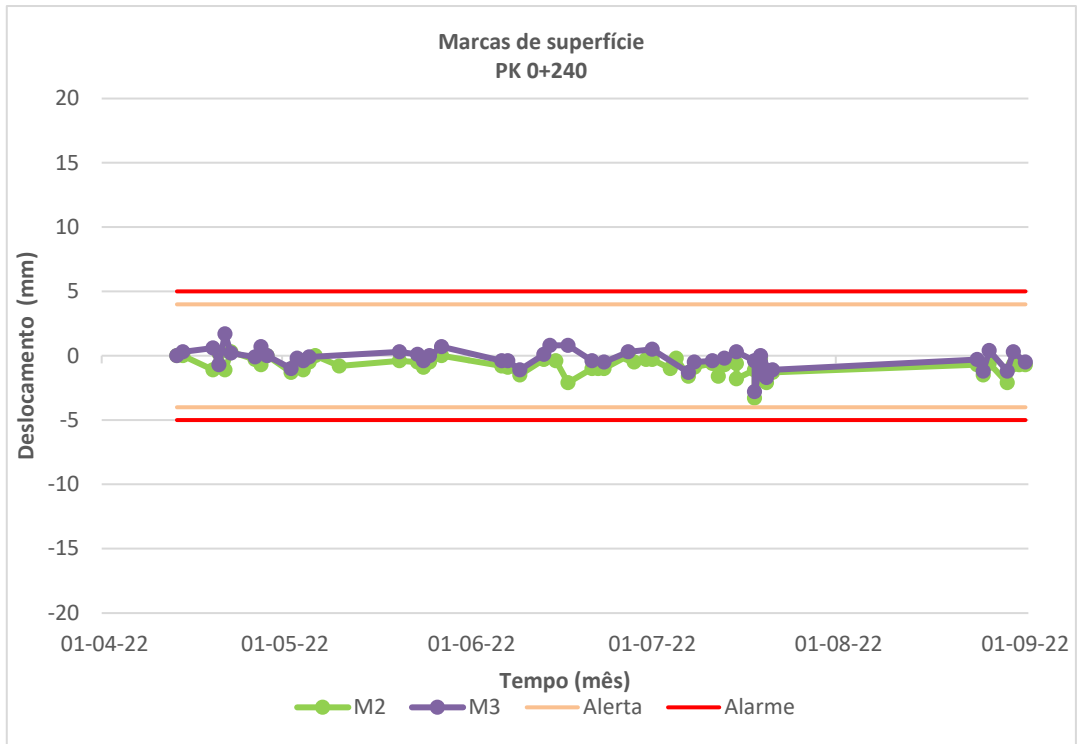


Gráfico 7 - Leitura manual do assentamento à superfície no ponto PK 0+240

Pinos de nivelamento

A escolha pelo edifício de controlo, embora esteja mais próximo da zona de influência da trincheira coberta e distante da zona de influência do túnel, está relacionada com a instalação de pinos de nivelamento (Figura 50) cuja leitura é manual, para a análise comparativa.



Figura 50 - Fotografias capturadas pela autora do edifício X32 na zona envolvente do Ramal-1, com os pinos de nivelamento incrustados na fachada

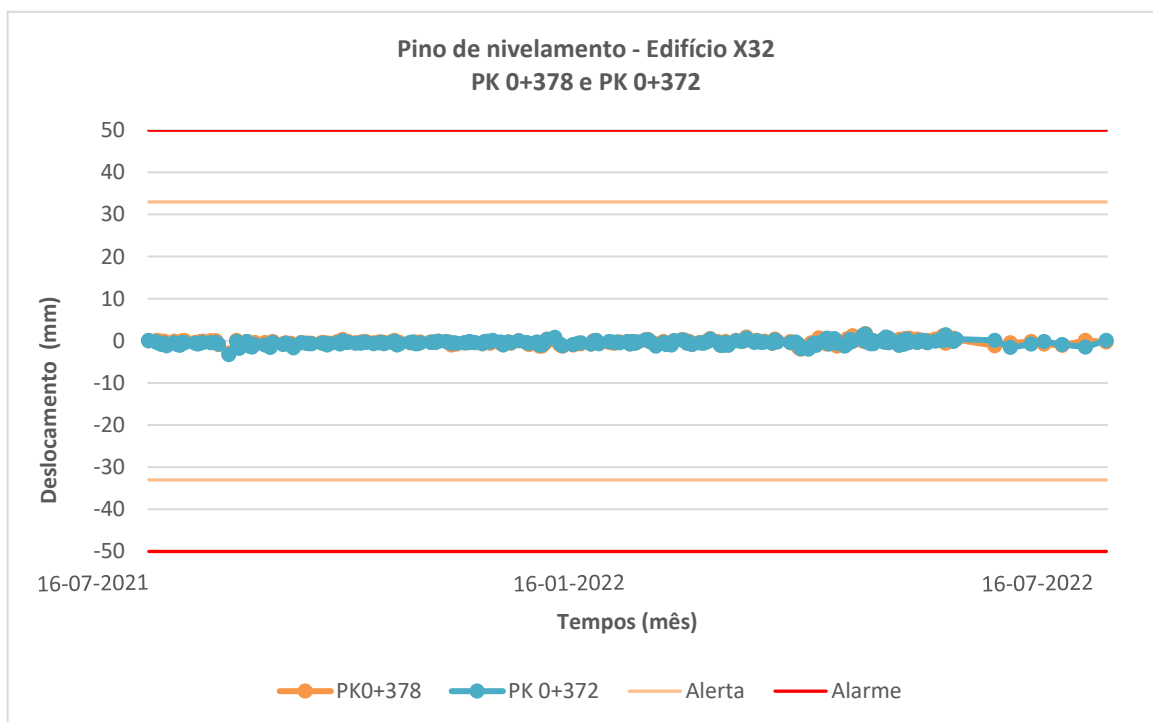


Gráfico 8 - Tendência do assentamento ao longo do tempo ocorrente no Ed. X32, na zona envolvente do Ramal-1

O edifício X32, apresenta-se estável desde a sua data de zeragem que no mês de julho de 2021, até à data do último registo de leituras que ocorreu em julho do corrente ano, verificando-se que não foram ultrapassados os níveis de alerta e de intervenção, respetivamente 32mm e 50mm.

Alvo/prisma refletor (edifícios)

Os prismas estão instalados no encontro Norte e no pilar do Viaduto Rua D. Sequeira, e para a interpretação dos dados, este conjunto será designado de secção.

Foram instalados 8 prismas por baixo do Viaduto, sendo 4 no encontro e outros 4 no pilar (Figura 51), e o objetivo de monitorizar o viaduto está relacionado com a sua relevância urbana, como também por ter uma grande circulação de veículos.

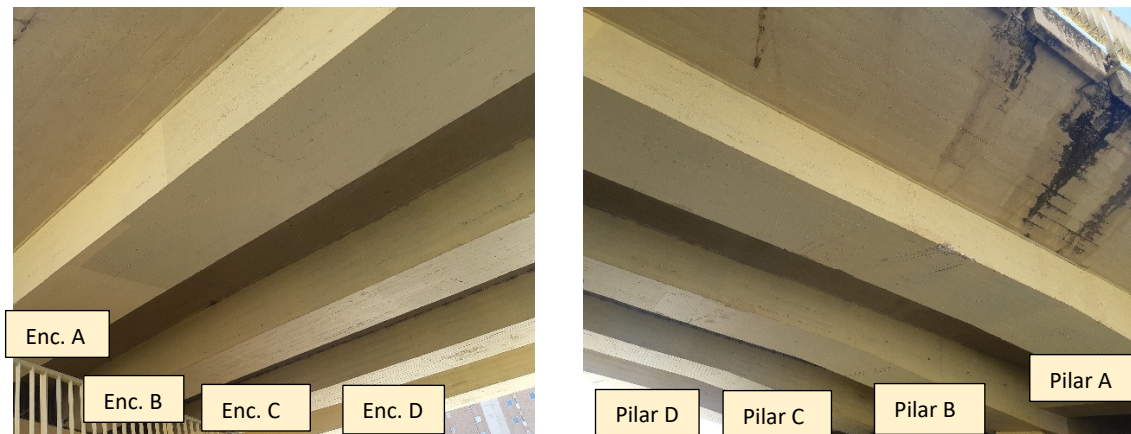


Figura 51 - Pilar esquerdo e encontro (Enc.) direito respetivamente, do Viaduto da rua D. Sequeira e as vigas

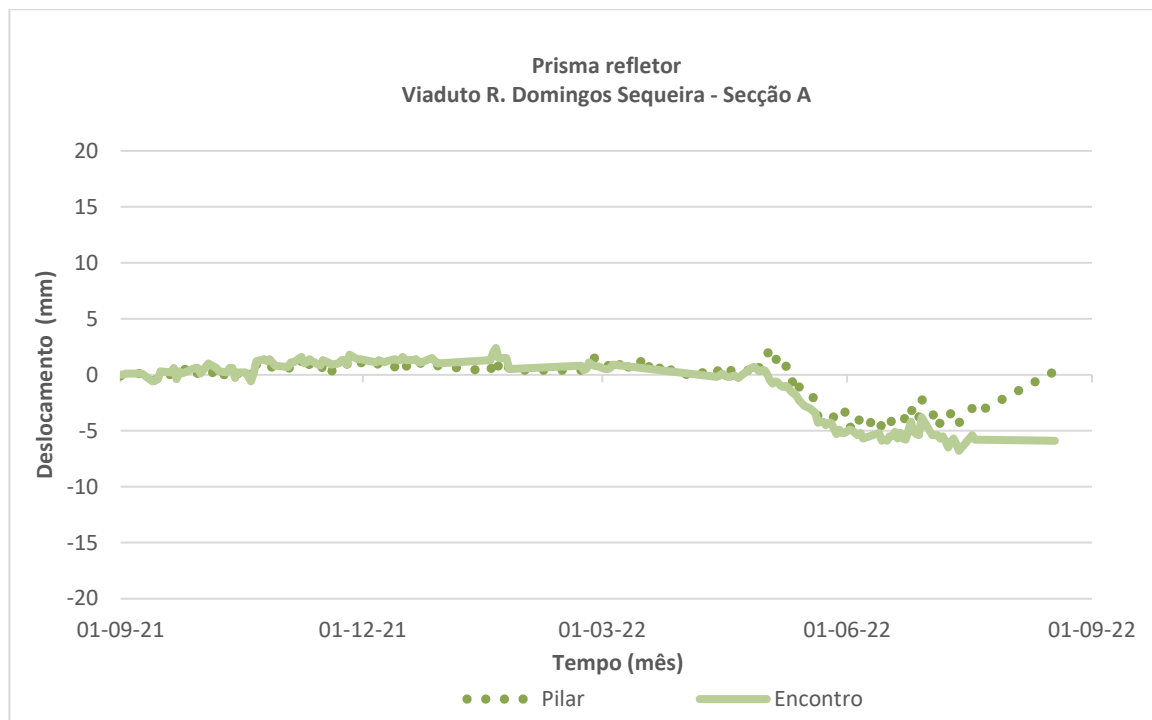


Gráfico 9 - Deformações da secção A, aos PK 0+299 e PK 0+302 respetivamente

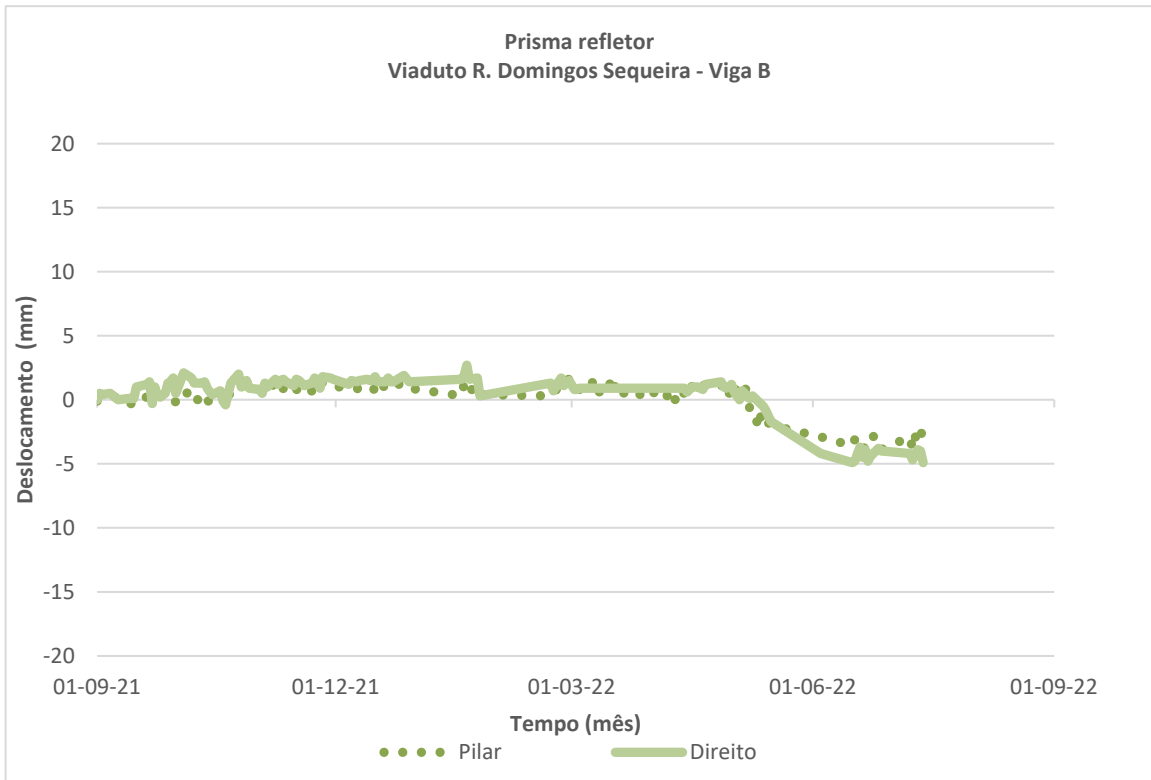


Gráfico 10 - Deformações da secção B, aos PK 0+303 e PK 0+300 respetivamente

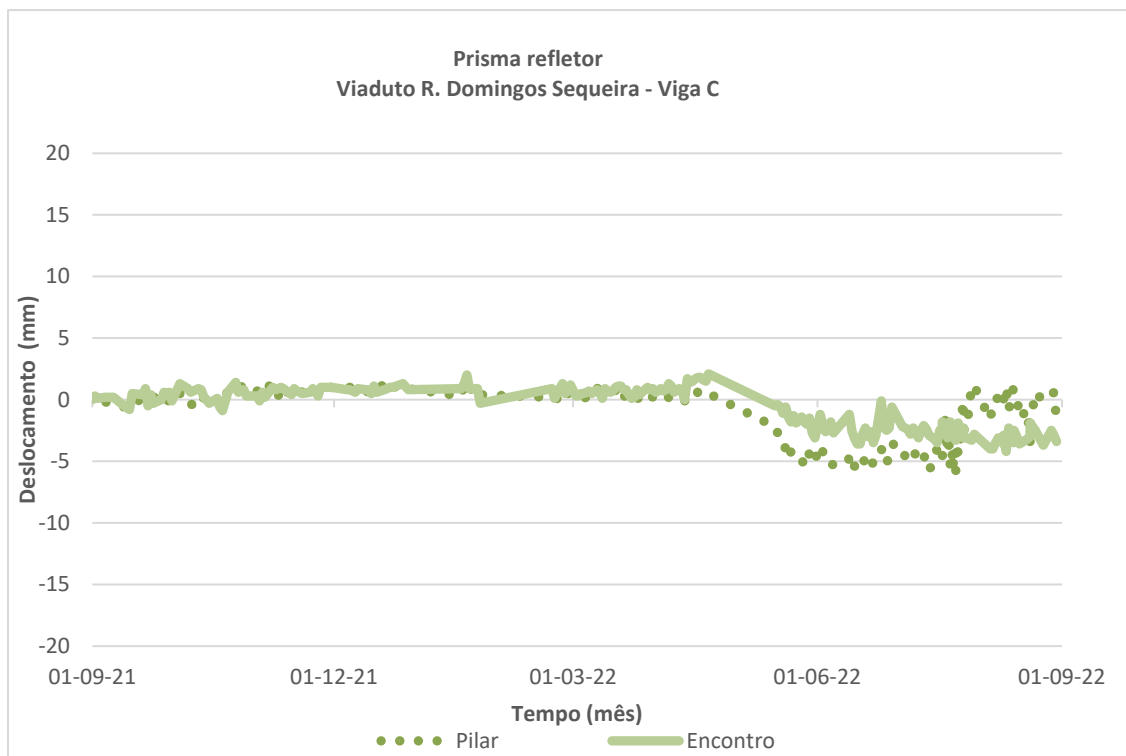


Gráfico 11 - Deformações da secção C, aos PK 0+307 e PK 0+295 respetivamente

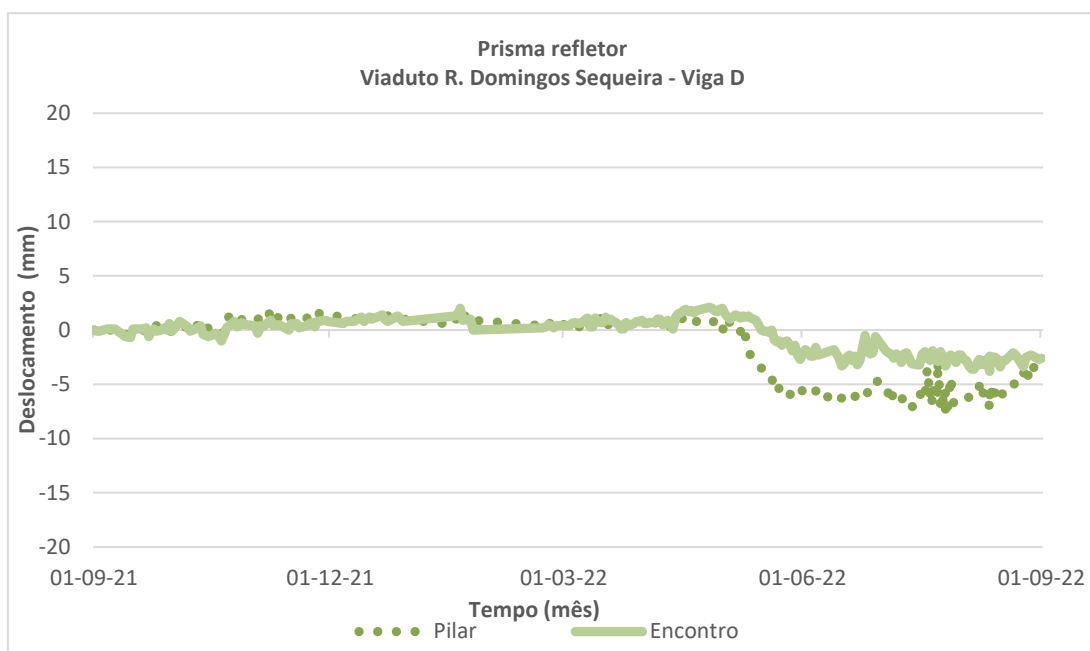


Gráfico 12 - Deformações da secção D, ao PK 0+310 e PK 0+293 respetivamente

Os gráficos acima ilustrados, representam as deformações desde setembro do ano de 2021 até à data última de colheita dos dados.

