



CONTRIBUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DE PLANOS DE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA SUPORTADOS POR ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA

JOÃO RAFAEL MARTINS DA COSTA MARQUES

Setembro de 2025

**CONTRIBUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DE PLANOS DE
INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA SUPOSTOS POR ANÁLISE
TÉCNICO-ECONÓMICA**

**CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF GEOTECHNICAL
INSTRUMENTATION PLANS SUPPORTED BY TECHNICAL AND ECONOMIC
ANALYSIS**

João Rafael Martins da Costa Marques

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

Orientador: Professor António Agostinho Martins Mendonça (ISEP)

Co-orientador: Doutor Vítor Jorge da Silva Santos (GeoInt)

Júri

Presidente

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

Vogais

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

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

[página propositadamente em branco]

Resumo

Atualmente, continuam a existir projetos de escavação a céu aberto em meio urbano com omissão, carência ou uso desadequado de metodologias de instrumentação, verificando-se ainda uma seleção preferencial por metodologias de aquisição manual em detrimento de metodologias mais atuais. Pelo exposto, é realizada esta dissertação com a finalidade de contribuir para o desenvolvimento de planos de instrumentação geotécnica e estrutural promovendo a sua modernização e/ou otimização do ponto de vista técnico e económico. O estudo inicia-se com uma análise técnica e operacional dos métodos de instrumentação mais utilizados nesta tipologia de obras em Portugal, analisando-se também, de forma crítica, os diferentes sistemas de monitorização. De seguida, foi concebida e desenvolvida uma nova metodologia de análise técnico-económica para a definição de planos de instrumentação. Esta metodologia assenta em duas vertentes de análise, nomeadamente uma vertente técnica, com análise de benefício, e uma vertente económica. A integração total da metodologia permite uma análise técnico-económica integral e crítica. Por último, destaca-se a aplicação da análise técnico-económica a caso de estudo teórico, sendo este representativo da maioria dos projetos em execução nas principais cidades portuguesas.

Palavras-chave: Instrumentação geotécnica, Monitorização manual, Monitorização automática, Análise económica, Análise custo-benefício, Análise técnico-económica

[página propositadamente em branco]

Abstract

Currently, open-pit excavation projects in urban areas continue to exist with omission, shortage, or inadequate use of instrumentation methodologies, with a preference for manual acquisition methodologies over more current approaches. In view of the above, this dissertation is carried out to contribute to the development of geotechnical and structural instrumentation plans, promoting their modernization and/or optimization from both a technical and an economic standpoint. The study begins with a technical and operational analysis of the most commonly used instrumentation methods in this type of project in Portugal, while also critically examining different monitoring systems. Subsequently, a new methodology for techno-economic analysis was developed to define instrumentation plans. This methodology is based on two lines of analysis: a technical perspective, focusing on benefit analysis, and an economic perspective. The complete integration of the method allows for a comprehensive and critical techno-economic assessment. Finally, the application of the techno-economic analysis is highlighted in a theoretical case study, which is representative of the majority of projects currently being carried out in major Portuguese cities.

Keywords: Geotechnical instrumentation, Manual monitoring, Automatic monitoring, Economic analysis, Cost-benefit analysis, Techno-economic analysis

[página propositadamente em branco]

Agradecimentos

Com o término desta etapa acadêmica, importa expressar, de forma sincera e sentida, a minha gratidão a todas as pessoas e entidades sem as quais este percurso, e o presente trabalho, teriam sido indubitavelmente mais difíceis e menos enriquecedores.

Ao Doutor Agostinho Mendonça, orientador desta dissertação, manifesto o meu profundo agradecimento pelo incentivo, pela disponibilidade, pela paciência e pelo acompanhamento atento e profícuo. A sua compreensão relativamente à minha condição de trabalhador-estudante, que exigiu conciliar o trabalho acadêmico com as responsabilidades profissionais, foi determinante para a concretização desta obra.

Ao Vítor Santos, coorientador e colega, deixo um agradecimento muito especial que ultrapassa o âmbito desta dissertação. Destaco os ensinamentos transmitidos, tanto no dia-a-dia como especificamente no contexto desta investigação, as críticas sempre completas e construtivas, a paciência, a total disponibilidade para auxiliar nas mais variadas tarefas e, sobretudo, as palavras de apoio que nunca faltaram.

À GeolnT, pela oportunidade de aprendizagem contínua de excelência no domínio da instrumentação e monitorização geotécnica, bem como pela pronta disponibilização da base de dados que serviu de suporte a este estudo.

À Sofia Gomes, pelo apoio constante, pela preocupação genuína e pelo companheirismo, que muito estimo e valorizo.

Aos meus pais, João Paulo e Maria da Luz, por todo o apoio incondicional ao longo da vida, sempre presentes em todas as decisões, etapas e desafios.

À Ana, pela força, paciência e apoio incansável ao longo desta exigente caminhada, para os quais nunca haverá palavras suficientes de agradecimento.

Finalmente, a todos os que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a concretização deste trabalho e para a conquista deste importante passo académico, deixo o meu mais sincero obrigado.

[página propositadamente em branco]

Índice

1. Introdução.....	3
1.1. Enquadramento do tema	3
1.2. Objetivos	6
1.3. Estrutura da dissertação	7
2. Instrumentação e monitorização	11
2.1. Generalidades	11
2.2. Projeto geotécnico – Eurocódigo 7	14
2.3. Campo de aplicação e suas condicionantes	17
2.4. Plano de instrumentação	20
2.4.1. Objetivo e grandezas a medir.....	22
2.4.2. Seleção e localização de instalação dos equipamentos	22
2.4.3. Frequência de leituras e níveis de alerta e alarme.....	24
2.4.4. Apresentação de dados e circuito de informação.....	25
3. Equipamentos e instrumentos de monitorização geotécnica	31
3.1. Generalidades	31
3.2. Características de equipamentos e instrumentos	32
3.3. Grandezas e soluções de monitorização	34
3.4. Sistemas de monitorização	36
3.5. Equipamentos e instrumentos mais frequentes na monitorização de escavações a céu aberto em meio urbano	37
3.5.1. Análise estatística de instrumentação implementada	37
3.5.2. Alvos/Prismas	41
3.5.3. Inclínómetros verticais	43
3.5.4. Células de carga.....	45
3.5.5. Piezómetros.....	47
3.5.6. Fissurómetros	50
3.5.7. <i>Tiltmeters</i>	51
4. Metodologias e métodos de instrumentação e monitorização selecionados	55
4.1. Análise técnica e operacional dos equipamentos e instrumentos de medição selecionados.....	55
4.1.1. Alvos/Prismas	56
4.1.2. Inclínómetros verticais	58
4.1.3. Células de carga.....	62
4.1.4. Piezómetros.....	64
4.1.5. <i>Tiltmeters</i>	66
4.2. Análise das metodologias de monitorização selecionadas e dos seus componentes	69
4.3. Análise de complementaridade e/ou concorrência	73
5. Metodologia de análise técnico-económica de planos de instrumentação	79
5.1. Generalidades	79
5.2. Análise de benefício à monitorização manual e automática	81
5.3. Fatores de risco associados a escavações a céu aberto em meio urbano	82
5.4. Proposta de classificação de benefício para a monitorização automática	83
5.5. Base de dados da análise económica	85
5.6. Análise económica de método de instrumentação	88
5.6.1. Aquisição manual e automática de dados para diferentes opções de frequência de leituras e de distância de obra	90
5.7. Análise económica de plano de instrumentação	93

5.8.	Ponto ótimo entre aquisição manual e automática.....	96
6.	Aplicação da análise económica a caso de estudo teórico.....	101
6.1.	Generalidades.....	101
6.2.	Definição de plano de instrumentação	102
6.3.	Alvos/Prismas	104
6.4.	Inclinómetros verticais	106
6.5.	Células de carga.....	107
6.6.	Piezómetros.....	109
6.7.	<i>Tiltmeters</i>	111
6.8.	Cenário de obra	112
7.	Análise técnico-económica dos resultados do caso de estudo	119
7.1.	Generalidades.....	119
7.2.	Alvos/Prismas	120
7.3.	Inclinómetros verticais	122
7.4.	Células de carga.....	125
7.5.	Piezómetros.....	127
7.6.	<i>Tiltmeters</i>	129
7.7.	Cenário de obra	131
7.8.	Análise de custo-benefício para o cenário de obra.....	134
8.	Considerações finais	141
9.	Referências bibliográficas	149
	Anexo I – Base de dados da análise económica	153
	Anexo II – Plano de instrumentação	157
	Anexo III – Análise económica para os alvos/prismas	161
	Anexo IV – Análise económica para os inclinómetros verticais.....	165
	Anexo V – Análise económica para as células de carga.....	169
	Anexo VI – Análise económica para os piezómetros.....	173
	Anexo VII – Análise económica para os <i>tiltmeters</i>	177
	Anexo VIII – Análise económica para o cenário de obra	181
	Anexo IX – Análise de custo-benefício para os alvos/prismas	187
	Anexo X – Análise de custo-benefício para os inclinómetros verticais	191
	Anexo XI – Análise de custo-benefício para as células de carga	195
	Anexo XII – Análise de custo-benefício para os piezómetros	199
	Anexo XIII – Análise de custo-benefício para os <i>tiltmeters</i>	203
	Anexo XIV – Análise de custo-benefício para o cenário de obra	207