Verifica-se que todos os gráficos apresentam estabilidade desde o início das leituras até ao início do mês de junho, e uma tendência de assentamento brusco, entre os meses de junho e agosto, correspondente ao período em que os trabalhos de escavação do túnel estavam a decorrer nesta zona. Os registos apresentam um assentamento máximo da ordem dos 8mm, com maior expressão na secção onde se localizam os pilares.

Dentro do contexto dos Prismas, de seguida (Figura 52), analisa-se o supermercado Mercadona por onde a escavação subterrânea em estudo, passa por baixo. A localização dos prismas com leitura automatizada deve-se ao facto de ser um edifício comercial com movimentação de pessoas e veículos localizado sobre a secção do túnel. Nesse contexto foram escolhidas 2 secções para uma melhor interpretação das leituras.



Figura 52 - Fotografia capturada pela autora da localização do Edifício Mercadona e as respetivas secções: secção 1 (amarelo) , secção 2 (azul)

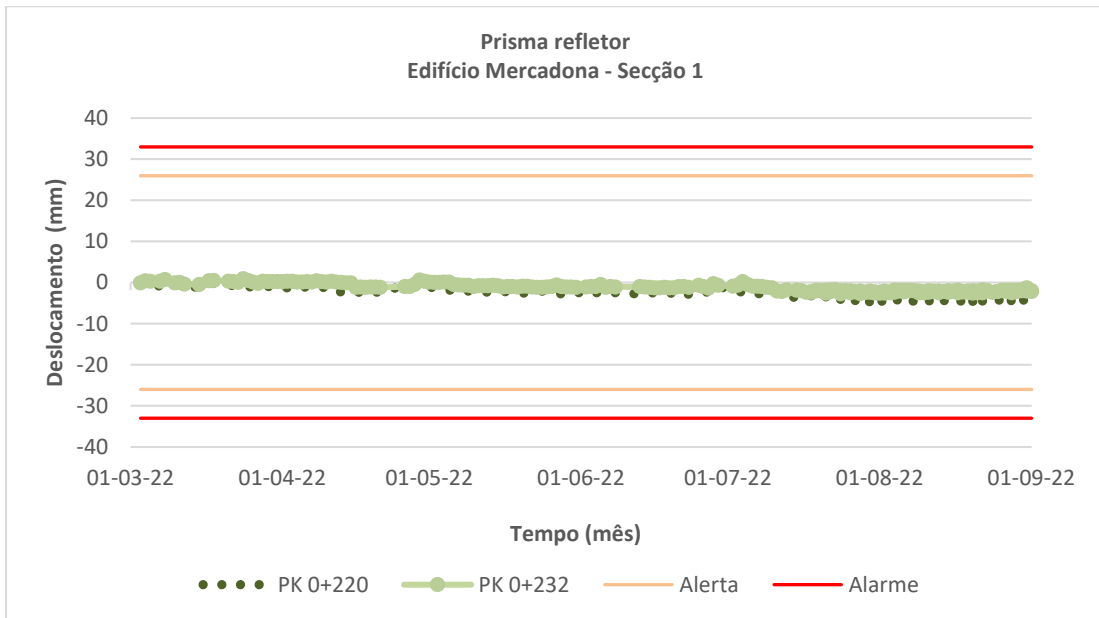


Gráfico 13 - Tendência dos prismas na secção 1 do edifício Mercadona

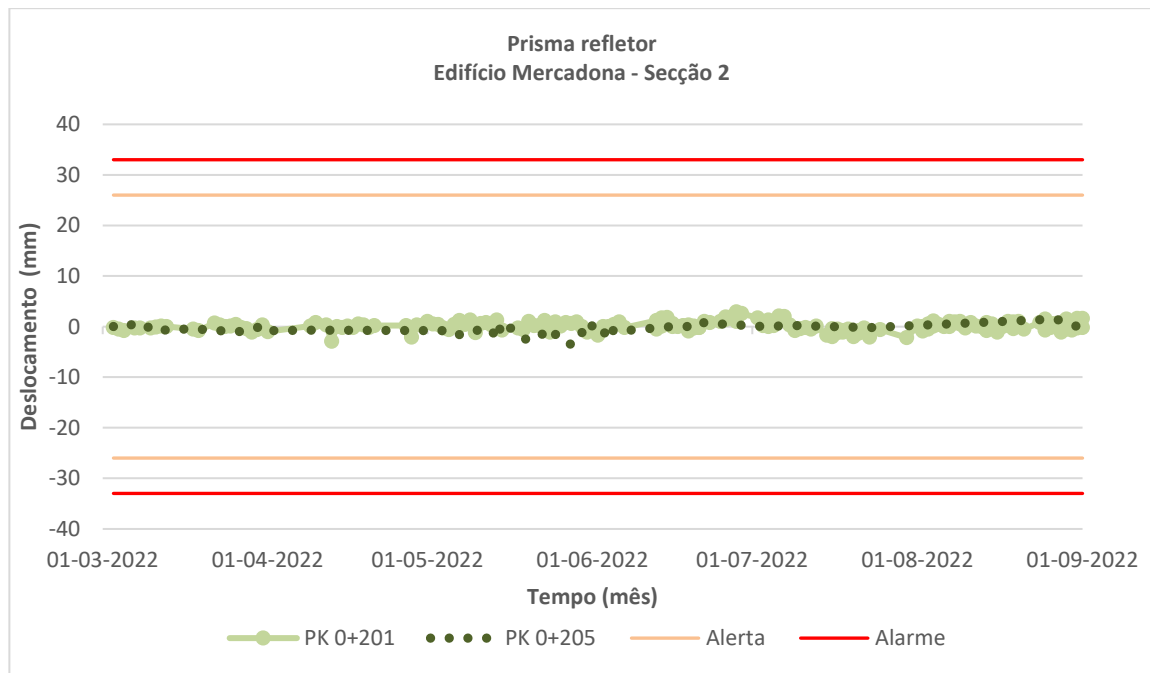


Gráfico 14 - Leituras dos prismas na secção 2 do edifício Mercadona

Relativamente à secção 1, onde os prismas estão instalados em pilares, desde o início das leituras, que apontam para o início do mês de março, regista-se assentamento contínuo, mas com maior expressão a partir do mês de julho até a última data de colheita dos dados, na ordem dos 5mm. O ponto que registou as deformações mencionadas, foi o PK 0+220 por estar adjacente à zona das escavações subterrâneas.

Quanto à secção 2, pode-se verificar que existem mais registos ao PK 0+201, em relação ao PK 0+205, isto porque a estação robotizada teve dificuldades de alcançar este prisma devido a obstáculos, uma vez que o prisma se encontra instalado num pilar no interior do edifício, o que justifica as leituras irregulares do edifício. Ainda assim, com os dados existentes, existe um maior assentamento, na ordem dos 2mm, no ponto adjacente aos trabalhos de escavação subterrânea.

De modo geral, para as duas secções não foram ultrapassados os níveis de referência, de alerta e de alarme, 26mm e 33mm, respetivamente.

Seguidamente, na Figura 53 está representado o edifício 8 que se situa a 37 metros do eixo do túnel.



Figura 53 – a) Fotografia capturada por veículo aéreo não tripulado, com acompanhamento da autora. b) Fotografia capturada pela autora do edifício 8 na zona envolvente do túnel do Ramal-1

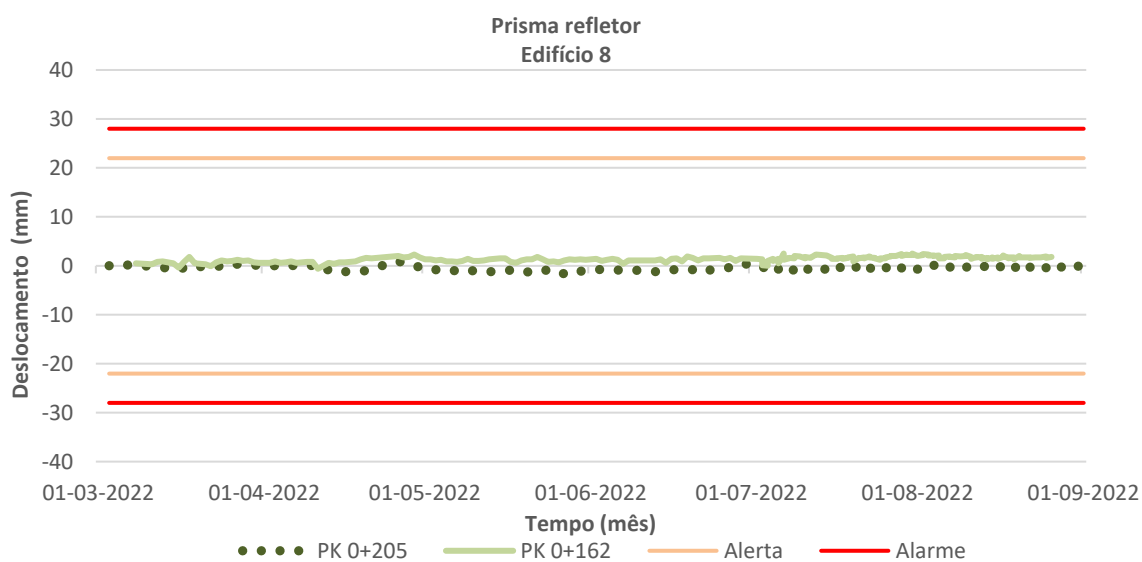


Gráfico 15 - Tendência das deformações no edifício 8, entre os PK 0+205 e PK 0+162

O gráfico acima representa as deformações no edifício 8, a sua localização deve-se ao facto de se tratar de um edifício adjacente às escavações e que dista a 36.16m metros do eixo do túnel, com início das leituras no mês de março do corrente ano até à última data de colheita de dados. Através dos gráficos, percebe-se que houve deformações pouco significativas ao longo do tempo, não tendo ultrapassado os níveis de referência de alerta e de alarme, respetivamente 22mm e 28mm, o que pode representar um bom estado do edifício e do maciço naquele ponto.

Alvo/prisma refletor (Linha de Metro existente)

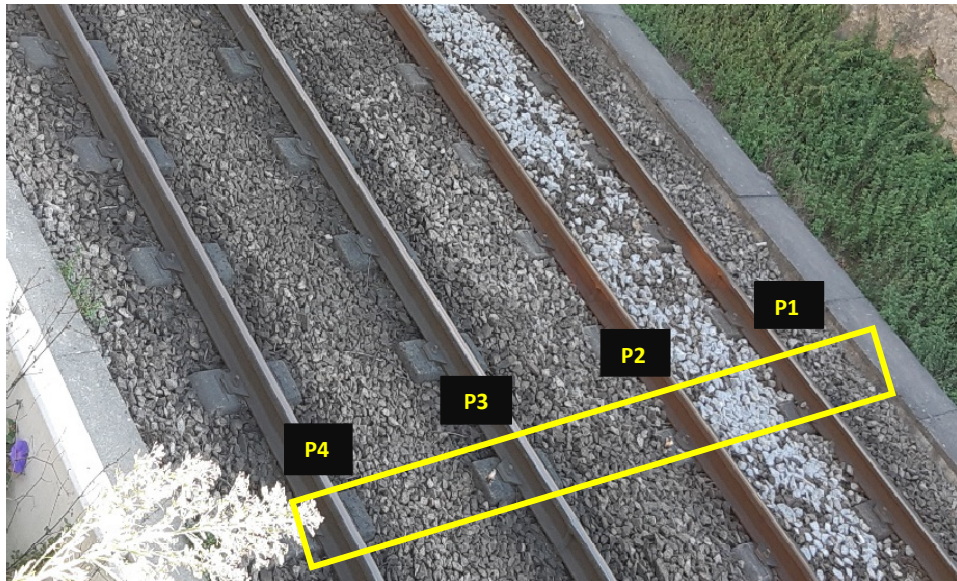


Figura 54 - Fotografia capturada pela autora de alvos/prisma de via numa secção exemplificada ao PK 0+346 (PK 0+319 inacessível)

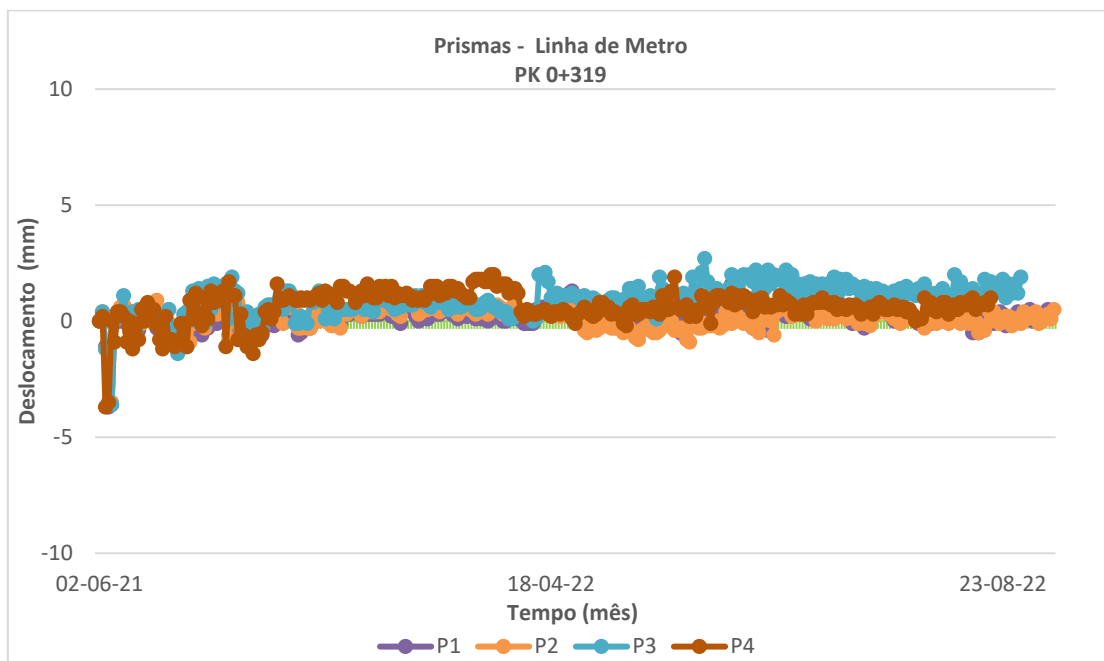


Gráfico 16 - Tendência das deformações na secção de prismas instalados ao longo da via da linha de Metro existente, ao PK 0+319

A localização dos prismas em série, representados na Figura 54 ao PK 0+319, deve-se ao facto de ser uma zona fortemente movimentada, e muito próxima da zona das atividades de escavação, com uma distância cerca de 15m ao eixo do túnel. Os gráficos representam as leituras dos prismas ao longo da Linha C, da Metro do Porto, começando pela zona distal do túnel (P1), até à zona proximal do mesmo (P4). Ao longo do troço onde existe a intervenção da obra, os veículos que circulam na

linha férrea, reduzem a sua velocidade para que o impacto para a obra seja mínimo. Verifica-se no registo de todos os prismas a mesma imagem, entretanto, os prismas mais distais (P1 e P2), apresentam assentamento da ordem de -1mm, ao passo que os prismas proximais (P3 e P4) representam empolamento (até cerca dos 2.8mm).

Ainda tendo em conta a mesma secção de prismas, de seguida estão representados gráficos das deformações para uma análise complementar com a temperatura. Para evidenciar este fator, avaliou-se a variação da temperatura diária na parte da manhã e da tarde em 3 dias consecutivos no mês de agosto.

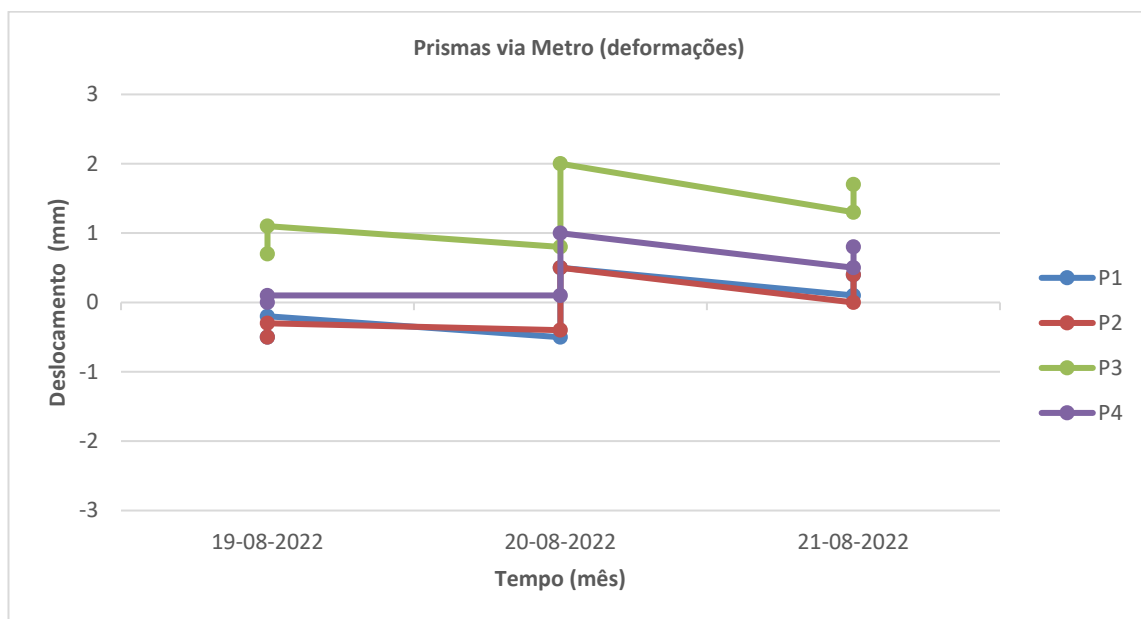


Gráfico 17 - Deformações via Metro ao PK 0+319, entre os dias 19-21 de agosto

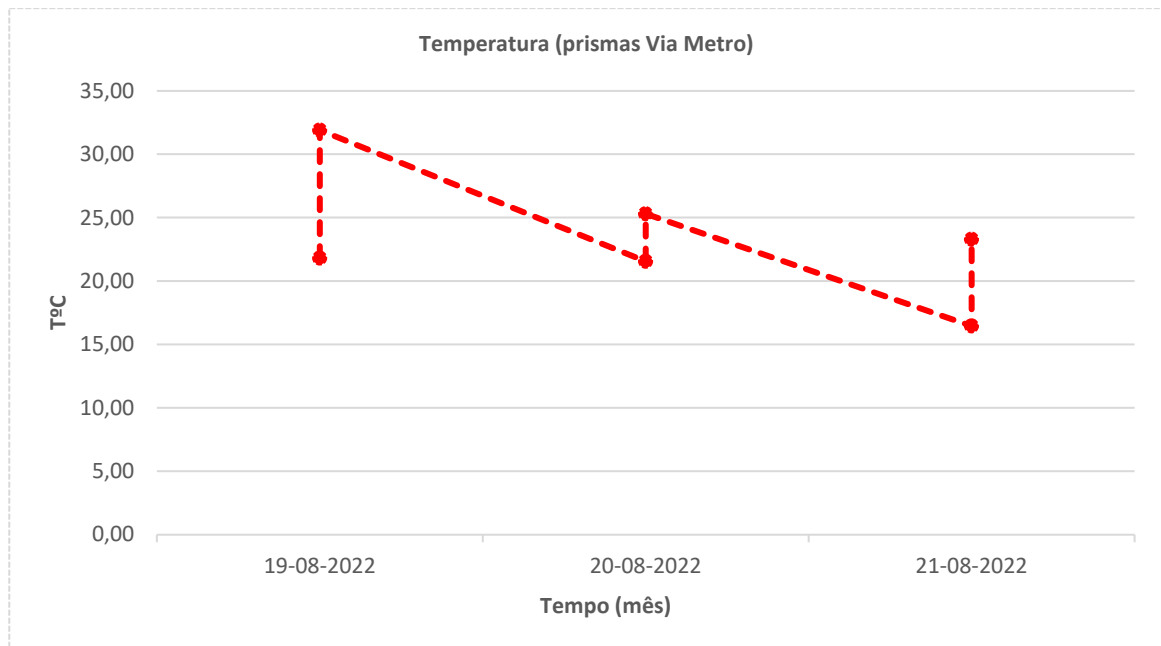


Gráfico 18 - Variação da temperatura entre os dias 19-21 de agosto. (Obtida através da estação total robotizada)

A partir dos gráficos acima, pode se constatar que as variações de temperatura refletem oscilações de ordem milimétrica que dependem do horário das leituras, e em 3 datas consecutivas.

Para a primeira data 19 de agosto, verifica-se que as deformações variaram entre 0.1-0.4mm, valores obtidos a partir de cada um dos prismas e a temperatura varia 10°C, ao passo que para o dia seguinte as variações dos deslocamentos estão compreendidas no intervalo entre os 0.9-1.2mm causados pela variação da temperatura em 4°C, e por fim, para o dia 21 de agosto as deformações variaram entre os 0.3-0.4mm e como fator de influência, a temperatura variou 7°C.

Alvo/prisma refletor (convergências)

Esta secção de convergência ao PK 0+327 foi desenhada em projeto como secção do tipo C, de via simples escavada em zona Geotécnica predominantemente G5 na abóbada e, G3 e G5 nos hasteais (Figura 55).

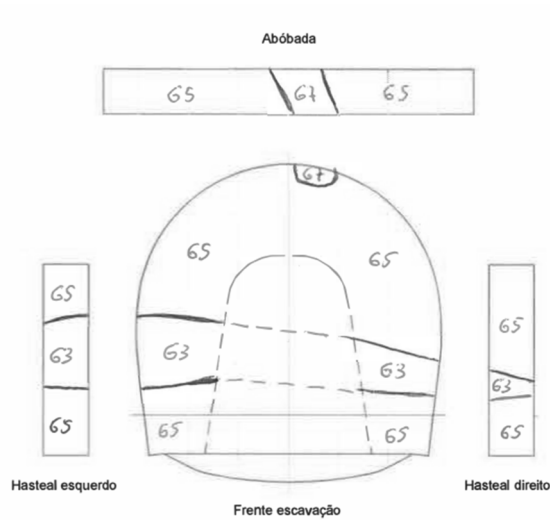


Figura 55 - Cartografia geotécnica da frente, ao PK0+327. Fonte: FERROVIAL/ACA, Cartografia geológico-geotécnica, 2022

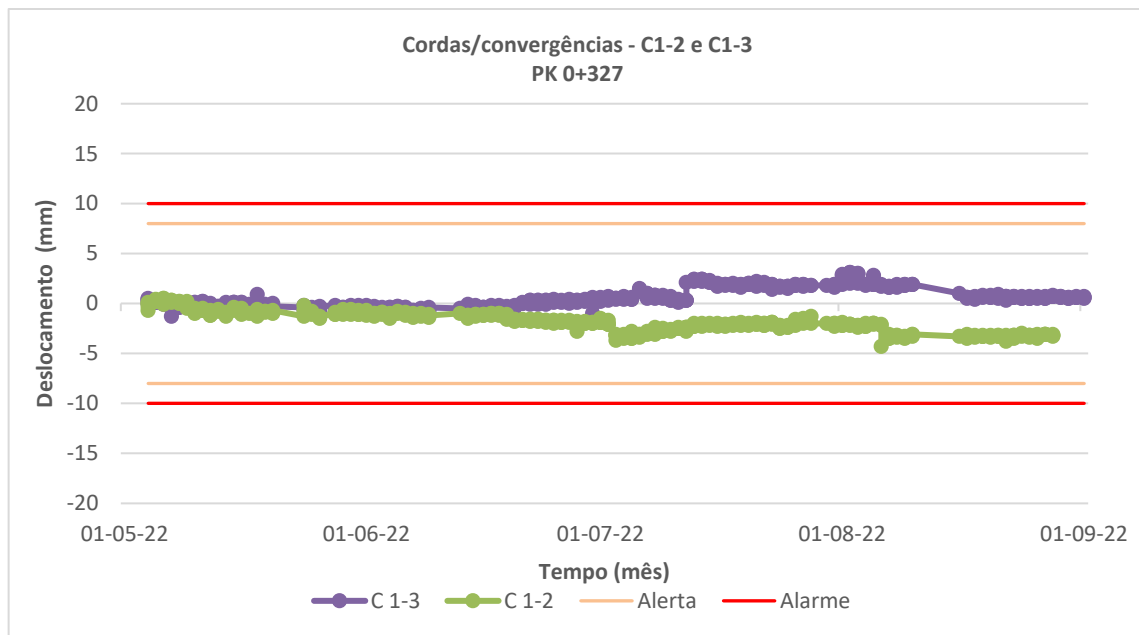


Figura 56 - Deformações na secção de convergência ao PK+327 (prismas P1-2 e P1-3)

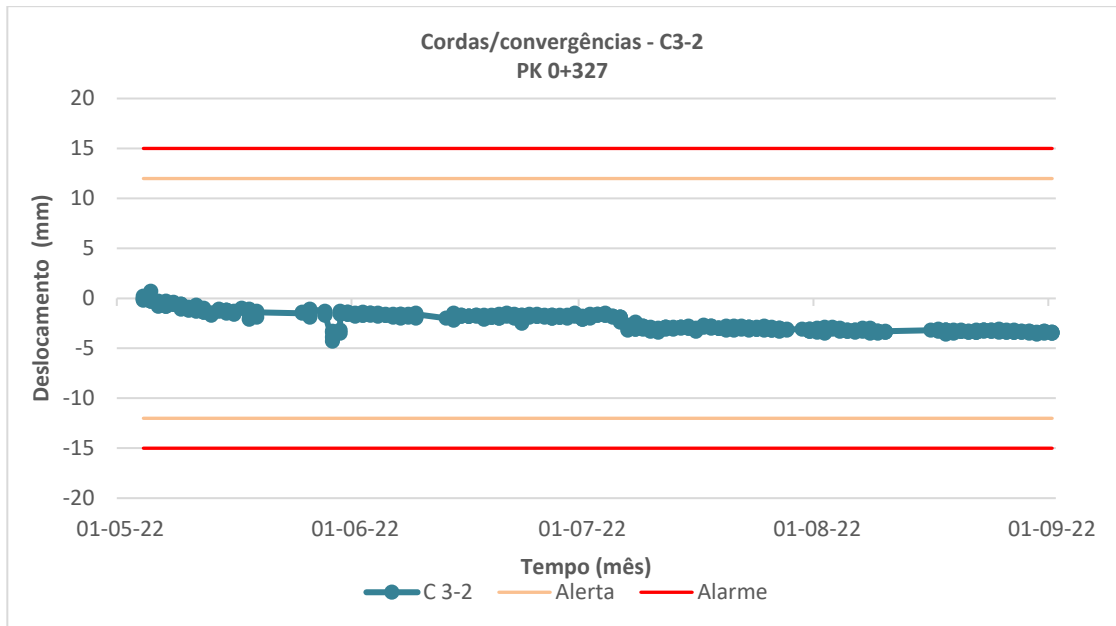


Gráfico 19 - Deformações na secção de convergência ao PK+327 (prismas P2 e P3)

Faz-se notar que desde a data de leitura até a última data de colheita dos dados, verifica-se que as convergências desta secção PK0+327 mostram deformações ligeiras variando entre -2 a 1mm, que representa o deslocamento entre os prismas P1-2 e P1-3, e uma deformação que varia entre 0 a 2.5mm que representa os prismas P2 e P3. Neste contexto, não foram ultrapassados os níveis de alerta e alarme respetivamente 8mm e 10mm para as cordas C1-2 e C1-3, e o mesmo observa-se para a corda C2-3.

Seguidamente apresentam-se os resultados para a secção ao PK+310 que está desenhada em projeto como tipo C escavada nas zonas geotécnicas G5 ao nível dos hasteais e G3, G4 e G5 na abóbada (Figura 57).

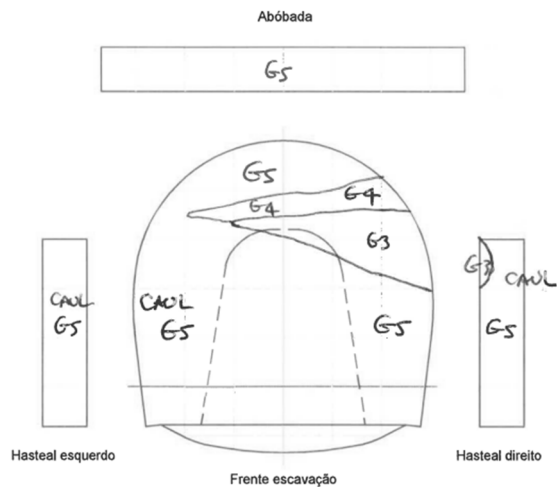


Figura 57 - Cartografia geotécnica da frente, ao PK0+310. Fonte: FERROVIAL/ACA, Cartografia geológico-geotécnica, 2022

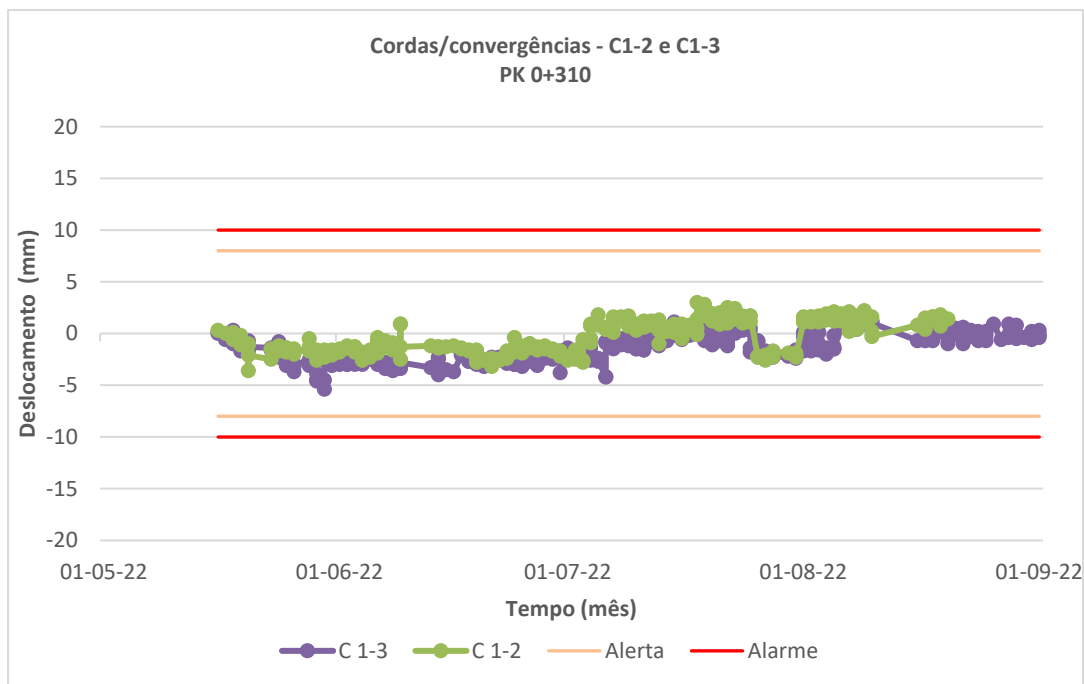


Gráfico 20 - Deformações na secção de convergência ao PK+310 (prismas P1-2 e P1-3)