Lista de figuras

Figura 1 – Ilustrações representativas de deslizamentos em solo. Imagem da esquerda representa um deslizamento transacional e a imagem da direita representa um deslizamento rotacional (adaptado de Highland & Bobrowsky, 2008)	20
Figura 2 – Ilustrações representativas de deslizamentos/queda em rocha. Imagem da esquerda representa a queda de blocos rochosos e a imagem da direita representa um tombamento de rochas (adaptado de Highland & Bobrowsky, 2008).....	20
Figura 3 – Ilustração representativa da seleção e localização de instalação de equipamentos para monitorização de obra de escavação a céu aberto em meio urbano (GeoSitter, sem data)	23
Figura 4 – Esquema representativo de todo o circuito de informação. Desde a fase de recolha de dados, passando pelo processamento de informação, análise de resultados e elaboração de relatórios, finalizando na disponibilização da informação via <i>email</i> ou plataforma <i>on-line</i>	26
Figura 5 – Ilustração representativa da diferença entre exatidão e precisão (adaptado de Dunncliff, 1988)	33
Figura 6 – (A) Taquímetro (estação total); (B) Aquisição manual de dados com estação total; (C) Alvo topográfico (fotografias do autor)	42
Figura 7 – (A) Aquisição manual de dados com sonda inclinométrica; (B) Redundância de leituras entre inclinómetro vertical e prisma topográfico; (C) Calha inclinométrica com marcas de referência e orientação de leitura (fotografias do autor)	44
Figura 8 – (A) Instalação de inclinómetro vertical de aquisição automática SAAV (fotografia do autor); (B) Sensor geotécnico representativo dos inclinómetros <i>in-place</i> (Encardio, 2023a).....	45
Figura 9 – (A) Célula de carga hidráulica com manómetro <i>Bourdon</i> instalada próxima de alvo topográfico; (B) Célula de carga elétrica com placa de distribuição de carga; (C) Instalação de célula de carga de corda vibrante; (D) Célula de carga de corda vibrante (fotografias do autor)...	47
Figura 10 – (A) Piezómetro de tubo aberto com leitura manual através de sonda piezométrica; (B) Filtro poroso do piezómetro Casagrande; (C) Piezómetro de corda vibrante; (D) Instalação de piezómetros elétricos em sistema de aquisição automática de dados (fotografias do autor).....	49
Figura 11 – (A) Instalação e leitura manual de fissurómetro ótico (fotografias do autor); (B) Fissurómetro mecânico uniaxial (Encardio, 2023a); (C) Fissurómetro elétrico com sensor de corda vibrante (Encardio, 2023a)	51
Figura 12 – (A) <i>Tiltmeter</i> uniaxial de corda vibrante (Geokon, 2025); (B) <i>Wireless tiltmeter</i> triaxial; (C) <i>Wireless tiltmeter</i> triaxial associado a sistema laser para medição de distância (fotografias do autor).....	52
Figura 13 – (A) <i>Datalogger</i> analógico associado a células de carga elétrica; (B) <i>Datalogger</i> digital ligado a inclinómetro SAAV; (C) <i>Datalogger</i> de corda vibrante conectado a célula de carga e, à esquerda, <i>Datalogger</i> digital ligado a inclinómetro SAAV (fotografias do autor)	72
Figura 14 – (A) e (B) <i>Gateway</i> associado a <i>painel</i> solar (fotografias do autor).....	72
Figura 15 – Imagem representativa das diferentes opções admitidas para o campo equipamento/instrumento na análise económica de pré monitorização de inclinómetros verticais	90

[página propositadamente em branco]

Lista de tabelas

Tabela 1 – Síntese da frequência de leituras muitas vezes adotada em obras de escavação a céu aberto em meio urbano	24
Tabela 2 – Síntese das grandezas a medir e das principais soluções de monitorização.....	35
Tabela 3 – Síntese comparativa das principais características técnicas e operacionais entre as diferentes opções de estação total.....	57
Tabela 4 – Síntese comparativa das principais características técnicas entre as diferentes opções de inclinómetros	59
Tabela 5 – Síntese comparativa das principais características operacionais entre as diferentes opções de inclinómetros	60
Tabela 6 – Síntese comparativa das principais características técnicas entre as diferentes opções de células de carga	63
Tabela 7 – Síntese comparativa das principais características operacionais entre as diferentes opções de células de carga.....	63
Tabela 8 – Síntese comparativa das principais características técnicas entre as diferentes opções de piezómetros	65
Tabela 9 – Síntese comparativa das principais características operacionais entre as diferentes opções de piezómetros	65
Tabela 10 – Síntese comparativa das principais características técnicas entre as diferentes opções de <i>tiltmeters</i>	67
Tabela 11 – Síntese comparativa das principais características operacionais entre as diferentes opções de <i>tiltmeters</i>	67
Tabela 12 – Matriz de pontuações de risco, 5x5 (adaptado de Dogan et al. 2023).....	83
Tabela 13 – Matriz de risco para avaliação de compensação de instrumentação automática face à instrumentação manual	84
Tabela 14 – Excerto da base de dados de instrumentação utilizada para a análise económica	87
Tabela 15 – Excerto representativo do <i>layout</i> da análise económica de pré monitorização por método de instrumentação	89
Tabela 16 – <i>Layout</i> representativo da aquisição manual <i>versus</i> aquisição automática para os três cenários de frequência de leituras e para uma deslocação de 50 km	92
Tabela 17 – <i>Layout</i> da análise económica de pré monitorização por plano de instrumentação de obra (cenário de obra)	95
Tabela 18 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para os alvos/prismas	105
Tabela 19 – Síntese económica dos alvos/prismas para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra.....	105
Tabela 20 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para os inclinómetros verticais.....	106
Tabela 21 – Síntese económica dos inclinómetros verticais para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra.....	107
Tabela 22 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para as células de carga	108
Tabela 23 – Síntese económica das células de carga para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra.....	108
Tabela 24 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para os piezómetros	110
Tabela 25 – Síntese económica dos piezómetros para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra.....	110
Tabela 26 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para os <i>tiltmeters</i>	111
Tabela 27 – Síntese económica dos <i>tiltmeters</i> para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra.....	112
Tabela 28 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para o cenário de obra.....	112

Tabela 29 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para o cenário de obra – Otimização 1.....	113
Tabela 30 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para o cenário de obra – Otimização 2.....	114
Tabela 31 – Síntese económica do cenário de obra para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra.....	115
Tabela 32 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para os alvos/prismas	120
Tabela 33 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para os inclinómetros verticais	123
Tabela 34 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para as células de carga	125
Tabela 35 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para os piezómetros.....	127
Tabela 36 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para os <i>tiltmeters</i>	129
Tabela 37 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para o cenário de obra – otimização 2.....	131
Tabela 38 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para o cenário de obra (otimização 2). Sem e com fator de multiplicação de 2 e 3 vezes para a aquisição manual de dados	135

Lista de gráficos

Gráfico 1 – Métodos de instrumentação utilizados nas obras selecionadas.....	38
Gráfico 2 – Quantidade e correspondente percentagem de métodos de instrumentação utilizados por obra.....	39
Gráfico 3 – Quantidade média de equipamentos/instrumentos/dispositivos utilizados por cada método de instrumentação	40
Gráfico 4 – Gráfico representativo da análise económica. Aquisição manual <i>versus</i> Aquisição automática	96
Gráfico 5 – Análise económica de aquisição manual <i>versus</i> aquisição automática para os alvos/prismas	120
Gráfico 6 – Análise económica de aquisição manual <i>versus</i> aquisição automática para os inclinómetros verticais	123
Gráfico 7 – Análise económica de aquisição manual <i>versus</i> aquisição automática para as células de carga.....	125
Gráfico 8 – Análise económica de aquisição manual <i>versus</i> aquisição automática para os piezómetros	127
Gráfico 9 – Análise económica de aquisição manual <i>versus</i> aquisição automática para os <i>tiltmeters</i>	129
Gráfico 10 – Análise económica de aquisição manual <i>versus</i> aquisição automática para o cenário de obra com a otimização 2	132
Gráfico 11 – Análise económica de aquisição manual <i>versus</i> aquisição automática para o cenário de obra (otimização 2) com aplicação de fator de multiplicação 2 para a aquisição manual	136
Gráfico 12 – Análise económica de aquisição manual <i>versus</i> aquisição automática para o cenário de obra (otimização 2) com aplicação de fator de multiplicação 3 para a aquisição manual	136

[página propositadamente em branco]

Acrónimos

Lista de Acrónimos

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
ACB	Análise de custo-benefício
EC7	Eurocódigo 7
EDM	<i>Electronic Distance Measurement</i>
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i>
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
SAA	<i>Shape Accel Array</i>
SAAV	<i>Shape Accel Array Vertical</i>
VW	<i>Vibrating Wire</i>

[página propositadamente em branco]

Capítulo I

Introdução

[página propositadamente em branco]

1. Introdução

O presente documento enquadra-se no âmbito da unidade curricular de Dissertação, pertencente ao plano de estudos do 2º ano do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente (MEGG) do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), do Politécnico do Porto (P. Porto). A dissertação tem o propósito de apresentar o estudo de uma análise técnico-económica contributiva realizada na área da instrumentação e monitorização geotécnica, finalizando o ciclo de estudos e servindo como objeto de avaliação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.

1.1. Enquadramento do tema

A partir da segunda metade do século XX, mas sobretudo desde o início do século XXI, tem-se registado um crescente estrangulamento do espaço citadino em resposta ao contínuo aumento populacional, verificando-se uma progressiva diminuição dos locais de melhor capacidade geotécnica para a construção.

Este estrangulamento, quando associado, frequentemente, à inexistência de terrenos de fundação de boa qualidade, leva a que sejam executadas escavações e edificadas novas construções em terrenos de menor capacidade geotécnica.

Por outro lado, as diretrizes de planeamento urbano atualmente em vigor incentivam a recuperação de edificado existente. A sua reabilitação, desde que assegure a redução da sua vulnerabilidade face aos riscos, assume atualmente um papel preponderante no aumento da sustentabilidade do ambiente urbano, constituindo uma alternativa importante à realização de novas construções ou à demolição e nova construção (Barbisan et al. 2012).

O edificado existente com potencial de recuperação encontra-se implementado, inúmeras vezes, entre infraestruturas e edificações que estão com uso corrente.

Associado à recuperação de edificado antigo, surge, com bastante frequência, a necessidade de execução de escavação em meio urbano para a criação de novos pisos subterrâneos, nomeadamente para estacionamento, entre outros.

Com a realização de escavação a céu aberto em meio urbano surgem alguns riscos, quer para a própria estrutura em construção ou reabilitação, quer para as estruturas e infraestruturas envolventes. Estes riscos acentuam-se em centros históricos e edificações mais antigas, uma vez que, as características de construção podem não ser as mais adequadas e a condição de rigidez estrutural pode não estar totalmente salvaguardada (Rybak et al. 2018). Além disso, segundo os mesmos autores, quando a profundidade da escavação a realizar é superior àquela a que se encontram as fundações dos edifícios circundantes, ou mesmo quando os trabalhos de escavação são realizados diretamente sob as estruturas, estas estão sujeitas a variação de tensão, de vibração e deslocamentos impostos ao longo de praticamente todas as fases de construção, e, eventualmente, mesmo na fase de exploração.

A execução de escavações a céu aberto, muitas vezes em terrenos com características específicas e de menor qualidade, potencia o aumento dos acidentes geotécnicos e estruturais em zonas urbanas, uma problemática cada vez mais evidente. Assim, “a previsão e a monitorização da resposta dos edifícios às atividades de construção adjacentes são necessárias para minimizar os danos nos edifícios resultantes dos movimentos do subsolo e das vibrações de construção transmitidas pelo solo” (Russo et al. 2008). Segundo os mesmos autores, os programas de monitorização salvaguardam a ocorrência de eventos prejudiciais e, embora a implementação de instrumentação aparente ser cara inicialmente, a sua falta poderá originar ocorrências gravosas e mais dispendiosas do que a implementação de um plano de instrumentação geotécnica.

A implementação de instrumentação geotécnica não se resume à seleção dos equipamentos de monitorização, mas sim a um processo de engenharia abrangente, que começa com a identificação do objetivo a tratar e sua finalidade, e termina com a interpretação dos dados (Dunnicliff, 1988). Para uma instrumentação geotécnica correta, é necessário responder previamente a uma série de questões-chave, que, para Eberhardt & Stead (2011), se centram em:

- Quais são os objetivos do projeto de monitorização?;
- Que parâmetros precisam de ser monitorizados e como vão auxiliar na escavação, nas medidas de suporte, e na avaliação do desempenho do projeto?;

- Como podem estes parâmetros variar espacialmente?;
- Quais os riscos inerentes a condições variáveis ou deficitárias do solo?;
- Qual a dimensão esperada para os movimentos ou para o aumento de tensão?;
- Qual a localização ideal para a instalação dos dispositivos de observação?.

Com a evolução tecnológica vivenciada ao longo dos últimos anos, a instrumentação geotécnica assumiu, de forma definitiva e consolidada, um papel fundamental como ferramenta da engenharia. Neste caso, a instrumentação geotécnica é utilizada para monitorizar o comportamento do maciço e/ou das estruturas e suas envolventes durante todas as fases construtivas ou mesmo durante a fase de exploração.

Existe, atualmente, uma panóplia de soluções muito alargada para instrumentação, desde métodos convencionais de aquisição manual de dados, passando por sistemas automáticos, até sistemas de vanguarda, como é o caso dos satélites.

Apesar do persistente desenvolvimento de metodologias de instrumentação, continua a verificar-se a existência de projetos com omissão, carência ou uso desadequado de metodologias para o objetivo e finalidade propostos. Para além disto, recorrentemente, as metodologias de aquisição manual de dados continuam a ser seleccionadas em lugar de metodologias mais atuais, não só pela aparente questão económica, mas, por vezes, por desconhecimento ou reticência à mudança.

Por este motivo, é de suma importância a realização de análises custo-benefício (ACB) focadas na problemática em questão, parecendo claro que a utilização de metodologias com base em ACB pode contribuir positivamente para fundamentar decisões em Engenharia (Silva & Salvado, 2015). Salienta-se que, em engenharia, é importante não só o aspeto técnico, mas também a vertente económica quer no curto, mas também, no médio e longo prazo.

Torna-se, por isso, pertinente perceber se, atualmente, na generalidade das obras de escavação a céu aberto em meio urbano, há implementados os planos de monitorização geotécnica adequados do ponto de vista de custo-benefício, ou se, face ao contínuo desenvolvimento dos equipamentos de aquisição automática de dados, os atuais planos poderão ser otimizados.

Para além disto, é importante perceber se a generalidade dos atuais planos de monitorização de obras geotécnicas pode ser atualizada e/ou otimizada do ponto de vista de técnico-económico, com a utilização parcial ou integral de outras, e mais recentes, metodologias de aquisição.

É, assim, relevante o desenvolvimento de estudos que visem a comparação entre as diferentes metodologias de instrumentação, contribuindo para uma tomada de decisão cada vez mais informada e adequada, com vista à otimização técnica e económica de projetos futuros.

1.2. Objetivos

O principal objetivo da dissertação é apresentar um estudo que promova o desenvolvimento dos planos de instrumentação, isto é, que contribua para a modernização e/ou otimização dos planos de instrumentação geotécnica e estrutural de obras de engenharia. Pela abrangência do tema, optou-se por incluir neste estudo, devido à sua especial relevância, somente o caso de obras de escavação a céu aberto em meio urbano, com enfoque na vertente técnico-económica e de custo-benefício.

Para responder ao principal objetivo da forma mais geral e completa possível, é necessário concretizar pequenos objetivos. Inicialmente, é indispensável descrever o estado da arte da instrumentação e monitorização geotécnica. De seguida, desenvolve-se uma revisão científica dos equipamentos/instrumentos de aquisição manual e automática de dados habitualmente utilizados na monitorização desta tipologia de estruturas.

Após esta fase, promove-se a seleção das metodologias e dos métodos de instrumentação e monitorização para estudo, surgindo objetivos concretos, nomeadamente:

- Análise técnica e operacional dos equipamentos e instrumentos de medição;
- Análise crítica de metodologias de monitorização manual e automática;
- Análise de complementaridade e/ou concorrência dos métodos de instrumentação.

Como ponto fulcral, no presente estudo surge o objetivo da conceção e desenvolvimento de uma análise técnico-económica de abordagem à definição de planos de instrumentação no âmbito de obras de escavação a céu aberto em meio urbano.

Para a análise económica, foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo que incorpora diversos parâmetros técnicos dos métodos de instrumentação e das metodologias de monitorização selecionadas. A análise relaciona estes parâmetros com o seu custo, a frequência de leituras, a periodicidade de monitorização e a deslocação à obra, permitindo a comparação entre a monitorização manual e automática em função de várias hipóteses promovidas para estudo.

Outro objetivo fundamental do estudo é a realização de uma análise de custo-benefício, desenvolvendo-se uma proposta de classificação de benefício para a monitorização automática.

Por último, com o objetivo de validação das metodologias desenvolvidas, destaca-se a aplicação da ferramenta de análise económica e da classificação de benefício a caso de estudo teórico, concretamente aos métodos de instrumentação selecionados e ao cenário de obra completo. Desta forma, promove-se uma análise técnico-económica e de custo-benefício para os resultados obtidos para o caso de estudo idealizado.

1.3. Estrutura da dissertação

Tendo em conta os objetivos que nos propomos atingir, a presente dissertação encontra-se dividida em oito capítulos, sendo o primeiro capítulo a presente introdução. Apresentam-se, em seguida, de forma sucinta, os diferentes capítulos, referindo os aspetos mais relevantes abordados em cada um.

Capítulo I – Introdução

Faz-se um breve enquadramento do tema e apresentam-se os principais objetivos para a Dissertação.

Capítulo II – Instrumentação e monitorização

Tecem-se alguns conceitos fundamentais da instrumentação e monitorização geotécnica, abordando as vantagens da sua implementação no caso de obras geotécnicas e, em particular, em obras de escavação a céu aberto em meio urbano. Apresenta-se ainda a linha orientadora para a definição de planos de instrumentação.

Capítulo III – Equipamentos e instrumentos de monitorização geotécnica

São abordadas as principais características dos equipamentos/instrumentos de medição, bem como, dos diferentes sistemas de monitorização. Apresentam-se, ainda, os equipamentos/instrumentos mais frequentemente utilizados nos projetos de escavações a céu aberto em ambiente urbano em Portugal.

Capítulo IV – Metodologias e métodos de instrumentação e monitorização selecionados

É apresentada uma análise técnica e operacional dos métodos de instrumentação selecionados, utilizando-se três ou quatro equipamentos/instrumentos por método, com especial destaque para a precisão, variação e tipo de tecnologia associada a cada sensor geotécnico. Realiza-se ainda uma análise crítica das metodologias de monitorização em estudo.

Capítulo V – Metodologia de análise técnico-económica de planos de instrumentação

É explicitada a conceção e desenvolvimento de uma nova análise técnico-económica. A metodologia de estudo apresenta duas vertentes de análise: uma vertente técnica associada ao benefício da monitorização automática; e uma vertente de análise económica, associada a uma ferramenta de cálculo desenvolvida para avaliação do custo por método de instrumentação, bem como por plano de instrumentação de obra.

Capítulo VI – Aplicação da análise económica a caso de estudo teórico

É aplicada a ferramenta de análise económica a um plano de instrumentação idealizado para caso de estudo teórico, sendo este representativo de obras de escavação a céu aberto ocorrentes nas maiores cidades do país. A análise económica é desenvolvida para cada método de instrumentação e para o cenário de obra completo, numa perspetiva de aquisição manual *versus* aquisição automática.

Capítulo VII – Análise técnico-económica dos resultados do caso de estudo

Analizam-se e discutem-se os resultados obtidos no anterior Capítulo, numa perspetiva puramente económica. Para além disso, para cada método e para o cenário de obra, realiza-se uma análise de custo-benefício associada à valorização técnica da monitorização automática. Desta forma, promove-se uma análise técnico-económica integrada e crítica dos resultados obtidos pela aplicação da ferramenta de cálculo de custos.

Capítulo VIII – Considerações finais

Apresentam-se as considerações finais dos estudos desenvolvidos, bem como a definição de possíveis desenvolvimentos futuros dos mesmos.

Capítulo II

Instrumentação e monitorização

[página propositadamente em branco]

2. Instrumentação e monitorização

2.1. Generalidades

Os primeiros registos de instrumentação geotécnica como apoio nas medições das deformações do terreno, isto é, no auxílio às observações de campo, remontam às décadas de 30 e 40 do século XX. Nessa época, uma das primeiras formas de monitorização utilizada foram os testemunhos de gesso, que tinham como intuito controlar a abertura de fendas. Para tal, após a sua aplicação, estes eram monitorizados através de observações periódicas para averiguar a existência de movimentos. Relativamente aos instrumentos, durante os primeiros anos da instrumentação geotécnica, predominava o uso de simples equipamentos mecânicos e hidráulicos. Com o desenvolvimento da tecnologia, tornaram-se comuns dispositivos mais complexos, com transdutores elétricos e pneumáticos, levando a instrumentação para um patamar mais completo e seguro (Dunnicliff, 1988).