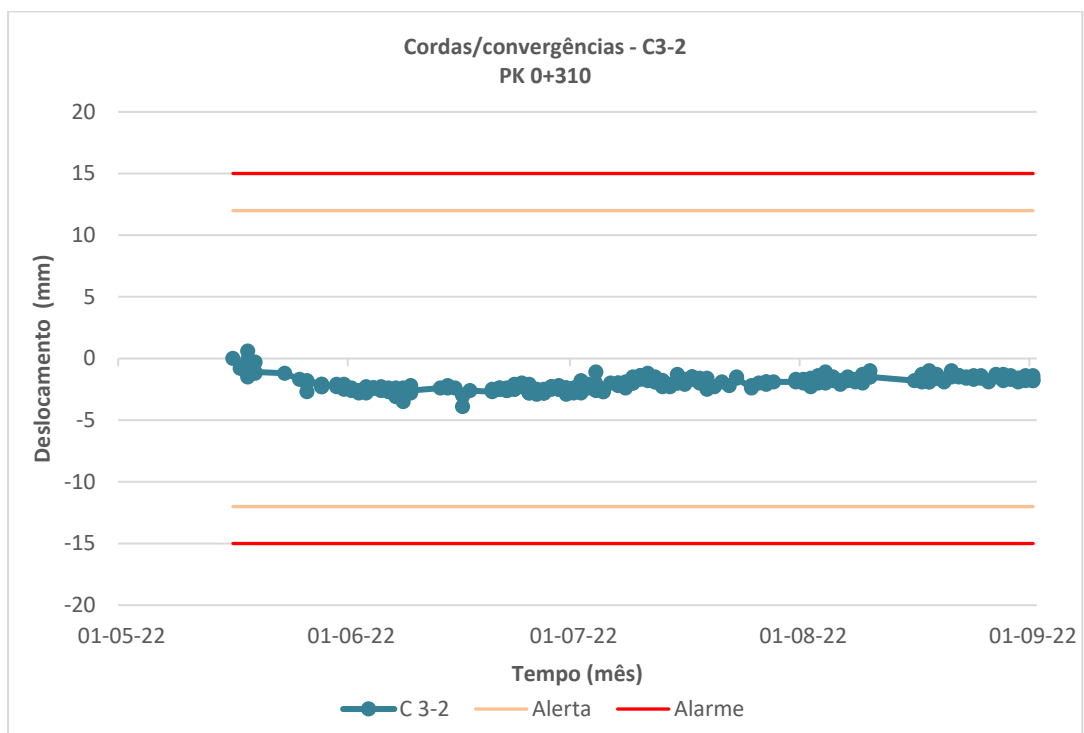


Gráfico 21 - Deformações na secção de convergência ao PK+310 (prismas P2 e P3)

Desde a data de leitura até a última data de colheita dos dados, verifica-se que as convergências desta secção PK0+310 tiveram de modo geral deformações ligeiras variando entre -6 a 4mm, entre os prismas P1-2 e P1-3, e uma deformação que varia entre 0 e 2.5mm entre os prismas P2 e P3.

De modo particular, faz-se notar que se registam deslocamentos para o interior do túnel entre os meses de julho e agosto, nos prismas P1-2 e P1-3.

Neste enquadramento, não foram ultrapassados os níveis de alerta e alarme respetivamente 8mm e 10mm para as cordas C1-2 e C1-3, e o mesmo observa-se para a corda C2-3 com os níveis de referência 12mm e 15mm.

Apresenta-se nos gráficos seguintes (Gráfico 22 e Gráfico 23) os registos no ponto quilométrico PK+240 correspondente a uma secção do tipo C. Os prismas neste local têm como objetivo específico de controlar as convergências em tempo real por se tratar de uma zona de alargamento, que se definiu em projeto para o armazenamento de equipamentos durante a fase de escavação do túnel.

Esta secção foi escavada, praticamente na totalidade em materiais do tipo W3 (Figura 58).

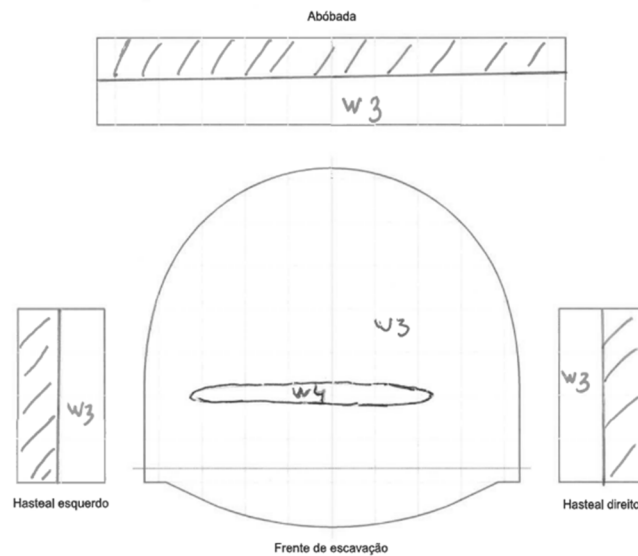


Figura 58 - Cartografia da frente, no ponto PK0+240. Fonte: FERROVIAL/ACA, Cartografia geológico-geotécnica, 2022

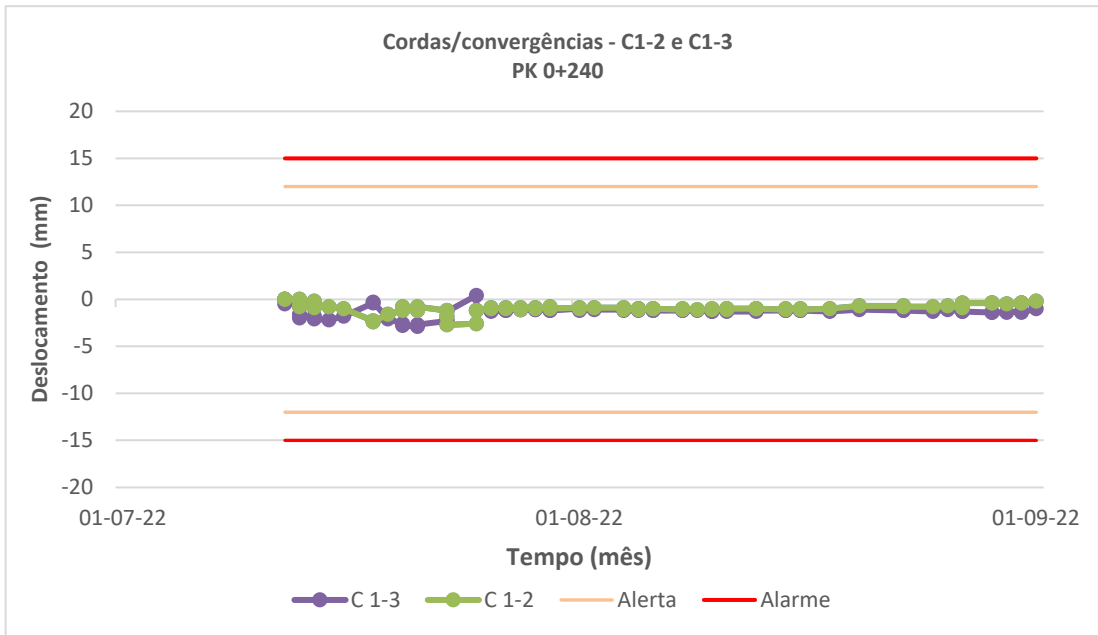


Gráfico 22 - Deformações na secção de convergência ao PK+240 (prismas P1 e P3)

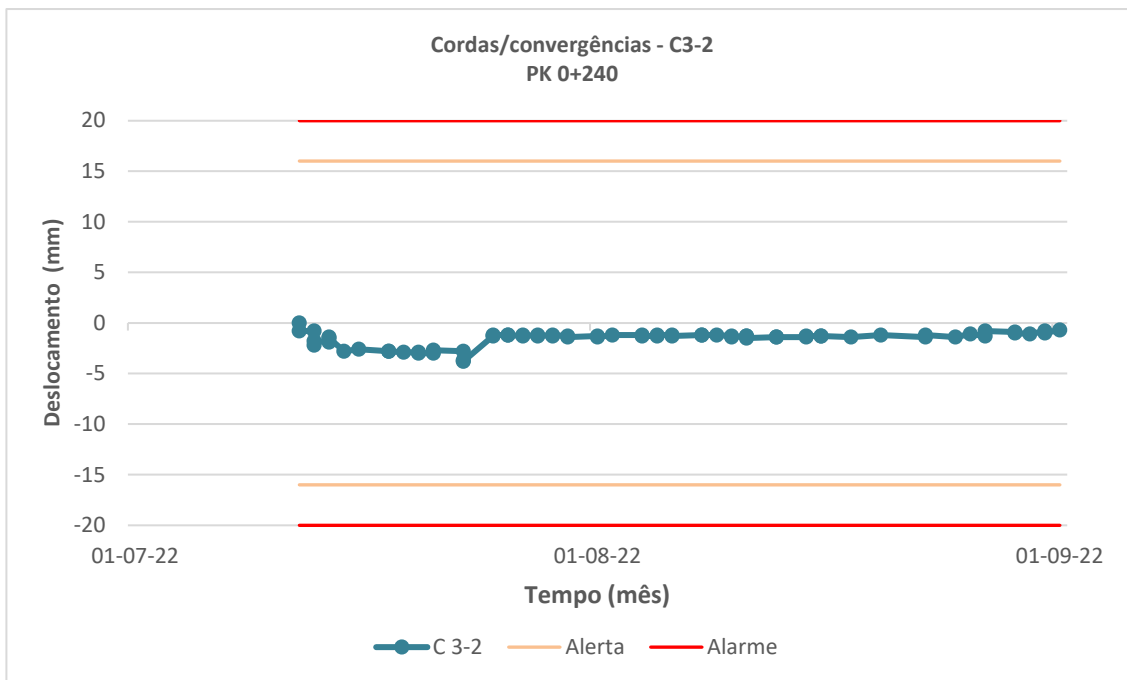


Gráfico 23 - Deformações na secção de convergência ao PK+240 (prismas P2 e P3)

Os gráficos 22 e 23 representam as deformações que ocorreram desde a data de início de leitura até a data última de recolha dos dados. Nos mesmos, verifica-se que entre os finais do mês de julho e início do mês de agosto, houve deformações nas cordas C1-3, correspondente aos prismas P1 e P3, variando até aos -2mm, pelo que os níveis de alerta e de alarme, respetivamente 12mm e 15mm não foram ultrapassados. A mesma ocorrência verifica-se na corda C3-2 correspondente aos

prismas P3 e P2, variando até aos -4mm, verificando-se que os níveis de alerta e de alarme não foram da mesma forma ultrapassados, respetivamente 16mm e 20mm.

5.2. Comparação entre as leituras manuais e automatizadas

Dado que em fase inicial da implantação da instrumentação as leituras eram manuais e posteriormente se optou pelas leituras automatizadas pelas razões referidas ao longo deste trabalho, constatou-se a possibilidade de, para o mesmo tipo de parâmetro a monitorizar, estabelecer uma comparação entre as leituras manuais e automatizadas, nomeadamente ao nível de:

- assentamentos de edifícios instrumentados com pinos de nivelamento (leitura manual) e prismas refletores (leitura automatizada);
- assentamentos do maciço a partir da superfície através de marcas de superfície (leitura manual) e pontos centaure (visadas virtuais dirigidas para um ponto a partir da estação total robotizada) ou prismas de via.

Considerou-se como ponto de partida edifícios e secções específicas onde estão instalados dispositivos que permitem as leituras manuais e automatizadas simultaneamente, o que possibilita que se faça uma comparação de tais leituras, a sua interpretação e análise complementar.

Essas análises servirão de referência para a comparação entre as leituras manuais e automatizadas, permitindo interpretar a eficácia de um ou de outro tipo de leitura, como também o seu impacto para a tomada de decisões para a obra, tendo como base os parâmetros estabelecidos em projeto. Na presente secção, começa-se por representar os dispositivos que medem os assentamentos do maciço à superfície, e posteriormente, serão representadas graficamente as leituras dos dispositivos que medem os assentamentos dos edifícios da zona envolvente. A série de dados tem o seu incício na data de zeragem ou calibração do dispositivo em questão e considera como último registo o dia 1 de setembro do corrente ano.

Marcas de superfície e Marcas centaure

Os dispositivos (Marcas de superfície), estão instalados ao longo da via pública ou em locais onde a movimentação de veículos e viaturas é intenso, localizando-se segundo o alinhamento do túnel, e estão instaladas até uma profundidade de 80cm. As marcas de superfície possibilitam as leituras manuais, e as marcas centaure sendo pontos virtuais, estão projetadas para um ponto muito aproximado das marcas de superfície, e que seja alcançável pela estação robotizada possibilitando as leituras automatizadas.

Neste sentido, começaremos por analisar o PK0+327 representado na Figura 59, face ao âmbito do presente trabalho.



Figura 59 - Fotografia capturada pela autora da localização da Marca de Superfície ao PK 0+327

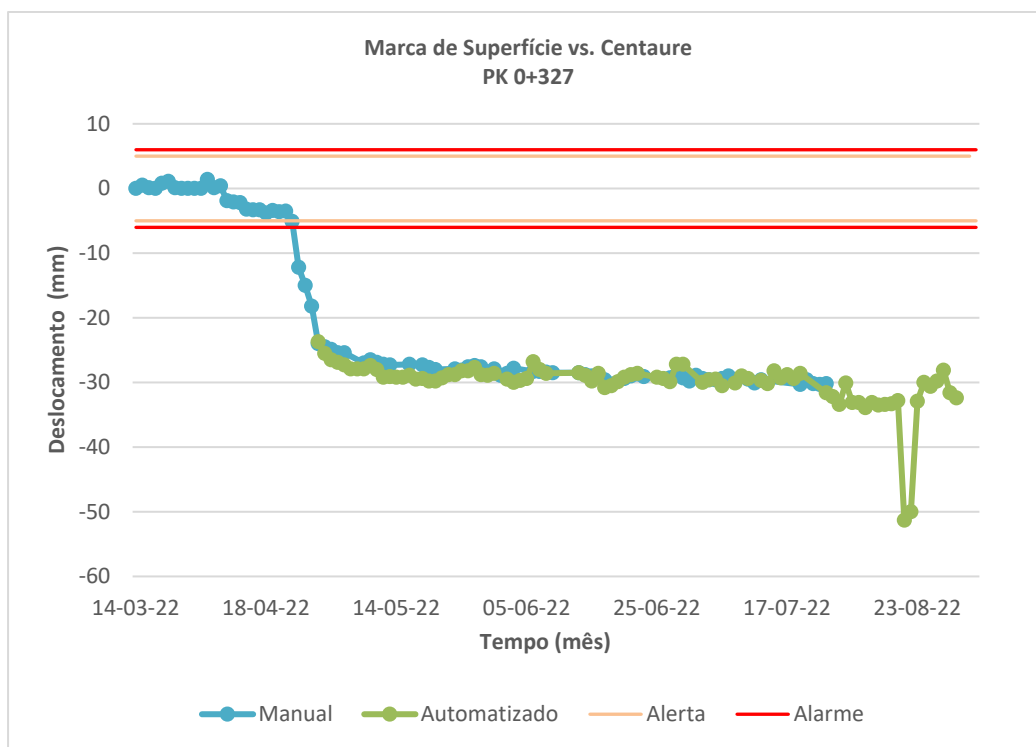


Gráfico 24 - Leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto 0+327

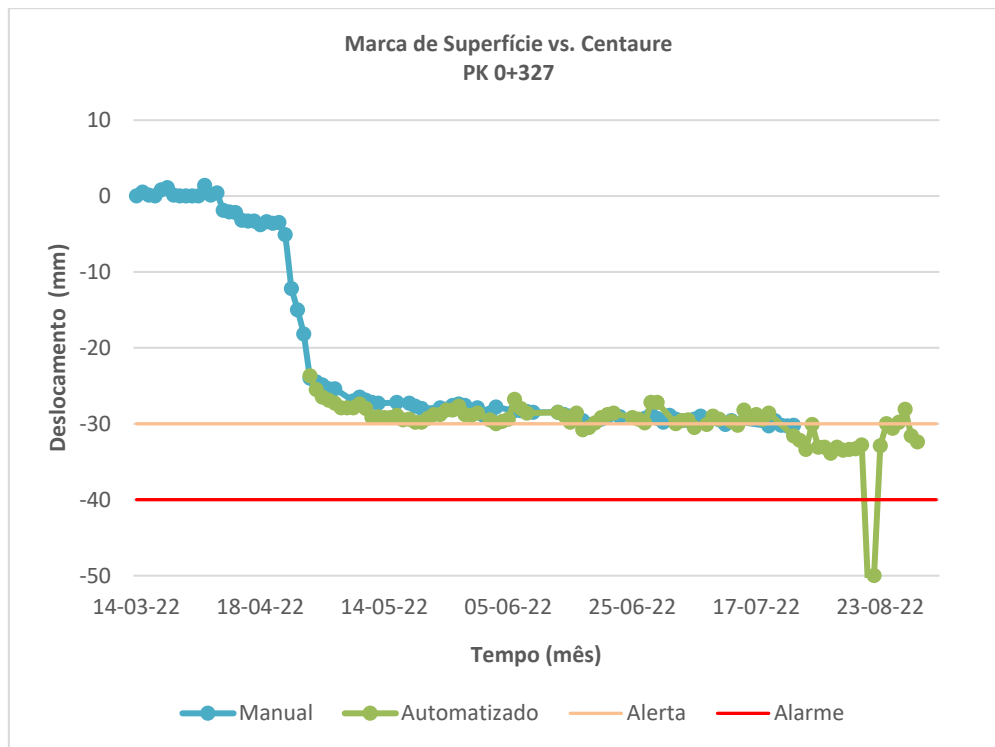


Gráfico 25 - Leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto 0+327, com os novos níveis de referência

O Gráfico 24, representa o histórico das duas medições em simultâneo (as leituras manuais e automatizadas) ao PK 0+327 que dista 0.54 metros do eixo do túnel e a 0.7 metros da abóbada, de secção do tipo C de via simples. O método manual foi adotado como inicial apontando para o mês de março do corrente ano, e posteriormente em abril do corrente ano, foram adotados os dois métodos em simulatâneo que refletem uma coerência entre os valores obtidos, até à data última de leitura manual, que aponta para julho. Posteriormente, por razões de dificuldade de acesso, apenas tiveram continuidade as leituras automatizadas.