De início, importa elucidar o significado de “instrumentação” e “monitorização”. Estes termos são, de forma corrente, utilizados como sinónimos, contudo, apresentam uma definição distinta.

De forma sucinta, o termo “instrumentação” significa a definição do plano de instrumentação, sendo necessário, entre outros, contemplar: objetivos; critérios de alerta e alarme; equipamentos / dispositivos de observação a implementar; quantidades de equipamentos / dispositivos de observação; periodicidade de leituras; localização e instalação dos equipamentos / dispositivos de observação; modo de apresentação de dados; circuito de informação; e medidas de contingência. Por sua vez, a “monitorização” ou “observação geotécnica e estrutural” é a medição e o acompanhamento dos dados.

Em conjunto, a instrumentação e a monitorização geotécnica promovem a idealização, implementação e acompanhamento de sistemas de observação de precisão.

Um dos principais pontos chave da instrumentação geotécnica e estrutural é perceber o porquê da sua necessidade, existindo vários objetivos para a realização da mesma. Um dos principais objetivos para a sua implementação é a possibilidade de comparação de deformações e tensões estimadas na fase de projeto com as obtidas através da monitorização durante e após execução de obra (Oliveira et al. 2016). A verificação dos pressupostos do projeto assenta, essencialmente, no dimensionamento e no comportamento do terreno e/ou estrutura, verificando a adequabilidade do projeto idealizado face às reais condições geológicas e geotécnicas observadas.

Desta forma, com a monitorização durante as várias etapas da obra, promove-se a segurança na intervenção realizada, evitando potenciais deformações em excesso ou acidentes. Para além da segurança das estruturas em obra e das estruturas e infraestruturas vizinhas, é de suprema importância garantir a segurança de trabalhadores, terceiros e equipamentos. A segurança é um objetivo comum a todas as obras e, dentro destas, comum a todas as etapas construtivas.

Como terceiro objetivo da instrumentação e, porventura, o mais ambicioso, surge a otimização ou adequação das soluções de projeto. Este objetivo contempla a análise de uma base de dados de deformações já observadas, associadas a reais condições geológico-geotécnicas e respetivas estruturas. O objetivo da otimização é, atualmente, implementado em obras lineares com alguma envergadura, como, por exemplo (p. ex.), em caso de túneis, onde a análise das deformações já observadas permite redimensionar as contenções. Contudo, em escavações de menor dimensão, como é o caso das escavações a céu aberto em meio urbano, este objetivo apresenta diversas dificuldades de implantação e de otimização dentro da área restrita do projeto.

Em suma, a necessidade de instrumentação encontra-se definida e bem estruturada há muito tempo, assentando em três componentes principais:

- Verificar pressupostos de projeto;
- Segurança na execução e exploração;
- Conhecimento para melhor adequação e otimização de idênticos projetos no futuro.

Trata-se, no fundo, de uma medida de deteção atempada de potenciais riscos.

Para melhor enquadramento, a instrumentação geotécnica e estrutural acompanhada de monitorização é parte integrante da gestão de riscos. Estes riscos podem estar associados a:

- Colapso;

- Instabilidade de taludes e de aterros;
- Deformações excessivas;
- Afetação de terceiros em qualquer projeto.

Segundo Einstein et al. (2010) o risco pode ser descrito pela seguinte equação:

$$R = P[E] \cdot P[C|E] \cdot u[C] \quad (1)$$

,onde:

R representa o risco; $P[E]$ representa a probabilidade de ocorrência de um evento; $P[C|E]$ representa a probabilidade de afetação do meio ao evento E; e $u[C]$ representa o grau de dano ou consequências, avaliado por C.

No entanto, de modo mais simplista, é possível quantificar o risco segundo a expressão de Baecher (1981):

$$R = P \cdot C \quad (2)$$

,onde:

R representa o risco, P a frequência de ocorrência de um perigo e C as suas consequências.

Para Eskesen et al. (2004), a gestão de riscos requer muita experiência e conhecimentos teórico-práticos, existindo três tipos principais de potenciais riscos, nomeadamente: incertezas associadas à geologia e à hidrogeologia e suas consequências; incumprimento dos prazos de construção; e afetação de pessoas e bens. Em complementaridade, a gestão de riscos em obras de engenharia é influenciada por um conjunto de fatores, onde se destacam: a capacidade e experiência dos intervenientes na fase de projeto e na fase de construção; a noção de responsabilidade dos intervenientes inerente ao respetivo processo de gestão; o tipo de projeto e estrutura; e o ambiente de trabalho (Ward, 1999, citado por Santos, 2016). Segundo este autor, para que a gestão de risco seja maximizada, é fundamental considerar todos estes fatores e adequar as metodologias utilizadas.

Na problemática da gestão de riscos geotécnicos, é necessário ter sempre presente que todas as opções e fatores inerentes ao projeto irão influenciar o nível de risco e, com isso, irão influenciar a instrumentação necessária, sendo que, conforme anteriormente referido, a instrumentação se enquadra no âmbito da gestão de riscos com o objetivo de deteção atempada de eventos adversos. Além disto, é preciso ter consciência que a instrumentação geotécnica não permite a

eliminação dos riscos, mas permite a sua identificação de forma atempada e, assim, a diminuição dos riscos por diminuição da probabilidade de ocorrência de evento(s) adverso(s).

Para uma identificação mais eficiente dos riscos geotécnicos associados a cada obra existe, atualmente, uma grande diversidade de equipamentos de observação. Devido às inúmeras opções presentes no mercado, é necessário realizar, cada vez mais, uma análise adequada e criteriosa na seleção e localização de instalação dos vários equipamentos, em virtude das características das estruturas ou infraestruturas em causa. Esta análise tem como objetivo a obtenção de resultados válidos e representativos das situações mais adversas.

Assim, uma boa instrumentação não está apenas dependente da escolha adequada dos equipamentos, mas também de todo o processo de conhecimento das estruturas por parte dos técnicos, para que sejam otimizados em termos de quantidades a utilizar e para que a localização abranja áreas representativas (Dunnicliff, 1988).

Como tal, sucintamente, pode referir-se que as principais diferenças entre uma boa ou má monitorização se prendem com um plano de instrumentação adequado, leituras fidedignas, análise atempada e eficaz dos resultados, e, em caso de necessidade, intervenção imediata.

2.2. Projeto geotécnico – Eurocódigo 7

O Eurocódigo 7 (EC7) (NP EN 1997-1, 2010) foi desenvolvido com o principal objetivo de integrar, uniformizar e sintetizar todos os procedimentos fundamentais para a execução de um projeto geotécnico, sendo que, atualmente, todas as estruturas e infraestruturas geotécnicas são idealizadas e concebidas com base neste Eurocódigo.

De acordo com o Eurocódigo 7 (2010), deve garantir-se, em cada projeto, que nenhum estado limite é excedido. Relativamente à definição do contexto geotécnico, devem constar, claramente, diversos fatores, tais como: as condições de estabilidade do local; a natureza e as dimensões das estruturas a edificar, incluindo p. ex. a vida útil do projeto; as condições do subsolo e da zona envolvente; o nível freático; e a sismicidade regional. Ainda constante nos requisitos de projeto, é definido que a avaliação dos estados limite é feita através de cálculos, modelos experimentais e/ou pelo método observacional, sendo que, em muitos casos, é a experiência do técnico responsável que ditará os estados limite que irão regular o dimensionamento geotécnico.

Primeiramente, é necessário enquadrar a futura estrutura numa das três categorias definidas no Eurocódigo 7 (2010), uma vez que os requisitos de projeto são estabelecidos em função da respetiva categoria geotécnica. Assim, surge:

- Categoria geotécnica 1: estruturas simples e de pequenas dimensões. Estruturas para as quais é possível assegurar que os requisitos fundamentais são satisfeitos com base na experiência e em estudos de caracterização geotécnica qualitativa;
- Categoria geotécnica 2: estruturas e fundações convencionais. Estruturas que não apresentem riscos excecionais, nem condições do terreno ou de carga invulgares ou particularmente difíceis. Nesta categoria incluem-se, entre outras, as fundações superficiais, ensoleiramentos e fundações indiretas, muros de contenção, pilares estruturais, e ancoragens;
- Categoria geotécnica 3: estruturas de grandes dimensões ou pouco convencionais. Estruturas ou parte de estruturas não abrangidas pelas categorias geotécnicas 1 e 2.

Relativamente ao relatório de projeto geotécnico, este deve mencionar, entre outros, as hipóteses, os dados e métodos de cálculo e os resultados da verificação de segurança, sendo que o nível de pormenor de cada relatório varia em função da complexidade do projeto em análise. Segundo o EC7 (2010), este relatório deverá incluir vários elementos, onde se destacam: descrição do local e sua envolvente; descrição das condições do terreno; descrição da obra; valores de cálculo das propriedades do terreno; considerações sobre a adequabilidade do local selecionado, tendo em conta as especificidades da obra e o nível de riscos admissíveis; cálculos e peças desenhadas do projeto geotécnico.

A supervisão e a monitorização geotécnica são pontos fundamentais a incluir no relatório de projeto geotécnico. Neste, devem estar especificados: o objetivo de cada conjunto de observações ou medições; as estruturas que devem ser monitorizadas e, dentro destas, os locais em que as observações devem ser realizadas; a frequência de leituras; os valores limite esperados; e as entidades responsáveis pela medição, observação e interpretação dos dados. Neste ponto, deve, ainda, ser definido o período temporal após a conclusão da obra em que será necessário realizar monitorização (NP EN 1997-1, 2010).

No que concerne à segurança e qualidade da estrutura, o EC7 (2010) refere os seguintes procedimentos: supervisão e análise da qualidade da execução dos trabalhos e da qualificação dos trabalhadores; monitorização do comportamento da estrutura durante e após a construção; e realização de trabalhos de manutenção da estrutura ao longo do período de vida útil. As observações e medições do comportamento da estrutura devem ser realizadas durante a fase de construção, com o objetivo de identificar qualquer necessidade de medidas corretivas ou alteração de projeto. Para além disso, também podem ser realizadas durante e após a construção para avaliar o seu desempenho a longo prazo (*op. cit.*).

Os trabalhos de construção devem ser supervisionados por pessoal especializado, tendo como principal objetivo verificar a validade de projeto, fazer uma análise comparativa entre os valores dimensionados em projeto com os reais valores obtidos em obra e verificar a segurança da construção (*op. cit.*).

Relativamente ao método de supervisão, o EC7 (2010) associa-o às três categorias geotécnicas já explicitadas. Assim, para a categoria geotécnica 1, a supervisão pode ocorrer de forma simplificada e baseada na experiência do supervisor, com inspeções visuais e avaliações qualitativas do comportamento da estrutura. A avaliação do comportamento das estruturas da categoria geotécnica 2 poderá basear-se em medições de movimentos de certos pontos específicos e representativos da estrutura, sendo que, nesta categoria, se englobam as medições das propriedades do terreno e/ou do comportamento das estruturas. Por último, para a categoria geotécnica 3, são necessárias medições durante cada etapa construtiva; isto é, a avaliação do comportamento da estrutura deverá ser baseada em medições de deslocamentos e em análises que envolvam toda a sequência de construção. As observações e monitorização devem ser realizadas durante a construção, mas também após a sua conclusão, com o intuito de comprovar a validade dos valores estimados durante a fase de projeto, assegurando, assim, o bom comportamento da estrutura.

De acordo com o EC7 (2010), de forma sucinta, a supervisão de uma construção deve compreender a verificação de certos aspetos, em que se destacam:

- Verificação das condições do solo, da localização e da configuração geral das estruturas;
- Verificação do fluxo e escoamento das águas subterrâneas, do regime de pressão de água nos poros e dos efeitos do desaguamento no lençol freático;
- Verificação de movimentos, cedência, estabilidade das estruturas de contenção e fundação, efeitos nas edificações e infraestruturas próximas;
- Verificação da segurança dos trabalhadores, em consideração dos estados limite definidos em projeto.

A monitorização deverá responder a vários aspetos, destacando-se:

- Assentamentos de edifícios e outras estruturas;
- Deslocamentos laterais e rotações, bem como deflexões ou deslocamentos das várias estruturas;
- Níveis piezométricos sob a área em construção ou em áreas adjacentes;

- Medição do fluxo dos drenos;
- Medição de vibrações.

2.3. Campo de aplicação e suas condicionantes

O campo de aplicação de instrumentação geotécnica é bastante vasto, abrangendo uma série de tipologias de obras de engenharia, bem como de fenômenos de geologia e geotecnia. Na aplicação de instrumentação podem destacar-se: pontes, barragens, escavações profundas a céu aberto, túneis à superfície e em profundidade, aterros técnicos e sanitários, obras rodovias e ferroviárias, taludes, estruturas de contenção e de fundação, minas e pedreiras, centrais nucleares, turbinas eólicas, encostas e arribas naturais, análise de consolidação de solos, análise da qualidade estrutural, deslizamentos de terras, níveis de água subterrânea, entre muitas outras. Para além da aplicação na obra de engenharia ou na área onde ocorre determinado fenômeno natural, a instrumentação pode e deve ser aplicada em estruturas e infraestruturas presentes na área de direta influência do fenômeno em análise.

Atualmente, não obstante as contínuas melhorias de metodologias e gestão, continuam a verificar-se muitos atrasos e falhas durante as várias etapas de construção. Estas situações estão, muitas vezes, associadas a incertezas sobre o comportamento dos maciços terrosos e rochosos e, também, com o conhecimento limitado do subsolo e das suas diferentes interações com as infraestruturas e estruturas em construção. Dentro destes aspetos, podem destacar-se o desconhecimento e a elevada heterogeneidade de algumas características do solo, tais como a compressibilidade, permeabilidade e granulometria, bem como de características do maciço rochoso, como grau de alteração, fraturação e percolação de água.

Como mencionado no Capítulo I, o contínuo crescimento populacional leva a que as cidades se encontrem cada vez mais desenvolvidas, dificultando a realização de novas construções. Uma das dificuldades inerentes é a realização de obras de engenharia contíguas ou nas imediações de estruturas e infraestruturas já existentes.

A realização de escavações em meio urbano, em obras com contextos específicos, poderá potenciar a ocorrência de eventuais deformações no terreno natural, podendo originar, nas estruturas vizinhas, assentamentos diferenciais ou rotações, a abertura de fraturas e, no limite, com o desabamento parcial ou total de estruturas. A capacidade que a estrutura apresenta para absorver e conter os deslocamentos impostos pela construção vizinha encontra-se diretamente

associada ao tipo de fundação que a sustenta e aos materiais aplicados na sua construção, sendo ainda muito influenciada pela idade de construção.

Para a definição das etapas de escavação e de contenção de terrenos, deve-se ter em conta a sua geometria, local de implantação, condições geológico-geotécnicas, níveis freáticos e estado de integridade das estruturas vizinhas. Assim, antes da execução de qualquer obra de engenharia, deve ser realizada uma análise cuidada e objetiva de todos os fatores potencialmente prejudiciais. Também, na fase prévia à obra, devem ser realizadas inspeções visuais ao exterior e interior das estruturas vizinhas, uma vez que, em caso de meio urbano mais antigo, as edificações já apresentam, muitas das vezes, patologias estruturais.

Sumariamente, aquando da realização de escavações em meio urbano, são exercidas alterações no campo de tensão do terreno, podendo originar deslizamentos, deformações, abatimentos, roturas, entre outros. Desta forma, é importante a realização prévia de estudos geológico-geotécnicos pormenorizados, permitindo uma correta e completa caracterização dos parâmetros intrínsecos do terreno presente no local de construção. Depois, em fase de obra, a implementação de um plano de instrumentação detalhado, interligado com as análises desenvolvidas nas fases de projeto, com equipamentos adequados e uma correta interpretação dos resultados de monitorização são pontos decisivos para o sucesso do projeto de engenharia.

Relativamente às condicionantes de escavação, sucintamente, um solo é um agregado natural de grãos minerais que praticamente não oferece resistência à escavação mecânica, e que podem ser separados, perdendo a totalidade da resistência, quando em contacto com água. Por sua vez, uma rocha é caracterizada como um agregado natural de minerais conectados por forças coesivas permanentes (Terzaghi et al. 1996).

O solo é composto por uma mistura de partículas de várias dimensões que, pela sua granulometria, podem classificar-se, da menor para a maior, em argila, silte, areia e cascalho.

Os maciços terrosos (solos) apresentam vários fatores de instabilização, sendo a água um dos principais. A circulação de água poderá condicionar fortemente o comportamento destes, sendo a sua ação mais gravosa em terrenos de granulometria mais fina (silte e argilas), uma vez que, ao circular entre estes grãos, cria afinidade com eles, aumentando a plasticidade, o que irá influenciar a estabilidade, podendo, no limite, induzir deslizamentos (Holtz et al. 2011).

A permeabilidade de um terreno é maior quanto maior forem os espaços vazios interligados, permitindo uma melhor circulação de água, sendo que a permeabilidade depende, sobretudo, da porosidade, da dimensão das partículas e do grau de saturação de um terreno, variando consoante o tipo de solo (Das, 2009).

Conjuntamente com a circulação de água e a permeabilidade, a variação da imposição de cargas é outro dos fatores que influencia o comportamento de um terreno devido à influência de aumento ou diminuição de pressão nos poros. No caso de solos argilosos saturados, com coeficiente de permeabilidade baixo, logo, de fácil saturação em água, a aplicação de cargas rápidas irá promover o aumento de pressão nos poros, originando um comportamento plástico. Este comportamento advém da ineficaz drenagem de água, resultando numa drenagem gradual e ao longo de determinado período. Assim, o processo de consolidação do terreno por imposição de uma carga irá continuar muito além do assentamento imediato à colocação da carga, promovendo assentamentos graduais e de consequências potencialmente muito gravosas (Das, 2019).

Por sua vez, quando é aplicada uma carga rápida a um solo arenoso saturado em água, a pressão nos poros irá aumentar, mas, devido à maior permeabilidade, haverá uma drenagem de água quase instantânea. Assim, nestes solos, ocorrerá uma diminuição de volume por imposição desta carga, originando assentamentos simultâneos ao processo de consolidação (Das, 2019).

Relativamente aos maciços rochosos, previamente à realização de qualquer intervenção no maciço, é necessário avaliar algumas propriedades, destacando-se a(s) litologia(s), o grau de alteração, o espaçamento de fraturas, a presença de falhas geológicas, o estado de tensão *in-situ* e as condições hidrogeológicas (Hudson & Harrison, 1997).

Tal como nos maciços terrosos, os maciços rochosos apresentam vários fatores de instabilização, sendo a circulação de água, também, um dos fatores relevantes.

Na realização de escavação em rocha, serão criados espaços vazios pela remoção de vários blocos do maciço *in-situ*, resultando numa alteração do estado de tensão do respetivo maciço. Se não houver um correto conhecimento das suas propriedades e uma atempada aplicação de medidas de contenção, poderão ocorrer roturas ou deslizamentos, podendo originar consequências negativas para as estruturas em edificação e para as estruturas na envolvente (Hudson & Harrison, 1997).

Expostos as principais condicionantes e os fatores de instabilização de escavação em solo e rocha, importa mencionar os principais tipos de rotura que podem ocorrer nestes maciços. Em maciços terrosos, um dos principais tipos de rotura/movimento são os deslizamentos, dependendo essencialmente da granulometria do solo e da presença de água.

Em escavações em meio urbano, é muito frequente a realização de taludes com vários ângulos de inclinação, sendo que, em caso de solos com forte componente argilosa, com baixa permeabilidade, a circulação de água poderá facilmente promover deslizamentos, assemelhando-

se a movimentos de encostas. Quando se trata de maciços com maior fração de areia, logo com maior facilidade de percolação de água, poderá ocorrer uma excessiva erosão, podendo também originar deslizamentos (Figura 1).

Nos maciços rochosos, os principais tipos de rotura estão diretamente relacionados com as famílias de descontinuidades (orientação, espaçamento, abertura, rugosidade, entre outras) e com a percolação de água na superfície dessas mesmas descontinuidades (Figura 2). No caso da rotura por deslizamento, ocorre a movimentação de rocha por influência da gravidade.