Nos finais do mês de abril, verificou-se uma influência do transbordo da calda de cimento nos valores obtidos, que conduziram a que se fossem ultrapassados os níveis de alerta e de alarme, respetivamente 5mm e 6mm definidos inicialmente para o local. Posteriormente a estas interferências volta-se a uma tendência de estabilização das leituras tendo-se reformulado os níveis de referência para 30mm e 40mm.

Ultrapassado aquele incidente os registos das leituras não tiveram grandes variações pois, para além de não se encontrarem na zona de influência da escavação, encontram-se próximos da zona de emboquilhamento do túnel que se apresenta estável. Estas constações também se refletem nos valores das leituras, que variaram entre -27mm e -30mm, com fases de assentamento e de empolamento ligeiros (Gráfico 25).

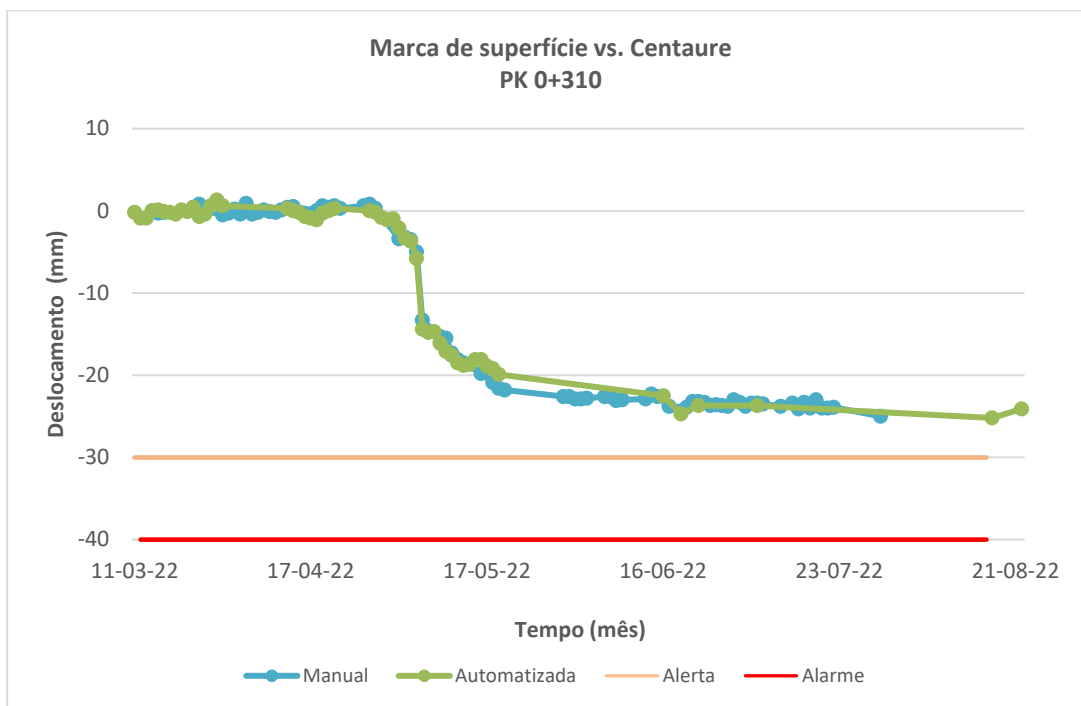


Gráfico 27 - Histórico das leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto PK 0+310, com os novos níveis de referências

No gráfico 27, correspondente ao ponto quilométrico PK0+310, em secção do tipo C, que dista 0.4 metros do eixo do túnel, a 0.7 metros da abóbada. Desde o início das leituras, no mês de março de 2022, até à data última das leituras manuais, os dois tipos de leituras mostram uma coerência entre os valores registados. As opções pela leitura automatizada na fase final do acompanhamento são as mesmas do ocorrido para o caso do PK 0+327. Igualmente são válidas as mesmas justificações para as variações abruptas dos registos e para a redefinição dos níveis de referência (Gráfico 27). Desde a data de início das leituras até a data última de colheita dos dados, os valores variam entre os -2.5mm até aproximadamente 1mm não sendo, por conseguinte, ultrapassados os novos níveis de alerta de alarme, respetivamente 30mm e 40mm.

Ainda no âmbito das leituras manuais e automatizadas, a Figura 61 seguidamente ilustrada, representa a Marca de superfície situada ao PK 0+269, que dista 0.9 metros do eixo do túnel do Ramal-1, em secção do tipo C a 0.7m da abóbada do túnel.



Figura 61 - Fotografia capturada pela autora da localização da Marca de Superfície ao PK 0+269

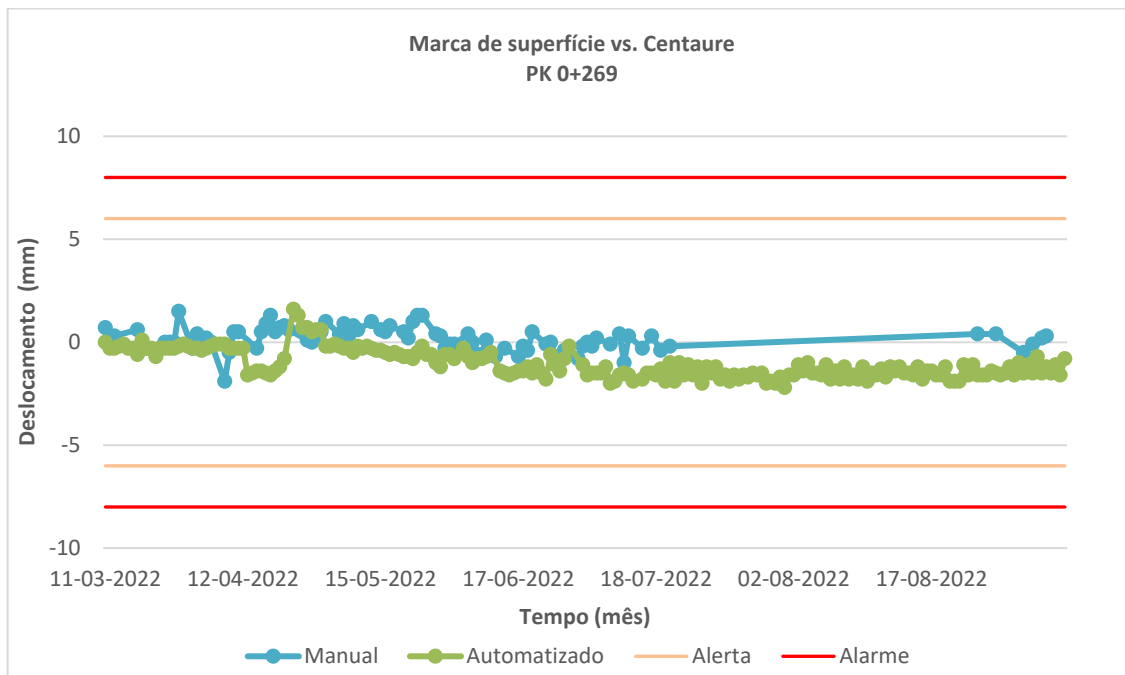


Gráfico 28 - Leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto PK 0+269

Tendo como ponto de partida o Gráfico 28, constata-se que as leituras feitas manualmente e automatizadas são similares, o que enfatiza a fidelidade das leituras recolhidas neste ponto podendo-se verificar que os deslocamentos à superfície variam entre -2 a 2 mm.

Ao longo do tempo as leituras mostram ser uniformes com as pequenas variações, resultantes das especificidades de cada método, verificando-se que não foram ultrapassados os níveis de referencia, de alerta e de alarme, sendo respetivamente 6mm e 8mm.

Analisam-se de seguida as leituras das marcas de superfície e dos prismas de via no ponto quilométrico PK 0+247 em secção do tipo B, situados a 0.7m do eixo do túnel e 0.7m da abóbada do túnel. Para este caso, os prismas de via, estão situados lateralmente à tampa das marcas de superfície (Figura 62).



Figura 62 - Fotografia capturada pela autora da localização da Marca de Superfície ao PK 0+247

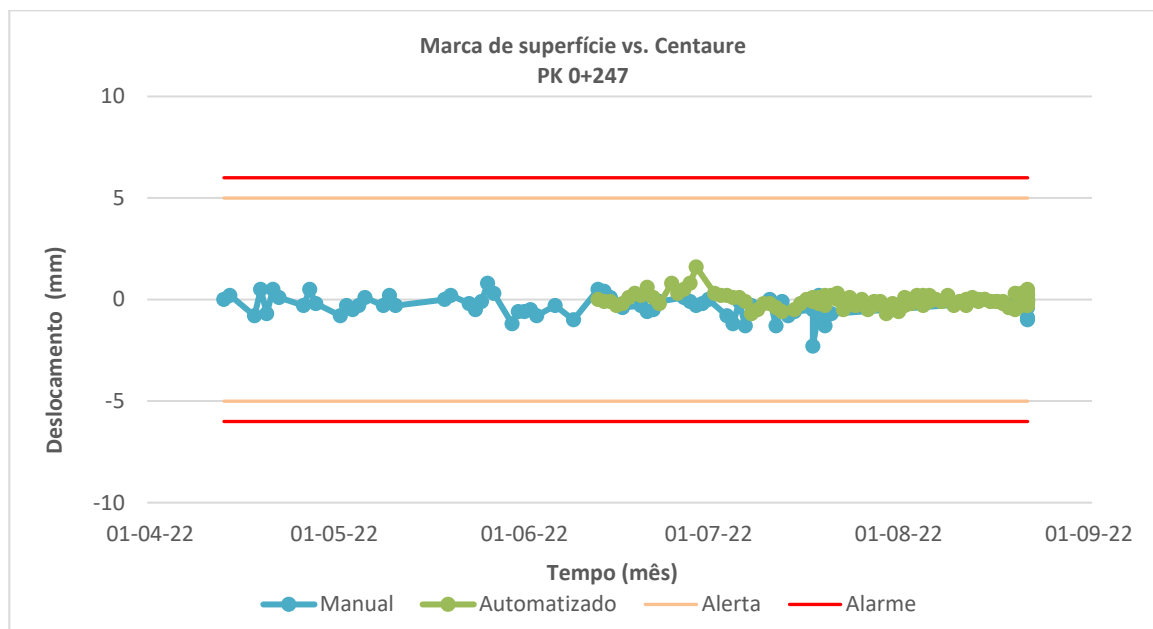


Gráfico 29 - Leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, no ponto PK 0+247

O início das leituras manuais foi o dia 13 de abril, e posteriormente no dia 13 de junho, 2 meses depois, as leituras automatizadas tiveram o seu início.

A partir deste momento, quando as leituras começaram a ser simultâneas, pelo gráfico acima, pode-se constatar que os registos indicam valores similares, sendo que as leituras manuais apresentam poucas variações num intervalo entre os -3mm ate 1mm, e as leituras automatizadas entre -1 e 1mm, constatando-se serem estas mais uniformes.

Os níveis de alerta e de alarme definidos em projeto não foram ultrapassados, sendo estes respetivamente 5mm e 6mm, o que indica que há pouca incidências dos trabalhos de escavação neste ponto do túnel.

Seguidamente apresentam-se as leituras no ponto quilométrico PK0+154 na câmara de alargamento do Ramal-2, que dista 0.4 metros do eixo do túnel e a 0.7 metros da abóbada. A localização prevista para o prisma de via e da marca de superfície (Figura 63) devem-se ao facto de ser uma zona de alargamento do túnel, e por essa razão as deformações podem ser mais relevantes no local.



Figura 63 - Fotografia capturada pela autora da localização da Marca de Superfície e Prisma de via ao PK 0+154

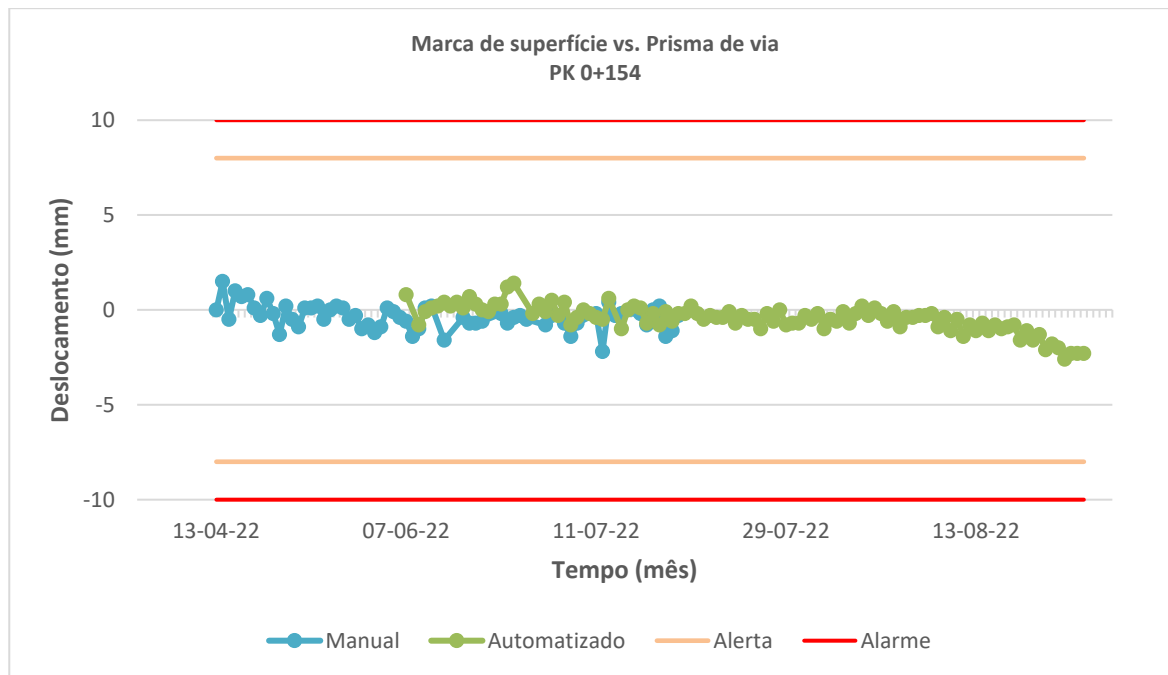


Gráfico 30 - Leituras manuais e automatizadas do assentamento superficial do maciço, ao PK 0+154

O gráfico acima representa pequenas variações desde o início das leituras, em abril do corrente ano, até meados de agosto, e por inerência demonstra haver estabilidade no ponto PK 0+154, embora demonstre pequena tendência de assentamento no final do mês de agosto. Neste contexto, os níveis de alerta e de alarme, respetivamente 8mm e 10mm no ponto M1, não foram ultrapassados.

Pinos de nivelamento vs. Alvos/prismas refletores

A implementação de dispositivos de leitura manual e automatizada num mesmo ponto, tem a ver com a complementariedade na análise e interpretação dos dados. No caso concreto da obra, apenas o edifício X31 representado na Figura 64, foi escolhido como objeto de estudo e deste modo os dispositivos foram instalados nos vértices dos edifícios da fachada mais próxima do eixo do túnel, que dista 13 metros do mesmo.

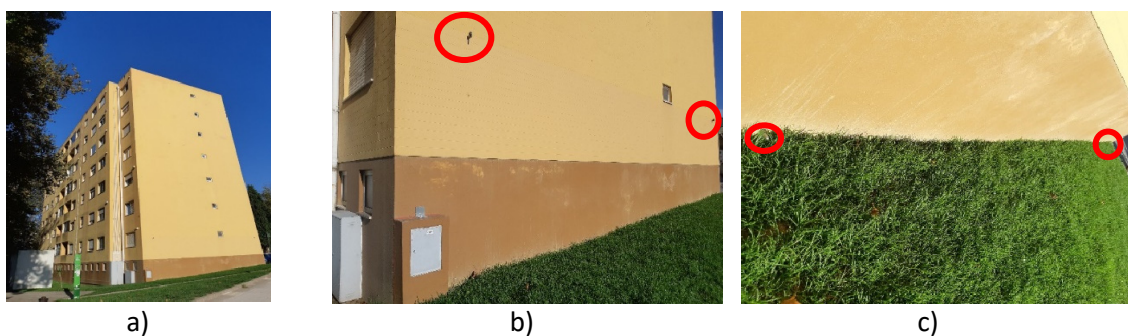


Figura 64 - Fotografias capturada pela autora do Edifício X31, na zona envolvente. a) Pormenor do edifício. b) Prismas refletor. c) Posição dos pinos de nivelamento na fachada do edifício.