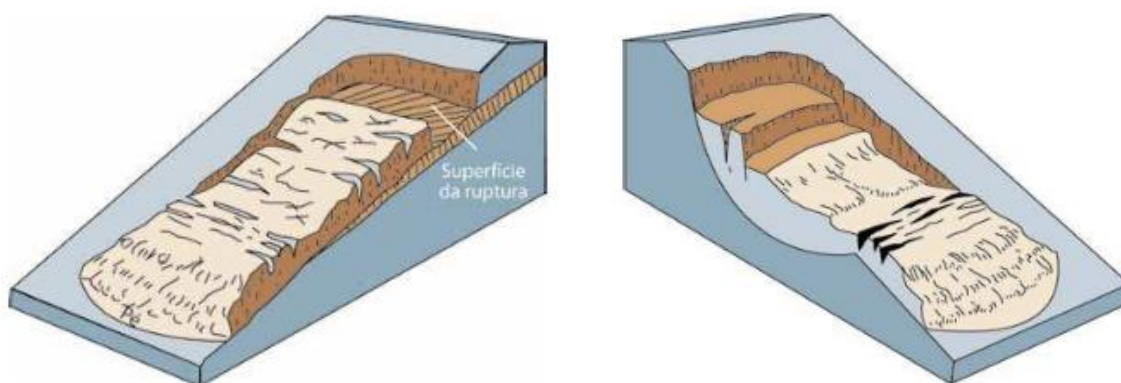


Figura 1 – Ilustrações representativas de deslizamentos em solo. Imagem da esquerda representa um deslizamento transacional e a imagem da direita representa um deslizamento rotacional (adaptado de Highland & Bobrowsky, 2008)

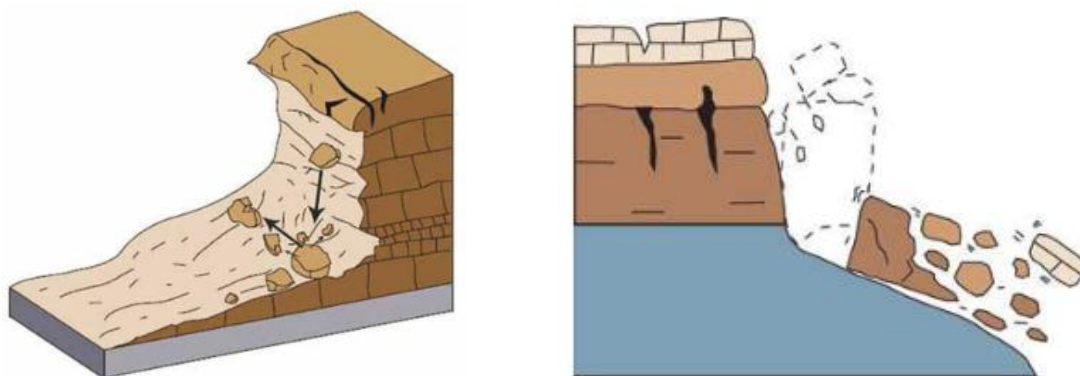


Figura 2 – Ilustrações representativas de deslizamentos/queda em rocha. Imagem da esquerda representa a queda de blocos rochosos e a imagem da direita representa um tombamento de rochas (adaptado de Highland & Bobrowsky, 2008)

2.4. Plano de instrumentação

Como supracitado, para a generalidade das obras de engenharia que envolvam escavações a céu aberto em meio urbano recomenda-se a implementação de monitorização e, consequentemente,

de um plano de instrumentação adequado. Esta situação torna-se mais premente em centros urbanos antigos e/ou densamente ocupados, uma vez que as novas construções ou reabilitações serão desenvolvidas contiguamente ou muito próximas de estruturas em utilização.

A conceção do plano de instrumentação é da competência da equipa de projetistas, devendo ser implementado por técnicos responsáveis que apresentem um adequado conhecimento das metodologias de instrumentação, bem como dos dispositivos, equipamentos e instrumentos existentes para monitorização (Segalini et al. 2017).

Apesar das normas e recomendações existentes, realça-se que continuam a verificar-se projetos e construções sem plano de instrumentação ou com um plano muito deficitário, o que poderá impossibilitar a deteção e/ou controlo de potenciais instabilizações.

O plano de instrumentação deverá ser, na medida do possível, adaptado a cada obra, respondendo à principal preocupação de monitorizar o terreno e as estruturas, com uma previsão atempada de eventuais alterações aos estados de tensão e de deformação, permitindo a implementação de medidas de contingência em tempo oportuno.

Para a definição do plano de instrumentação é necessário saber vários aspetos, destacando-se: o tipo de estrutura; a sua finalidade; as suas dimensões e a profundidade de escavação; a localização e tipologias dos aglomerados urbanos; as estruturas e infraestruturas na área de influência; o tipo de terreno e as suas condições de rotura.

Desta forma, segundo Dunnicliff (1988) o plano de instrumentação deverá responder a certos ponto-chave, tais como:

- Definição de um objetivo;
- Grandezas a medir;
- Seleção de equipamentos;
- Localização de instalação dos equipamentos;
- Frequência de leituras;
- Níveis de alerta e alarme;
- Modo de apresentação de dados;
- Circuito de informação e organigrama de decisão;
- Definição de medidas de contingência em caso de necessidade.

2.4.1. Objetivo e grandezas a medir

A implementação de um plano de instrumentação adequado visa a deteção de deslocamentos gerados pela intervenção, a avaliação das condições de segurança da obra e sua envolvente, e a otimização de metodologias utilizadas em projeto e em obra.

A instrumentação tem como objetivos: a confirmação de pressupostos de projeto; a validação de metodologias construtivas; a segurança de pessoas, equipamentos e estruturas; e, na fase de exploração, a segurança dos utilizadores com a verificação da integridade e longevidade estrutural (Dunnicliff, 1988).

Um plano de instrumentação adequado permitirá a realização de uma boa monitorização, isto é, com leituras fidedignas e uma análise atempada e eficaz dos movimentos gerados em obra.

Relativamente às grandezas a medir, estas irão variar entre os vários tipos de obra de engenharia e considerando as individualidades de cada obra, no entanto, a monitorização de deformações, de tensões e do nível de água são comuns à generalidade das obras (Segalini et al. 2017). Estes três pontos, juntamente com a monitorização de vibrações, podem ser aplicados a diferentes propósitos, destacando-se os seguintes:

- Deformação do terreno;
- Deformação das estruturas de contenção;
- Deformação das estruturas em construção ou reabilitação;
- Tensão e pressão do terreno, das diferentes estruturas e dos materiais;
- Nível ou níveis de água e pressão de água;
- Deformação das estruturas e infraestruturas vizinhas;
- Vibração imposta a estruturas e infraestruturas vizinhas.

2.4.2. Seleção e localização de instalação dos equipamentos

Os equipamentos para monitorização devem ser selecionados de forma criteriosa e de acordo com as características do terreno, da estrutura em construção e sua envolvente. Contudo, uma das maiores problemáticas na seleção dos equipamentos é a vertente económica, uma vez que quanto mais precisa e automática for a monitorização, maior será o seu custo, sendo este, muitas vezes, um fator preponderante na seleção dos equipamentos.

Para a seleção dos equipamentos deverá ser tipo em conta o princípio da redundância de aquisição de dados e de representatividade do cenário ocorrente, a frequência e a precisão dos equipamentos. Na monitorização geotécnica é necessário ter em consideração que, por diversos fatores, os equipamentos podem registar dados incorretos, constituindo representações que não correspondem à realidade. Desta forma, deverá ser implementada a instalação de equipamentos complementares e redundantes entre si, permitindo a deteção de erros quando adquiridos só em alguns, ou a confirmação de movimentos quando detetados nos vários equipamentos.

Quanto às quantidades a instalar, Segalini et al. (2017) refere ser necessário realizar uma análise detalhada da área de forma a evitar a colocação de dispositivos em excesso, o que poderá desencadear confusão e criar dificuldades no acesso, na recolha e na consequente análise de dados, podendo originar excesso de informação. Por sua vez, se a quantidade instalada for inferior à necessária, quer por razões económicas, quer por análise deficitária da área, os dados registados poderão não ser devidamente representativos, dificultando a análise e interpretação.

Relativamente aos locais de implementação do sistema de instrumentação (instalação de equipamentos) (Figura 3) devem ser privilegiados alguns pontos, tais como: os locais onde se espera que haja maior deformação; zonas representativas da escavação, da obra ou alçados; vértices e zonas centrais das estruturas de contenção e de estruturas vizinhas; e locais chave da envolvente da escavação.

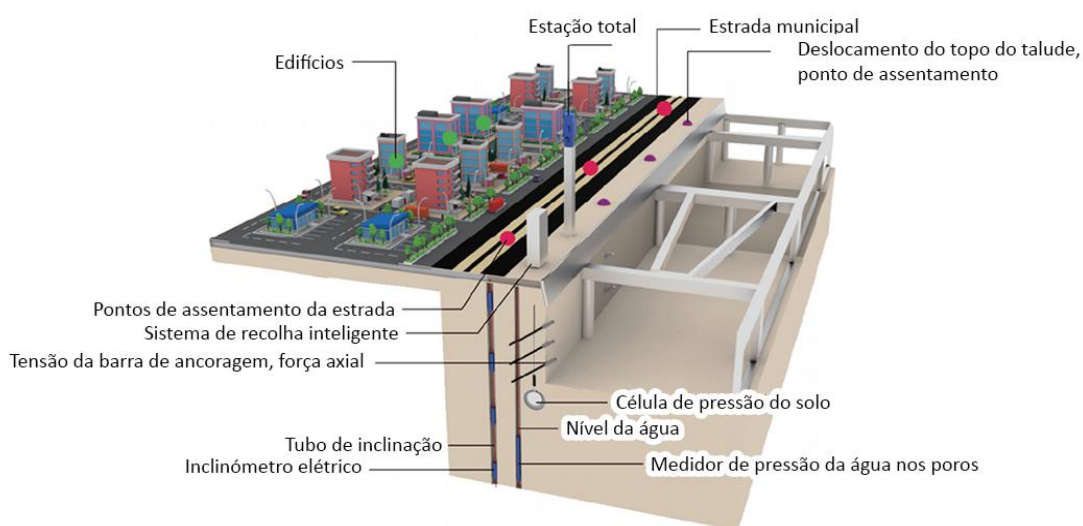


Figura 3 – Ilustração representativa da seleção e localização de instalação de equipamentos para monitorização de obra de escavação a céu aberto em meio urbano (GeoSitter, sem data)

2.4.3. Frequência de leituras e níveis de alerta e alarme

A frequência de leituras está associada ao tipo de obra de engenharia, à fase em que a obra se encontra e ao tipo de aquisição de dados (manual ou automática).

Previamente à intervenção, todos os equipamentos possíveis devem ser instalados. Após a sua instalação, é realizada a primeira leitura, designando-se leitura de zeragem. Esta leitura serve como leitura de referência, sendo que todas as leituras subsequentes serão comparadas entre elas e com a leitura de zeragem.

Durante a realização de uma obra de escavação a céu aberto, podem definir-se quatro fases construtivas, sendo estas a fase de escavação, a fase de construção das infraestruturas e estruturas, a fase de acabamentos e a fase de exploração. A fase mais crítica é a de escavação, sendo que nesta fase as leituras de monitorização devem ter uma maior frequência. Nas seguintes fases, a frequência de leitura pode ser mais espaçada, diminuindo gradualmente com o avançar da empreitada, desde que se verifique comprovada estabilidade. A frequência de leituras deverá estar expressa no plano de instrumentação, contudo, sempre que se observe evolução ou tendências de evolução de deformação/tensão, a frequência de leituras deverá aumentar. É importante ressaltar, contudo, que o aumento de frequência de leituras não vai promover a estabilidade, mas permite acompanhar a situação mais pormenorizadamente.

Na seguinte tabela (Tabela 1) apresenta-se, a título de exemplo, um resumo tipo da frequência de leituras muitas vezes adotado em obras de escavação a céu aberto em meio urbano.

Tabela 1 – Síntese da frequência de leituras muitas vezes adotada em obras de escavação a céu aberto em meio urbano

Fase da obra	Frequência de leituras	
	Aquisição de dados manual	Aquisição de dados automática
Escavação	Diária / Bissemanal	Hora a hora
Construção	Semanal	Duas em duas horas
Acabamentos	Quinzenal e mensal	Diária
Exploração	Trimestral, semestral e anual	Semanal

Os níveis de alerta e alarme são definidos pelo projetista em fase de projeto, estando dependentes da modelação desenvolvida nessa altura e, consequentemente, específicos para cada obra. Durante a modelação são definidos quais os valores máximos de deformação

expectável que podem ser observados para cada equipamento e, conseqüentemente, os respectivos valores de alerta e alarme.

Segundo o EC7 (2010), os níveis de alerta e alarme podem ser definidos em:

- Nível de alerta (em função do estado limite de utilização) – máxima rotação relativa de 1/1000, sem tendência para estabilização;
- Nível de alarme (em função do estado limite último) – máxima rotação relativa de 1/500, sem tendência de estabilização.

Adaptando a norma do EC7, de forma generalizada, na maioria das obras é comum a utilização dos seguintes níveis:

- Nível de alerta (ou nível de alerta I) – definido como 25% da deformação máxima expectável;
- Nível de alarme (ou nível de alerta II) – definido como 50% da deformação máxima expectável.

2.4.4. Apresentação de dados e circuito de informação

A aquisição dos dados de monitorização, a sua análise e apresentação de resultados em relatório e o circuito de informação fazem parte da implementação do sistema de monitorização geotécnica.

Para a análise dos dados obtidos e subsequente apresentação de dados, é necessário mencionar previamente alguns conceitos, como p. ex.:

- Sem variação significativa – quando se verifica uma situação de estabilidade;
- Variação – alteração pontual dos valores de leitura, mas sem tendência de evolução, muitas vezes associado à falta de dados para definir uma tendência (fase inicial de deformação) ou a eventual erro de leitura;
- Evolução/tendência de evolução – quando se confirma, em leituras sequentes, uma deformação associada a uma determinada taxa de evolução;
- Taxa de evolução – variação de deformações no mesmo sentido num determinado período;
- Deformação – alteração confirmada do estado do maciço e/ou das estruturas.

Para a apresentação dos dados, devem ser elaborados relatórios simples, objetivos e sequenciais, permitindo maior facilidade de leitura e interpretação para todos os intervenientes na obra. Neste relatório devem constar gráficos e tabelas de rápida leitura e interpretação, permitindo a comparação de diferentes leituras ao longo do período de monitorização.

Paralelamente aos relatórios, nos sistemas de aquisição automática de dados, devem ser adotadas plataformas de apresentação de dados *on-line* com dados disponibilizados em formato gráfico e numérico. É de notar que mesmo os registos automáticos necessitam de análise e interpretação de um técnico experiente e devem ser vertidos em relatório regulares.

Após a recolha, tratamento e elaboração de relatório com os dados de monitorização, estes devem ser enviados atempadamente para as pessoas responsáveis pela empreitada, sendo necessário definir um circuito de informação. Os relatórios podem ser enviados via *email* ou apresentados em plataformas *on-line*, no entanto, sempre que se verifiquem situações potencialmente gravosas, a transmissão de informação deverá ser confirmada por outro meio, como, por exemplo, via telefónica (Figura 4).



Figura 4 – Esquema representativo de todo o circuito de informação. Desde a fase de recolha de dados, passando pelo processamento de informação, análise de resultados e elaboração de relatórios, finalizando na disponibilização da informação via *email* ou plataforma *on-line*

Por último, caso sejam detetadas grandezas excessivas, tendo sido atingidos ou ultrapassados os critérios de alerta e alarme definidos em projeto, devem, de imediato, ser aplicadas medidas de contingência. Estas medidas deverão ser analisadas especificamente para cada obra, mas, de forma habitual e genérica, podem referir-se, entre outros, os seguintes pontos:

- Suspensão imediata dos trabalhos de escavação;
- Reparação dos principais danos detetados que constituam situações de risco;
- Reforço das estruturas de contenção;
- Reforço das condições de drenagem na área da obra;
- Reposição integral do material removido na escavação;
- Revisão do projeto de execução.

[página propositadamente em branco]

Capítulo III

Equipamentos e instrumentos de monitorização geotécnica

[página propositadamente em branco]

3. Equipamentos e instrumentos de monitorização geotécnica

3.1. Generalidades

Os projetos de escavações profundas em áreas urbanas envolvem potenciais riscos devido à possibilidade de instabilidades do terreno e a problemas estruturais. Para uma identificação desses riscos e para garantir uma intervenção atempada que promova a segurança e o sucesso destes projetos, a monitorização de escavações profundas tornou-se um ponto-chave das práticas modernas de construção (Encardio, 2023b).

Como já abordado, a monitorização é um processo que envolve a recolha e análise de dados para avaliar o comportamento do terreno e das estruturas durante as atividades de escavação e até mesmo para o período de exploração.

A realização de uma monitorização adequada apresenta várias vantagens, sendo possível destacar:

- Detecção atempada de potenciais perigos;
- Conformidade com as normas;
- Viabilidade da estrutura a longo prazo;
- Redução de custos.

Em conformidade com o anteriormente exposto, a implementação de instrumentação pode parecer cara numa fase inicial, contudo, a execução de uma monitorização eficaz poderá levar à

redução de custos, uma vez que minimiza a necessidade de dispendiosas ações corretivas em caso de comportamento inadequado do solo e/ou estruturas (Russo et al. 2008; Encardio, 2023b).

Para a realização de uma correta monitorização geotécnica é necessária a utilização de diversas técnicas e instrumentos para recolha de dados e análise de integridade estrutural e da segurança do local de escavação. Os equipamentos habitualmente utilizados podem dividir-se em:

- Dispositivos de observação – dispositivos que permitem a realização de leituras, p. ex. alvo e prisma topográfico, marca de superfície, calhas inclinométricas, “aranhas” e pratos de extensómetros magnéticos, entre outros;
- Equipamentos de medição – dispositivos que realizam a medição nos dispositivos de observação, p. ex. taquímetro, nível topográfico, sonda inclinométrica, sonda piezométrica, sonda magnética, clinómetros, entre outros;
- Instrumentos de medição – instrumentos instalados e que fazem as próprias leituras, p. ex. inclinómetro *in-place* ou *SAAV*, *tiltmeter*, distanciómetro, fissurómetro, célula de carga manométrica, sismómetro, entre outros.

3.2. Características de equipamentos e instrumentos

Os diferentes equipamentos e instrumentos de monitorização geotécnica apresentam várias incertezas e erros de medição. No trabalho de Dunnicliff (1988) são apresentados alguns pontos, destacando-se a conformidade; a exatidão; a precisão; e os erros.

A instalação e presença de um determinado equipamento/instrumento de medição não deverá alterar as propriedades alvo de leitura, no entanto, caso estes parâmetros se alterem, infere-se que o equipamento apresenta baixa conformidade. A conformidade de um equipamento é uma das principais características para a obtenção de uma elevada exatidão (Dunnicliff, 1988).

A exatidão de uma medida está associada à proximidade com o valor real em medição (Figura 5). A exatidão de um instrumento é avaliada durante a sua calibração, de modo a verificar se o valor da exatidão corresponde ao valor predefinido em fábrica. A exatidão é geralmente expressa como um valor $\pm$, como exemplo, ± 1 mm ou ± 1 %, sendo que no primeiro caso o valor medido apresenta uma variação de ± 1 mm face ao valor real (*op. cit.*).

Relativamente à precisão (Figura 5), esta corresponde à aproximação entre os diferentes valores medidos para uma determinada grandeza e é também, frequentemente, expressa como um valor de $\pm$. Exemplificando, um valor de $\pm 1,00$ apresenta maior precisão que um valor de $\pm 1,0$ (*op. cit.*).

Associado a estas duas características surge o campo de medida, correspondendo este a um intervalo entre o valor mais alto e mais baixo que um instrumento poderá medir, sem que haja alteração no seu valor de $\pm$ da precisão e da exatidão (*op. cit.*).