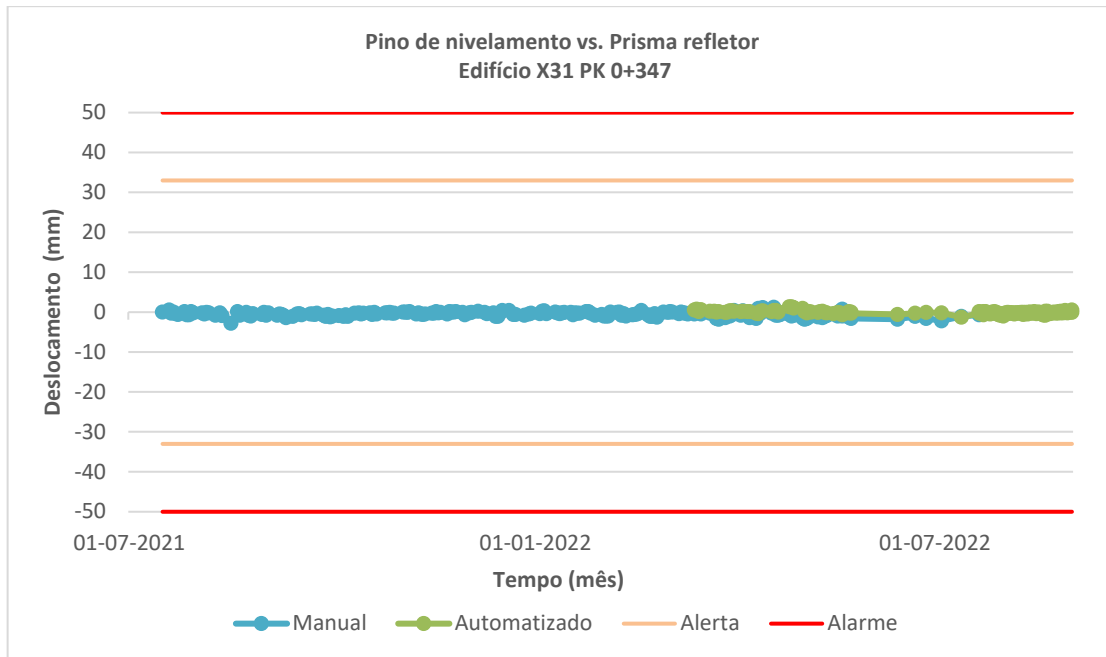


Gráfico 31 - Leituras manuais e automáticas do assentamento no edifício X31 da zona envolvente, no ponto PK 0+347

O Gráfico 31, representa as deformações ocorridas no edifício X31 ao PK 0+347, que embora se situe mais próximo da trincheira coberta, teve também a influência das escavações do túnel, e dista 13 metros do eixo do seu eixo. A tendência das leituras indica alguma harmonia entre os dois métodos, com a deformação a variar entre -2.5 a 1.5 mm, fazendo-se notar mais leituras no método automatizado nos finais do mês de Agosto (Gráfico 32).

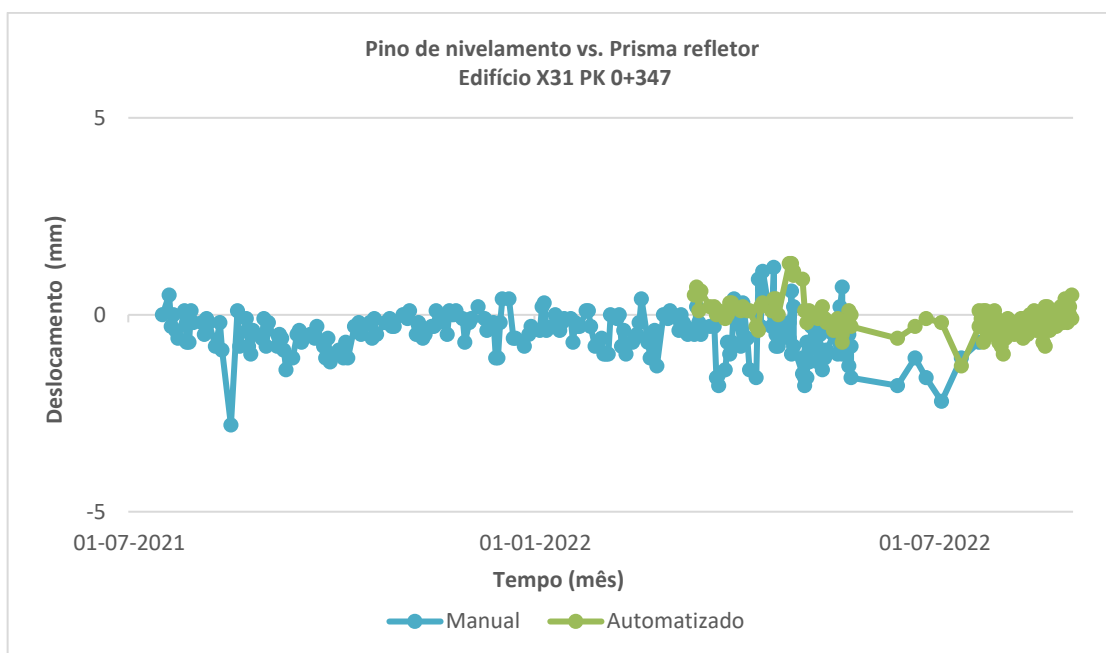


Gráfico 32 - Pormenor das leituras manuais e automáticas do assentamento no edifício X31 da zona envolvente, no ponto PK 0+347

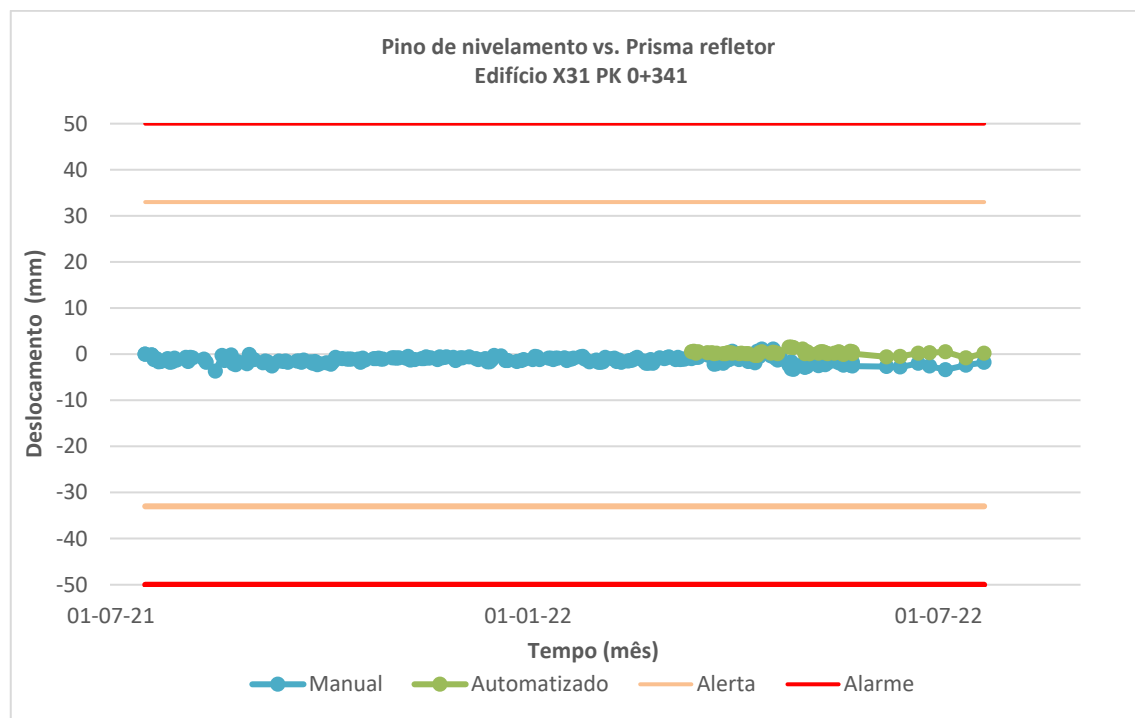


Gráfico 33 - Leituras manuais e automáticas do assentamento no edifício X31 da zona envolvente, no ponto 0+341

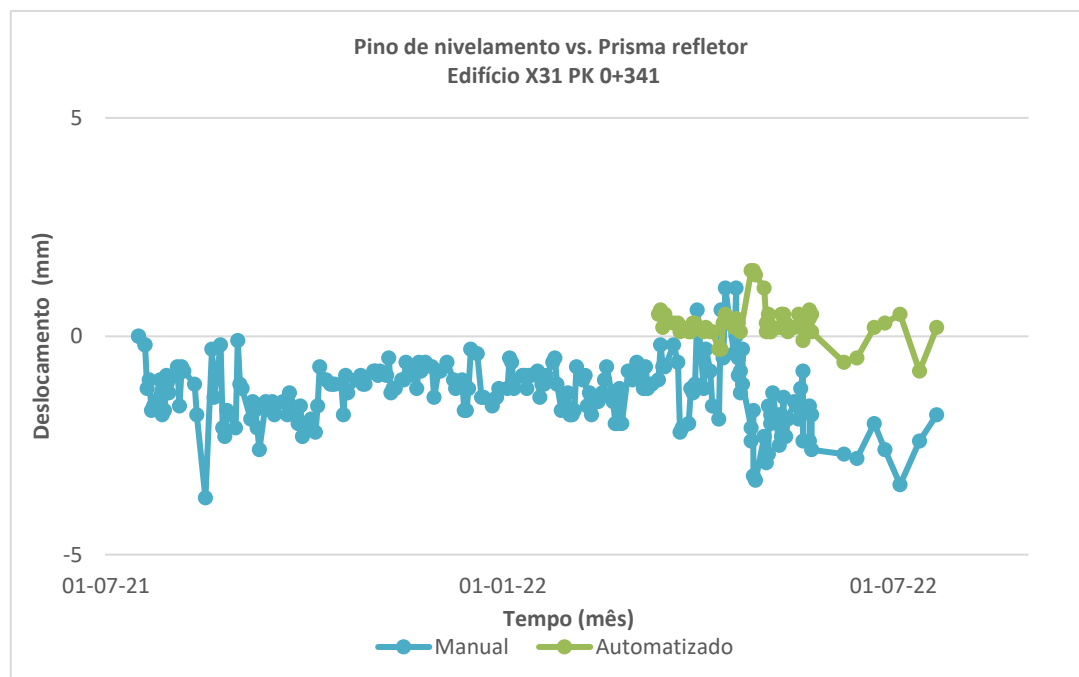


Gráfico 34 - Pormenor das leituras manuais e automáticas do assentamento no edifício X31 da zona envolvente, no ponto 0+341

Os gráficos 33 e 34 correspondem às leituras manuais e automatizadas do mesmo edifício ao PK 0+341. Apresentam uma imagem gráfica que sugere ligeira discrepância entre os valores obtidos, no PK 0+341, contudo as deformações ao longo do tempo são estáveis, entre as leituras nos dois métodos de leitura.

Em termos qualitativos, as leituras manuais relativas ao edifício X31 apresentam uma grande variabilidade podendo-se verificar um assentamento até aos -4mm, ao passo que as leituras automáticas indicam menor dispersão desde a instalação com registos máximos na ordem dos 2mm.

Estas diferenças interpretam-se como estando correlacionadas com o maior erro associado às leituras manuais. Efetivamente o facto das leituras manuais serem feitas entre 1 a 2 vezes por dia e as automatizadas serem feitas com uma periodicidade ao longo do dia, ou seja registando-se 24 leituras diárias, tem influência na fiabilidade dos valores obtidos atenuando, por exemplo, o efeito das vibrações no maciço causadas pelas escavações. Apesar dessas considerações ressalva-se que as duas metodologias estão muito afastados dos níveis de alerta e de alarme, respetivamente 33mm e 50mm, sendo possível afirmar que o edifício encontra-se estável ao longo do tempo de observação.

5.3. *Gestão e Avaliação de risco concebido para o Ramal-1*

Tomando como base de trabalho os registos da instrumentação selecionada, e como síntese da mesma, nesta secção procede-se a uma avaliação de risco da obra em apreço considerando como referência as metodologias e procedimentos previsto nos elementos de projeto da mesma.

De acordo com essas propostas a análise de risco de danos nos edifícios (Quadro 27) tem em consideração as deformações e a vulnerabilidade de cada edificação na zona envolvente da obra que é estimada com base em pesquisas de campo.

A vulnerabilidade por sua vez, foi avaliada com base em vistorias e levantamento das informações de cada edifício, que por sua vez, contempla diversos aspetos como:

- Tipo de estrutura: betão, metálica, madeira, alvenaria estrutural;
- Tipo de vedação: blocos cerâmicos, blocos de betão, tijolo, dry-wall, etc.
- Finalidade do respetivo edifício comercial, residencial, hospital, escola, etc.
- Estado de conservação;

Quadro 26 - Assentamentos e distorções associados à categoria de danos dos edifícios. (Adaptado de Memória descritiva, avaliação de riscos tomo-3, Metro do Porto)

Categoria e tipo de dano			1 - Estético	2 - Estético	3 - Funcional	4 - Estrutural
Vulnerabilidade	Muito baixa	Assentamento (mm)	<10	$10 \leq x < 50$	$50 \leq x < 75$	≥ 75
	Baixa		<8	$8 \leq x < 40$	$40 \leq x < 60$	≥ 60
	Média		<7	$7 \leq x < 33$	$33 \leq x < 50$	≥ 50
	Alta		<6	$6 \leq x < 28$	$28 \leq x < 43$	≥ 43
	Muito alta		<5	$5 \leq x < 25$	$25 \leq x < 38$	≥ 38

Para determinação da categoria de danos, fez-se o Levantamento Patrimonial dos Edifícios denominados como Correntes e Especiais que por sua vez foram selecionados atendendo à sua especificidade no que diz respeito à sua dimensão, tipologia e função, tendo como base os critérios de projeto estipulados no Caderno de Encargos, e desta forma foram vistoriados os edifícios situados até uma distância dos limites de escavação igual a 1,5 vezes a profundidade máxima onde se encontra a base da soleira do túnel.

A metodologia adotada baseou-se na observação exterior dos imóveis/edifícios, seguindo-se uma observação pelo interior dos mesmos com autorização e acompanhamento dos ocupantes e a recolha de elementos de projeto da edificação em questão, caso houvesse acesso a essas peças desenhadas.

Com base na metodologia descrita, para detetar as anomalias, foram adotados critérios de divisão das mesmas conforme a sua gravidade que se resumem no Quadro 28, e desta forma teremos:

Quadro 27 - Enquadramento das categorias e descrição de danos e medidas a serem tomadas. (Adaptado de Memória descritiva, avaliação de riscos tomo-3, Metro do Porto)

Categoria de danos	Descrição dos danos	Medidas a serem tomadas
1 – Estético	Aparecimento de fissuras na ordem dos 0.1-1mm. Reparáveis com intervenções locais.	Instrumentação convencional e reparação de eventuais danos posteriores à escavação.
2 – Estético	Aparecimento de fissuras na ordem dos 1-5mm. Reparáveis com intervenções locais.	
3 – Funcional	Aparecimento de fissuras na ordem dos 5-20mm. Reparáveis com substituição de partes do sistema de vedação. Dificuldade para fechar portas e janelas.	Instrumentação especial, e tomada de medidas para minimizar os assentamentos no edifício em questão.
4 – Estrutural	Reparáveis com substituição de elementos inteiros do sistema de vedação. Fissuras em elementos estruturais como pilares, vigas e lajes.	Instrumentação especial, e eventual reforço de fundação previamente à passagem do túnel.

Quadro 28 - Critérios de avaliação da gravidade das anomalias. (Adaptado de Projeto De Execução Volume 21 – Levantamento Patrimonial e Avaliação de Riscos Tomo 2 - Edifícios Correntes e Especiais Memória Descritiva)

Tipo de anomalia	Descrição
Sem anomalia	Ausência de anomalias
Muito ligeira	Anomalias sem impacto estrutural
Ligeira	Anomalia que tem impacto prejudicial no aspeto e que requerem trabalhos de fácil execução
Média	Anomalias que prejudicam o uso e conforto, requerem trabalhos de limpeza, reparação com facilidade de execução
Grave	Anomalias que impactam de forma prejudicial a saúde e a segurança, que podem causar acidentes ligeiros, e requerem trabalhos de fácil execução
Muito grave	Anomalias que colocam em risco a saúde e a segurança, causando acidentes graves a muito graves; Sem infraestrutura básica;

Com base na categorização apresentada no Quadro 29, foram estimados estatisticamente os edifícios por categoria, destacados na Figura 65:

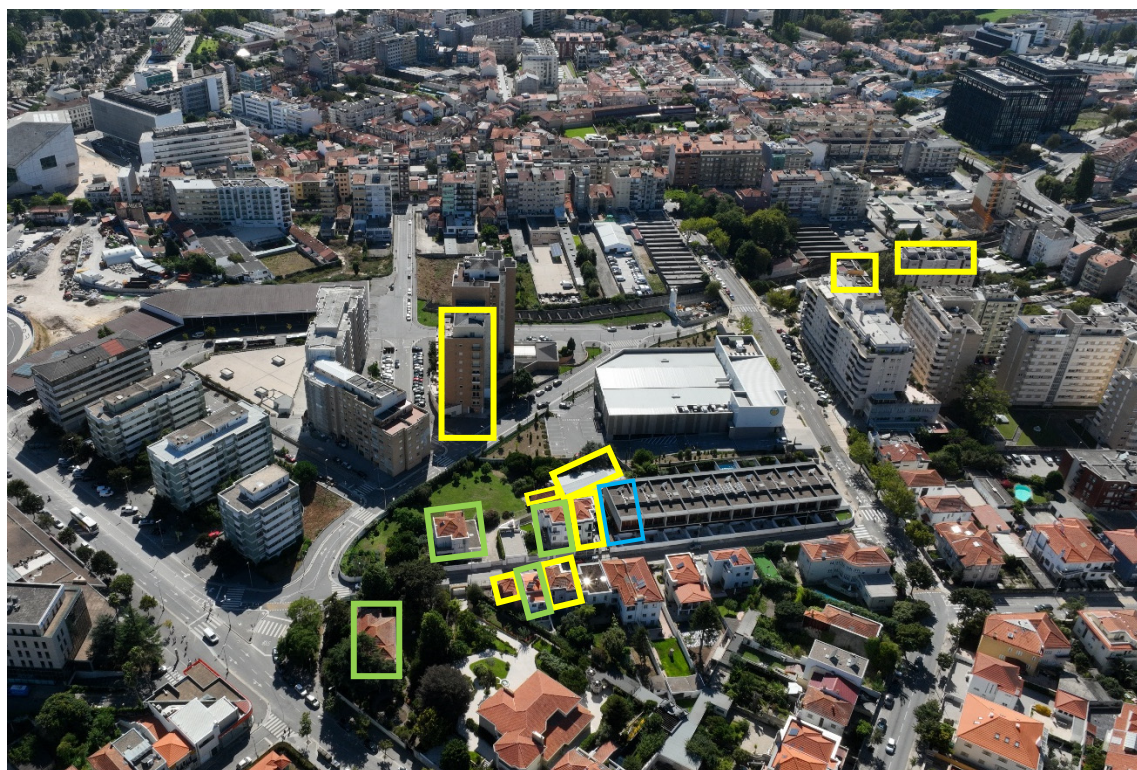


Figura 65 - Fotografias capturadas por veículo aéreo não tripulado, com acompanhamento da autora, das edificações da zona envolvente do Ramal-1 com a identificação das anomalias.

Quadro 29 - Estatística do Levantamento Patrimonial dos Edifícios da zona envolvente do Ramal 1. (Adaptado de Projeto De Execução Volume 21 – Levantamento Patrimonial e Avaliação de Riscos Tomo 2 - Edifícios Correntes e Especiais Memória Descritiva)

Tipo de anomalia	Quantidade	Percentagem
Sem anomalia	1	7.69%
Muito ligeira	4	30.77%
Ligeira	0	0%
Média	8	61.54%
Grave	0	0%
Muito grave	0	0%
Total	13.00	100%

Da sistematização resultante do Levantamento Patrimonial identificaram-se os edifícios X31, X32, Mercadona (sobreposto ao túnel) e 8 (localizado numa zona de grande influência das escavações) como mais relevantes para acompanhamento durante a construção do túnel e dos registos obtidos com a monitorização verifica-se que:

- Correspondem a construções com vulnerabilidade média, e que quando sujeitas a alguma deformação a mesma pode variar até aos 7mm, apresentam danos estéticos, com aparecimento de fissuras entre 0.1-1mm (com exceção do edifício Mercadona), e que foram classificados no levantamento patrimonial como edifícios sem anomalias. Relativamente as medidas a serem tomadas, recorre-se à instrumentação convencional e a reparação de eventuais danos causados pela escavação;
- Apesar do edifício 8 ter sofrido um ligeiro impacto das obras, os registos obtidos com a monitorização não indicam que tenham sido ultrapassados os limites admitidos para as deformações características indicando ainda uma estabilidade dos mesmos.

Capítulo VI
Conclusões

(página propositadamente em branco)

6. Conclusões

Com base no acompanhamento da instalação e leituras bem como da análise dos resultados obtidos com a monitorização manual e automática, no âmbito da instrumentação do Ramal-1 da Linha Circular do Metro do Porto é possível retirar um conjunto de conclusões a seguir resumidas.

Erros de leitura

Foi possível constatar que os eventuais erros no procedimento podem estar associados às leituras, tanto no método manual como no método automatizado. Estes erros podem ter origem em fatores diversos podendo ser sistematizados de acordo com o que se segue (Adaptado de Silva, 2021).

Erro aleatório: Ruídos, obstáculos e mudanças ambientais

Exemplos:

- Prismas instalados nos pilares do parque de estacionamento do Mercadona;
- Prismas instalados no edifício 8 com algumas ausências de leituras causadas pela presença da árvore cujos ramos/folhagem ao oscilarem com o vento podem entrar em conflito com a obtenção de leituras;
- Colocação das estações totais relativamente próxima da zona do estaleiro, uma vez que esta é afetada pelos equipamentos utilizados nos trabalhos da obra, o que gera movimento naquele local e geração de poeiras;

Soluções:

- Implementação de leituras manuais complementares para servirem de ferramenta meramente comparativa (contributo da autora);
- Identificação e eliminação dos obstáculos;

Erro ambiental: Vibrações, poeiras, temperatura e clima

Exemplos:

- Prismas de via situados ao longo da Linha de Metro existente influenciados pela movimentação das carruagens;
- Viaduto R. Domingos Sequeira com a circulação de veículos rodoviários.

Soluções:

- Controle de velocidade dos veículos rodoviários no troço do viaduto R. Domingos Sequeira (contributo da autora);
- Escolha apropriada das especificações dos dispositivos.

Erro grosseiro: Falha no equipamento de leitura e de aquisição dos dados (computacional), in experiência da equipa

Exemplos:

- Leituras anómalas (picos nos gráficos) (Gráfico 24 e 25)

Tratando-se de estações totais robotizadas posicionadas na zona superior em haste metálica, embora esteja isolado termicamente, pode sofrer efeito das variações da temperatura uma vez que os metais são bons condutores de calor;

Pode ainda ter a ver com erros relacionados com os pontos de referência (ocupação destes pontos ou mesmo a presença de obstáculos: equipamentos, árvores, ocultação do próprio dispositivo).

Soluções:

- Colocação do equipamento em haste de betão pré-fabricado recorrendo a alarmes de segurança para proteção contra vandalismos (contributo da autora).
- Implementação de métodos estatísticos para que eventuais erros de leituras automatizadas sejam minimizados ao mesmo tempo que se identifica e corrige tais erros.

Erro sistémico: Histerese

Exemplo:

- Marcas de superfície nos PK0+327 e PK0+310 que tiveram a influência dos tratamentos realizados na abóbada do túnel, e não causados pelo deslocamento do próprio maciço a superfície.

Soluções implementadas:

- Retroanálise;
- Verificação do deslocamento para o interior do túnel;
- Alteração dos níveis de referência nas marcas de superfície;
- Adoção de medição automatizada (pontos Centaure);

As leituras automatizadas podem ser obtidas com uma maior frequência (no caso em concreto a cada hora), permitindo determinar a mediana das tais leituras e em consequência um maior rigor, quando comparadas com as leituras manuais que refletem valores unitários. Assim sendo as leituras manuais são mais suscetíveis a erro, como por exemplo ao efeito da temperatura, cujo efeito é ainda mais atenuado com as leituras automatizadas pelo facto de serem obtidas em maior número. Adicionalmente, o método das leituras automatizadas, enquanto permite a recolha de

vários dados em tempo real, é de grande utilidade pois permite que sejam feitas previsões fiáveis de ocorrências futuras o que se revela numa importante mais-valia técnica e de conhecimento.

Custos

Embora as leituras automatizadas em comparação com as manuais sejam mais dispendiosas no que diz respeito aos custos associados à aquisição dos equipamentos de leitura (custos iniciais), quando contabilizamos os custos globais da operação associados às equipas de leitura e à obtenção de licenças de ocupação da via, bem como o resultante de acompanhamento policial verifica-se que a opção pelas leituras automatizadas possui vantagens económicas.

Um outro facto que influencia significativamente aqueles custos está associado aos tempos de leitura e de instalação. Relativamente ao tempo de leitura manual, os níveis topográficos devem iniciar e terminar o procedimento num mesmo ponto o que pode levar cerca de 1 hora ou mais, e quando são detetados erros o procedimento deve ser repetido. No caso concreto testemunhado pela autora, uma equipa topográfica de 2 elementos, escalada para medir os deslocamentos à superfície em via rodoviária na presença de acompanhamento policial (Figura 36), significa que um nível faz a leitura de pelo menos 23 dispositivos, e outra equipa igualmente de 2 elementos é escalada para a medição dos pinos de nivelamento nos edifícios.

O tempo de instalação em série de dispositivo de leitura manual como as marcas de superfície, pode ser de 1 dia ou até mais se estiverem na presença de serviços afetados, enquanto os prismas de via demoram cerca de 5min a instalar. Para os dispositivos que fazem leitura nos edifícios como os pinos de nivelamento, comparados com os alvos/prismas refletores o tempo é similar.

Já através de uma estação total, em menos de 1 hora, pode fazer-se a leitura de todos os dispositivos dentro da sua área de alcance, situação testemunhada pela autora.

Face ao exposto, as leituras automatizadas mostram ser uma vantagem importante pois não necessitam de muito tempo para proceder às leituras dos vários dispositivos, efetuando-se remotamente sem qualquer constrangimento no contexto em que se inserem. Adicionalmente, tratando-se das leituras automatizadas, como o caso dos prismas refletores nos edifícios, os prismas de via e extensómetros automatizados para sua instalação serão necessários meios humanos nas vias públicas, contudo durante as leituras a intervenção humana é pontual (operações de manutenção) o que contribui igualmente para a minimização dos respetivos custos.

Relativamente aos custos, considerando uma secção de instrumentação no túnel, compreendendo marcas de superfície, prismas de via na tampa do extensómetro e extensómetros, para projetos futuros que tenham esta obra como referência, propõe-se que se adote os extensómetros de vara

multiponto, para que possam medir os deslocamentos verticais a profundidades diferentes, desde a superfície até uma profundidade maior, com intervalos regulares.

Operacionalidade

Face aos objetivos do presente trabalho, ao compararmos as leituras manuais *versus* automatizadas, os resultados obtidos são uma opção a adotar numa empreitada como a Linha Circular do Metro do Porto, tratando-se de uma obra subterrânea em meio urbano, a sua extensão, o número de dispositivos instalados e os diversos conflitos com o meio urbano em que se insere. As leituras automatizadas, ao permitirem a monitorização de locais de acesso condicionado (por exemplo em altura ou mesmo em zonas privadas), uma vez que a aquisição das leituras é feita remotamente minimizam os referidos conflitos. Nestes casos o condicionamento provocado pelos dispositivos de instrumentação instalados nas vias públicas é insignificante para a circulação de peões e veículos automóveis, dado que as leituras serão efetuadas remotamente sem entrarem em conflito com o quotidiano do meio urbano, em particular com a circulação de veículos nas vias rodoviárias, algumas de trânsito intenso.

Salienta-se ainda que estes equipamentos de leitura (estação robotizada) revelam também uma grande versatilidade uma vez que num mesmo raio de influência podem medir prismas no maciço, estruturas e edifícios (via Linha de Metro e Viaduto) e pontos de referência, apresentando uma rápida capacidade de resposta atendendo a que permitem o acesso às leituras em tempo real possibilitando assim uma melhor prevenção de eventuais riscos e de uma forma mais eficaz, e obter uma rede mais equilibrada.

Ainda neste âmbito das estações robotizadas, constituem vantagem pelo facto de avaliar deslocamentos nas três direções (segundo X, Y e Z) ao passo que os níveis topográficos permitem avaliar deslocamentos apenas (segundo Z).

Sob o ponto de vista operacional, está associada a temperatura que, dentro das funcionalidades as estações robotizadas, permitem a medição e correção das temperaturas no interior e exterior do túnel, tendo como ponto de partida a temperatura ambiente, e este fator constitui uma vantagem relativamente as medições manuais. Ainda relacionado com a temperatura, verificou-se no caso concreto dos prismas colocados na via de Metro tiveram dois valores distintos refletindo em empolamento na ordem dos (0.1-1.2mm) com a variação média da temperatura de 7°C nas datas de observação. Para além da variação da temperatura ao longo do dia, pode estar associada provável dilatação dos carris, uma vez que os prismas estão instalados imediatamente no suporte dos mesmos.

Análise global

Fazendo uma análise de forças, oportunidades, fraquezas e ameaças, ao longo da execução do presente trabalho, foi possível identificar os aspetos seguintes:

Forças

A implementação da instrumentação automatizada como método alternativo de controlo na fase de construção da obra é uma mais-valia por se tratar de um meio urbano em que as estruturas existentes e a dinâmica do cotidiano da cidade, são condicionantes para o controle da obra. Desta forma é possível reduzir o risco do impacto de uma construção desta dimensão e tipologia em meio urbano, para além de ter percussões nos meios humanos disponibilizados para realizar as leituras manuais, como também reduz o tempo para os obter.

A recolha de vários dados em tempo real é uma vantagem, para que se possam ser tomadas as medidas corretivas e adequadas de forma antecipada, consoante a situação, e permite ainda a obtenção de um maior número de registos o que, do ponto de vista estatístico, contribui para a minimização dos erros, ou ainda permite que sejam feitas previsões de ocorrências futuras.

Oportunidades

Como oportunidade, os métodos de leitura e interpretação de dados manuais e automatizados, permitiram o desenvolvimento de Software disponível em tempo real (*online*) de gestão e apresentação de resultados.

Para além deste fator, a implementação da instrumentação possibilitou parcerias entre várias empresas de domínios específicos indispensáveis para a instalação e leitura da instrumentação.

Por ser pouco frequente a existência de obras com recurso a medições automatizadas e manuais em simultâneo, o presente caso pode servir de referência para outros estudos e projetos a realizar posteriormente em Portugal, ou em outras geografias onde esta metodologia não terá sido ainda aplicada.

Considerando o facto de as leituras manuais resultarem de valores isolados, e as automáticas refletirem uma mediana de uma série de leituras em tempo real, esta última possibilitará o desenvolvimento de Software específico e que potencie as diferenças entre as duas metodologias, enquanto permitirá fazer previsões de ocorrências futuras.

Fraquezas

Como fraqueza refere-se ao custo inicial das instalações automatizadas como eventual limitação da sua implementação.

Um segundo grupo de fraquezas está associado a erros e falhas do sistema. As estações totais robotizadas estão suscetíveis a erros de ângulo e de leitura, ao passo que os níveis estão apenas sujeitos a erros de leitura. Ainda neste âmbito, a metodologia automatizada recorrendo às estações totais pode apresentar falhas de distribuição de energia elétrica, e os coletores de dados estarem sujeitos a descarregamento da bateria (embora sejam um bom investimento), podem colocar em causa o registo de leituras em pontos críticos. Como também fatores climáticos (temperatura, humidade, precipitação), podem condicionar as leituras automatizadas derivado dos longos períodos de exposição dos equipamentos e demais elementos da infraestrutura.

Relativamente aos pontos centrais, dependendo da natureza da superfície do solo, a medição de pontos virtuais pode ser anulada em casos de chuva persistente ou de humidade permanente isto porque a medição está também relacionada com a qualidade de reflexo da superfície e do ângulo de incidência.

Para além disto, podem existir questões associadas a instalação da estrutura de suporte da estação robotizada ou do coletor de dados, que poderão ter influência nas leituras.

A considerar as leituras manuais, constata-se que refletem valores unitários e por consequência estão suscetíveis a erros de medição, mas esta metodologia continua sendo recorrida para mercados onde a mão-de-obra é de baixo custo. Neste sentido, propõe-se que as leituras aumentem de frequência nas zonas de maior influência da escavação ou nos pontos críticos, em pelo menos duas vezes para reduzir erros associados as leituras.

Ameaças

As ameaças aos procedimentos estão associadas a avanços tecnológicos que tornem sem funcionalidade os métodos e investimentos anteriores. As causas são diversas, mas pode-se destacar o grande recurso a meios humanos e intervenções nos edifícios e maciço em maior quantidade, e por isso apesar de existirem custos, estes vão sendo direcionados para outras necessidades inerentes.

Por exemplo, o sistema de nivelamento líquido para leituras manuais em edifícios está agora descontinuado e substituído por clinómetros automatizados.

Assim um facto que se pode constatar é que o surgimento das leituras automatizadas tem comprometido os recursos associados às leituras manuais, por outro lado, novas técnicas (como por exemplo as associadas a monitorização por *drone* ou satélite), analogicamente, poderão conduzir ao abandono dos atuais procedimentos automatizados.

Referências Bibliográficas

(página propositadamente em branco)

7. Referências Bibliográficas

- Afonso, M.J., Chaminé, H.I., Gomes, A., Teixeira J., Araújo, M.A., Fonseca, P.E., Carvalho, J.M., Marques, J.M., Marques da Silva, M.A. & Rocha, F., 2004. Cartografia geológica e geomorfológica estrutural da área metropolitana do Porto: implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Xeográfica: revista de xeografia, território e medio ambiente*, Santiago de Compostela, 4: 101-115.
- Afonso, M.J.; Chaminé, H.I.; Carvalho, J.M.; Marques, J.M.; Gomes, A.; Araújo, M.A.; Fonseca, P.E.; Teixeira, J.; Marques da Silva, M.A.; Rocha, F.T., 2007. Urban groundwater resources: A case study of Porto City in northwest Portugal. In: Howard, K.W.F. (ed.), *Urban Groundwater: Meeting the Challenge*. International Association of Hydrogeologists Selected Papers; Taylor & Francis Group: London, UK, 8:271–287.
- Almeida, A., 2006. Geology and urban landscape: The granite in Oporto, NW Portugal. *European Geologist Journal*, 21: 4–8.
- APG, 2022. Instrumentação e monitorização de túneis e escavações profunda em meio urbano, Definições e conceitos: Módulo I. APG/GEOINT. (Relatório inédito)
- APG, 2022. Instrumentação e monitorização de túneis e escavações profunda em meio urbano, os equipamentos tradicionalmente utilizados: Módulo II. APG/GEOINT. (Relatório inédito)
- APG, 2022. Instrumentação e monitorização de túneis e escavações profunda em meio urbano, Plano de instrumentação-planear antes de medir: Módulo III. APG/GEOINT. (Relatório inédito)
- APG, 2022. Instrumentação e monitorização de túneis e escavações profunda em meio urbano, Preço: Módulo IV. APG/GEOINT. (Relatório inédito)
- APG, 2022. Instrumentação e monitorização de túneis e escavações profunda em meio urbano, Fase construtiva-Medir para controlar: Módulo V. APG/GEOINT. (Relatório inédito)
- APG, 2022. Instrumentação e monitorização de túneis e escavações profunda em meio urbano, Fase de exploração - Instrumentação para a vida da estrutura: Módulo VI. APG/GEOINT. (Relatório inédito)
- Araújo, M.A.; Gomes, A.; Chaminé, H.I.; Fonseca, P.E.; Gama Pereira, L.C., Pinto de Jesus, A., 2003. Geomorfologia e geologia regional do sector de Porto-Espinho (W de Portugal): Implicações morfoestruturais na cobertura sedimentar Cenozóica. *Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe, A Coruña*, 8:79–105.
- Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P. & Cardoso, A.S., 2004. Characterization of granite and the underground construction in metro do Porto, Portugal. In: Viana da Fonseca A. & Mayne P.W. (Eds.), *Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, Millpress, Rotterdam, 1: 39-48.
- Bastos, M.J., 1998. A geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos. Universidade Técnica de Lisboa. 166 p. (Dissertação de Mestrado)
- Begonha, A. & Sequeira Braga, M.A., 2002. Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties. *Catena*, 49: 57–76.
- Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Robalo, P.M., Rodrigues, P., Cortez, C., Monteiro Santos, F.A., Plancha, J.P., Fonseca, P.E., Gomes, A., Devy-Vareta, N.F., Marques, J.M., Lopes, M.E., Fontes, G., Pires, A., Rocha, F., 2010a. Urban speleology applied to groundwater and geo-engineering studies: underground topographic surveying of the ancient Arca D'Água galleries catchworks (Porto, NW Portugal). *International Journal Speleology* 39(1):1–14.
- Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Silva, R., Monteiro, R., Teixeira, J., Moreira, P., Meixedo, J.P. & Trigo, J.F., 2010b. Da teoria à prática em geotecnia urbana de maciços rochosos: o exemplo da zona ribeirinha de Gaia. *Tecnologia e Vida, Revista da Secção Regional do Norte da ANET, Porto*, 6: 39-45.
- Chaminé, H.I., Gama Pereira, L.C., Fonseca, P.E., Noronha, F. & Lemos de Sousa, M.J., 2003. Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto–Albergaria-a-Velha–Coimbra–Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena (Maciço Ibérico). *Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe*, 28:37 - 78.
- COBA—Consultores de Engenharia e Ambiente, SA, 2003. Carta geotécnica do Porto. 2ª edição. COBA/FCUP/CMP, Porto.

Dunnicliff, J., 1988. In: Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & Sons. Washubgton D. C. 6-7p.

Especialização de Geotecnia (Ordem dos Engenheiros), 2020. Recomendações na área da geotecnia. Ingenium Edições, Lisboa. 31-32p.

Fernandes, J.A., 2003. A cidade, os municípios e as políticas: o caso do grande Porto. Revista Sociologia, Faculdade de Letras do Porto. (<https://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/artigo12471.pdf>)

Gomes, B.M., 2009. Análise de risco e segurança na construção de túneis. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 94 p. (Dissertação de Mestrado)

González de Vallejo, et al., 2002. Ingeniería Geológica. Prentice Hall, Madrid. 533-536 p.

Gramini, M. et al., 2018. O Uso de drone multirrotor de pequeno porte para diagnóstico e monitoramento de acidentes geológicos. 19º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 1-2p.

Hoek E., & Brown E.T., 1980. Underground Excavations in Rock. London: Inst. Min. Metall. pp. 382-394.

Issufo, I., 2016. Escavações em meio urbano utilizando a metodologia Top-Down. O caso da Torre Platinum em Maputo, Moçambique. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra. (Dissertação de Mestrado)

Lopes, J.M., 2015. Fotogrametria e deteção remota aplicada à prospeção mineira. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. (Dissertação de Mestrado)

Melo, R.A.A., 2013. Aspetos construtivos de túneis urbanos de baixa cobertura em solo – estudo de caso do túnel de acesso ao centro administrativo de Minas Gerais. Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP. 182p. (Dissertação de Mestrado)

Moreira, C.M.C., 2006. Túneis, uma herança ancestral rumo ao futuro. A obra nasce: revista de Arquitectura da Universidade Fernando Pessoa, Porto, 3:92-115.

NP EN 1997 – 1:2010 – Eurocódigo 7 – Projeto Geotécnico – Anexo J. Instituto Português de Qualidade, 2010.

Peck, R. B., 1969. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. In: Géotechnique 19. 171–187p.

Pires, A. C. et al., 2016. Influência do método construtivo de túneis convencionais em seus aspetos contratuais, 10o Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Porto Alegre.

Quadros, C. et. al, 2011. Instrumentation and Monitoring during Construction of the Ingula Power Caverns. In: Proceedings of the 15th African Regional Conference on soil mechanics and geotechnical engineering. 607-609 p.

Rajapakse, R, 2016. Geotechnical Engineering Calculations and Rules of Thumb. Second edition, Elsevier.

Rocha, M., 2013. Estruturas subterrâneas: túneis, cavernas, poços. Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa. 120 p.

Rocha, S. A., 2014. Instrumentação e monitorização de estruturas geotécnicas na rede ferroviária nacional. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 168 pp. (Dissertação de Mestrado)

Salgueiro, J.C., 2011. Túneis-Estado da Arte, Projeto e Obra: análise do projeto de execução e fase de obra do túnel da variante da trofa, da linha do Minho. Universidade do Porto. 246 pp. (Dissertação de Mestrado)

SENER, CJC-Engenharia e Projetos, NSEENGINEERING, 2019. Especificações técnicas -Volume 4: Projeto de execução. CJC-Engenharia e Projetos. (Relatório inédito)

SENER, CJC-Engenharia e Projetos, NSEENGINEERING, 2019. Especificações técnicas -Volume 4: Túneis, Tomo 4.1. Túneis de Via. Projeto de execução, Memória descritiva. CJC-Engenharia e Projetos. (Relatório inédito)

SENER, CJC-Engenharia e Projetos, NSEENGINEERING, 2019. Geologia e Geotecnia-Volume. 6: Projeto de execução, Memória Descritiva. CJC-Engenharia e Projetos. (Relatório inédito)

SENER, CJC-Engenharia e Projetos, NSEENGINEERING, 2020. Levantamento Patrimonial e Avaliação de Riscos - Volume 21: Edifícios Correntes e Especiais, Tomo 2. Projeto de execução, Memória descritiva. CJC-Engenharia e Projetos. (Relatório inédito)

Silva, A., 2021. A instrumentação geotécnica e a influência do fator humano, 17º Congresso Nacional de Geotecnia, Portugal. 2-5p.

Silva, A., 2021. Monitoramento geotécnico de obras subterrâneas com recurso a Shape Arrays Measurand, 5º Congresso brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas. São Paulo, Brasil. 3-4p.

Silva, C. M., 2001. Controlo da segurança de túneis ferroviários. Universidade do Porto. 293 p. (Dissertação de Mestrado)

SIXENSE, 2021. Dados técnicos – Calha inclinométrica. SIXENSE/Ferrovial ACA. (Relatório inédito)

SIXENSE, 2021. Dados técnicos – Inclinómetros. SIXENSE/Ferrovial ACA. (Relatório inédito)

SIXENSE, 2021. Dados técnicos – Marcas de superfície. SIXENSE/Ferrovial ACA. (Relatório inédito)

SIXENSE, 2021. Procedimento de instalação e medição alvos/prismas refletores. SIXENSE/Ferrovial ACA. (Relatório inédito).

SIXENSE, 2021. Procedimento de instalação e medição do Extensómetro de vara automatizado. SIXENSE/Ferrovial ACA. (Relatório inédito)

SIXENSE, 2021. Procedimento de instalação e medição do Indicador de nível de água. SIXENSE/Ferrovial ACA. (Relatório inédito)

SIXENSE, 2021. Procedimento de instalação e medição Inclinómetros. SIXENSE/Ferrovial ACA. (Relatório inédito).

SIXENSE, 2021. Procedimento de instalação e medição Marcas de superfície. SIXENSE/Ferrovial ACA. (Relatório inédito)

SIXENSE, 2021. Procedimento de instalação e medição Pinos de nivelamento. SIXENSE/Ferrovial ACA. (Relatório inédito).

SIXENSE, 2021. Procedimento de instrumentação ramal 1, ramal 2 e terminus Boavista/ Casa da música. SIXENSE/Ferrovial ACA. (Relatório inédito).

Sousa, J.R., 2020. Estudo e definição de critérios gerais de alerta e de alarme para muros de suporte e taludes rodoviários na sua fase de exploração. Casos de estudo. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. (Dissertação de mestrado)

Sousa, R.L., 2010. Risk analysis for tunneling projects. Massachusetts Institute of Technology. 589 p. (Tese de Doutoramento)

Tebar J. et al., 2014. Instrumentación y auscultación en el proyecto y construcción de túneles urbanos. 36p.

Torres, J.M., 2010. Métodos de observação durante a execução de obras subterrâneas. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 258 p. (Dissertação de Mestrado)

Vermelhudo, N.M., 2018, Consultoria e supervisão de obras subterrâneas – relatório de atividades profissional. Universidade Nova de Lisboa. 81p. (Dissertação de Mestrado)

Páginas consultadas na internet:

1. Geotecnia e Fundação LAN: <https://sites.google.com/site/geotecniaefundacaolan/166-piez> - (consultado no dia 7 de julho de 2022)
2. Telemac, 1947: <https://telemac.fr/en/products/?filters=inclinometer> – (consultado no dia 30 de julho de 2022)
3. Sisgeo, 1993: <https://www.sisgeo.com/products/inclinometers-and-tiltmeters.html> - (consultado no dia 30 de julho de 2022)
4. Telemac, 1947: <https://telemac.fr/en/products/?filters=extensometer> - (consultado no dia 30 de julho de 2022)

-
5. Sisgeo, 1993: <https://www.sisgeo.com/products/extensometers.html> - (consultado no dia 30 de julho de 2022)
 6. Sisgeo, 1993: <https://www.sisgeo.com/products/pressure-cells.htm> - (consultado no dia 28 de julho de 2022)
 7. Metalúrgica Busquet, S.L: <http://www.metbusquet.com/> - (consultado no dia 10 de junho de 2022)
 8. Sisgeo, 1993: <https://www.sisgeo.com/products/inclinometers-and-tiltmeters.html> - (consultado no dia 29 de julho de 2022)
 9. Telemac, 1947: <https://telemac.fr/en/products/?filters=extensometer,tiltmeters> - (consultado no dia 28 de Julho de 2022)
 10. Sisgeo, 1993: <https://www.sisgeo.com/products/pendulums.html> - (consultado no dia 28 de julho de 2022)
 11. Telemac, 1947: <https://telemac.fr/en/products/?filters=vibration> - (consultado no dia 28 de julho de 2022)
 12. Telemac, 1947: <https://telemac.fr/en/products/?filters=piezometer> - (consultado no dia 28 de julho de 2022)
 13. Sisgeo, 1993: <https://www.sisgeo.com/products/piezometers.html> - (consultado no dia 28 de julho de 2022)
 14. Sisgeo, 1993: <https://www.sisgeo.com/products/strain-gauges-and-thermometers.html> - (consultado no dia 28 de julho)
 15. Mesures & systèmes: <https://www.mesures-systemes.fr/> - (consultado no dia 7 de julho de 2022)
 16. Leica Geosystems AG, part of the Hexagon: <https://leica-geosystems.com/> - (consultado no dia 7 de julho de 2022)
 17. Worldsensing, 2008: <https://www.worldsensing.com/pt/> - (consultado no dia 7 de julho de 2022)
 18. Plafondplast S.R.I.,1973: <https://www.plafondplast.com/en/threaded-pipes-rigid-pvc-piezometers/> - (consultado no dia 7 de julho de 2022)
 19. Geosense Ltd, 1922: <https://www.geosense.co.uk/products/water-level-meter/> - (consultado no dia 7 de julho de 2022)
 20. Topocad S.L.P., 1992: <http://www.topocad.es/tuneles.html> - (consultado no dia 30 de julho de 2022)
 21. Horizon (measure right): <http://www.horizon.sg/> - (consultado no dia 7 de julho de 2022)
 22. Enciclopédia britânica: <https://www.britannica.com/technology/tunnel> - (consultado no dia 12 de agosto de 2022)
 23. LinkedIn/Thiago_Barreto: <https://www.linkedin.com/pulse/escava%C3%A7%C3%A3o-de-t%C3%BAnel-em-solo-pelo-m%C3%A9todo-natm-thiago-barreto/?originalSubdomain=pt> - (consultado no dia 18 de agosto de 2022)
 24. Geokon - trusted measurements, 1979: <https://www.geokon.com/GK-604D> - (consultado no dia 20 de agosto de 2022)
 25. Grupo RST, 1977: <https://rstinstruments.com/product/inclinometer-casing/> - (consultado no dia 20 de agosto de 2022)
 26. Grupo Sixense, 2016: www.sixense-group.com - (consultado no dia 27 de agosto de 2022)
 27. Grupo Sixense, 2016: <https://www.sixense-group.com/en/offer/monitoring/soil-structural-and-environmental-measurement/geoscope> - (consultado no dia 27 de agosto de 2022)
 28. Measurand – grupo Terra Insights, 1993: <https://measurand.com/pt-br/products/saav/> - (consultado no dia 2 de outubro)
 29. Droneshow – mundogeo: <https://droneshowla.com/uso-de-drones-reduz-tempo-e-custos-em-operacoes-geotecnicas/> - (consultado no dia 3 de outubro de 2022)
 30. Plafondplast S.R.I.,1973: <https://www.plafondplast.com/es/tubos-de-pvc-rra-piezometros/> - (consultado no dia 7 de outubro de 2022)
 31. Polity – Creamer Media, 1981: <https://www.polity.org.za/article/first-hydropower-to-be-generated-from-ingula-in-may-2015-2014-08-08> - (consultado em 7 de outubro de 2022)
 32. Enciclopédia britânica: <https://www.britannica.com/technology/tunnel> . - (consultado no dia 9 de outubro 2022)
 33. Worldsensing, 2008: <https://worldsensing.com/product-type/edge-devices/digital-logger/> - (consultado no dia 4 de outubro de 2022)
 34. Grupo RST, 1977: <https://rstinstruments.com/product/rstar-affinity-gateway/> - (consultado no dia 4 de outubro de 2022)
 35. Worldsensing, 2008: <https://worldsensing.com/pt/product/edge-devices-wireless-data-loggers-digital-logger/> - (consultado no dia 4 de outubro de 2022)
-

Anexos
(CD-Rom)

Índice de Anexos:

Anexo 1 - Levantamento Geológico Geotécnico

Anexo 2 – Plano de instrumentação e secções

Anexo 3 - Fichas técnicas

(página propositadamente em branco)