Figura 5 – Ilustração representativa da diferença entre exatidão e precisão (adaptado de Dunnicliff, 1988)

No que respeita aos erros de medição, Dunnicliff (1988) descreve-os como a diferença entre o valor medido e o real valor, podendo derivar de várias causas. Este autor define:

- Erros grosseiros – podem ser originados por descuidos, fadiga ou inexperiência. Estes erros podem ser minimizados p. ex. através da duplicação de leituras;
- Erros sistemáticos – resultam de incorreta calibração ou por alteração dos parâmetros de calibração ao longo do tempo e podem ser minimizados com calibrações periódicas;
- Erros de conformidade – ocorrem pela inadequada seleção de determinado equipamento ou por defeitos na sua conceção, podendo ser minimizados com uma correta seleção de equipamentos e com a utilização de procedimentos de trabalho eficazes;
- Erros ambientais – surgem associados ao efeito de condições climáticas como temperatura, humidade, pressão atmosférica, etc, e podem ser minimizados com a aplicação de fatores de correção. Na recolha de dados de monitorização geotécnica devem ser registadas sempre as condições ambientais no momento;
- Erros de observação – geralmente derivam da existência de vários operadores e de várias técnicas para recolha de dados, podendo ser minimizados p. ex. com a instalação de sistemas de aquisição automática de dados;
- Erros de amostra – encontram-se associados à inerente variabilidade dos diferentes materiais geológicos, sendo minimizados pela instalação suficiente de instrumentos e em locais representativos;

- Erros aleatórios – podem ocorrer p. ex. devido ao ruído, à fricção interna ou a condições ambientais e podem ser minimizados por uma correta escolha de instrumentação ou por seleção de várias metodologias complementares.

3.3. Grandezas e soluções de monitorização

No presente subcapítulo realizar-se-á uma síntese dos principais equipamentos de monitorização geotécnica atualmente utilizados nas obras de engenharia em Portugal, associando-os às respetivas grandezas que pretendem monitorizar. Os equipamentos e instrumentos de medição podem ser agrupados consoante o seu objetivo de monitorização, destacando-se:

- Medição de deformações horizontais e verticais;
- Medição de tensão e pressão;
- Medição de níveis freáticos e outras grandezas associadas à água;
- Medição de inclinação e rotação;
- Medição de fissuras;
- Medição de vibrações.

De seguida apresenta-se uma tabela-resumo (Tabela 2) elaborada com base em Dunnicliff (1988); Slope Indicator (2004); Encardio (2023a); e Geokon (2025).

Tabela 2 – Síntese das grandezas a medir e das principais soluções de monitorização

Grandeza a medir	Equipamentos e instrumentos de medição
	Dispositivos de observação
Deformações horizontais	Inclínómetro vertical (sonda inclinométrica) Inclínómetro <i>in-place</i> ou SAAV Extensómetro de âncora Alvos e prismas topográficos <i>Strain gage</i> de corda vibrante
Deformações verticais	Inclínómetro horizontal (sonda inclinométrica) Inclínómetro horizontal <i>in-place</i> ou SAAV Alvos e prismas topográficos Marcas de superfície e réguas de nivelamento Extensómetro magnético de aranhas e pratos (sonda magnética) Extensómetro incremental e Extensómetro de varas Células de assentamento hidráulicas ou de corda vibrante
Deformações várias	Secção de convergência com alvos/prismas e marcas <i>Tiltmeter</i> com distanciómetro Convergência SAAV Convergenciómetro
Tensão	Células de carga hidráulicas Células de carga elétricas ou de corda vibrante
Pressão	Células de pressão total de corda vibrante Estações de pressão
Nível freático	Piezómetro de tubo aberto (sonda piezométrica)
Pressão de água	Piezómetro de corda vibrante ou elétrico Piezómetro manométrico de pressão Piezómetro de Casagrande
Inclinação e rotação	Clinómetro <i>Tiltmeter</i>
Fissuras	Fissurómetro biaxial e triaxial <i>Crackmeter</i> de corda vibrante
Vibrações	Sismómetro

3.4. Sistemas de monitorização

Atualmente, em monitorização geotécnica existe uma panóplia de soluções muito alargada, desde métodos convencionais de aquisição manual de dados, passando por sistemas automáticos, até sistemas de vanguarda de monitorização remota, como é o caso dos satélites.

Dentro destes sistemas, os diversos equipamentos e instrumentos de medição também apresentam uma diversidade muito grande, desde simples equipamentos mecânicos e hidráulicos, passando por sensores geotécnicos elétricos e de corda vibrante, até instrumentos de medição de fibra ótica (Smartec, 2018; Encardio, 2023a; Geokon, 2025).

Nos equipamentos com sensores elétricos podem destacar-se: as células de carga; os inclinómetros *in-place* para utilização vertical ou horizontal; os *tiltmeters* p. ex. em box, horizontais ou verticais; os *tiltmeters* triaxiais; e os sismógrafos. Sendo que, no caso dos inclinómetros, *tiltmeters* e sismógrafos, estes são constituídos por acelerómetros *MEMS - Micro Electro Mechanical Systems*. No caso dos equipamentos de corda vibrante, os mais comuns são: os piezómetros; as células de carga; os *strain gages*; os *crackmeters*; as células de pressão total; e as células de assentamento (Encardio, 2023a; Geokon, 2025).

Relativamente aos instrumentos de fibra ótica, estes são mais precisos e fiáveis do que os sensores elétricos e de corda vibrante, uma vez que não são afetados por campos elétricos ou magnéticos. A monitorização com recurso a estes permite uma elevada frequência de dados e um registo de eventual variação de deformação, temperatura e pressão ao longo de determinado alinhamento do cabo de fibra ótica. Nos instrumentos de medição de fibra ótica podem destacar-se os *point sensors*, os *multiplexer*, os *long base sensor* e os *distributed* (Smartec, 2018).

Nos sistemas de aquisição manual de dados, é necessária a presença de um operador para a realização das leituras, implicando que, durante determinado período, não haja registo de dados, podendo nesse intervalo ocorrer variações significativas no terreno e/ou estruturas.

Na aquisição manual de dados, destacam-se a utilização de sondas inclinométricas, piezométricas e magnéticas, além da leitura de células de carga manométricas, elétricas e de corda vibrante, de extensómetros de varas, de alvos, prismas e marcas por taquímetro e de fissurómetros.

Por sua vez, nos sistemas automáticos de aquisição de dados, a recolha dos mesmos pode ser realizada por um operador através de cabo ou por um sistema sem fios (Encardio, 2023a). No caso de sistema sem fios, os dados são adquiridos, armazenados e transmitidos de uma de três formas: através de um *datalogger* com transmissão *GSM*; através de sistema *RF short range*; ou de sistema *RF long range*. No caso de transmissão de dados via *datalogger* para plataforma *on-line*,

primeiramente é necessário conectar os diferentes instrumentos de medição a nódulos de leitura que, por sua vez, armazenam e enviam os dados para um *gateway*. Este *gateway* têm a função de aglomerar os dados dos diferentes nódulos e de os transmitir para uma plataforma *on-line*, ficando os mesmos disponíveis para análise remota e com a receção de alertas em caso de ultrapassar limites pré-estabelecidos.

Relativamente aos sistemas de monitorização remota, destacam-se as seguintes técnicas: *LIDAR*; Radar; *VANT* (uso de *drones* para inspeções visuais); e de satélites (*InSAR* e *Skywatch*). Estes sistemas de monitorização apresentam algumas desvantagens, mas apresentam também diversas vantagens – p. ex., no caso de monitorização por satélite, surge a possibilidade de uma análise histórica e com uma grande abrangência espacial. Outro sistema cada vez mais empregue em escavações profundas é o sistema de Radar. Este sistema é utilizado para detetar e monitorizar movimentos do solo utilizando ondas rádio para medir a distância entre a antena do radar e a superfície do solo; assim, ao digitalizar continuamente a área de escavação, o radar consegue detetar diversos movimentos de solo (Encardio, 2023c). Relativamente às desvantagens, pode mencionar-se um significativo desvio padrão que afeta a sua exatidão, embora apresentem boa precisão. Outro fator a ter em conta é que são metodologias muito dispendiosas.

3.5. Equipamentos e instrumentos mais frequentes na monitorização de escavações a céu aberto em meio urbano

3.5.1. Análise estatística de instrumentação implementada

Neste capítulo, apresentam-se os equipamentos e instrumentos mais utilizados em Portugal para a monitorização de escavações a céu aberto em meio urbano. Para a seleção das metodologias e dos métodos de instrumentação e monitorização que serão alvo de estudo, realizou-se uma análise estatística da instrumentação implementada em casos de obra real em Portugal.

Para tal, recorrendo à base de dados de uma empresa portuguesa de referência na área da instrumentação e monitorização geotécnica, foram selecionadas todas as obras já finalizadas que se incluíam no âmbito de monitorização de obras de escavação a céu aberto em meio urbano. Por razões de representatividade de metodologias e de atualidade de mercado foram selecionadas somente as obras executadas de 2022 até ao presente.

Esta primeira seleção foi, de seguida aprimorada, realizando-se uma seleção final de obras que representam de forma genérica e fidedigna, não só a monitorização da estrutura em construção, mas também a monitorização de estruturas envolventes. Na seleção final privilegiaram-se obras com metodologia de aquisição de dados manual ou semiautomática, isto é, obras que apresentavam equipamentos/instrumentos com aquisição manual e automática de dados.

Da seleção original foram excluídas as obras que apresentavam monitorização muito particular, não sendo representativas, e também foram removidas as obras que não apresentavam uma frequência de leituras definida em projeto, resultando em poucas campanhas de leitura, com grande espaçamento e com baixa representatividade dos dados de monitorização recolhidos.

Para a análise da instrumentação implementada foram selecionadas trinta e cinco obras, conforme apresentado no Gráfico 1. Destaca-se a utilização de vários métodos de instrumentação, nomeadamente alvos/prismas, inclinómetro vertical, células de carga, piezómetro, fissurómetro e *tiltmeter*.

Nota que se opta por “método” por ser um termo mais específico, mais direcionado para a vertente técnica e operacional da instrumentação, enquanto o termo “metodologia” se considera de abrangência mais ampla, relacionada com a definição e organização da instrumentação.

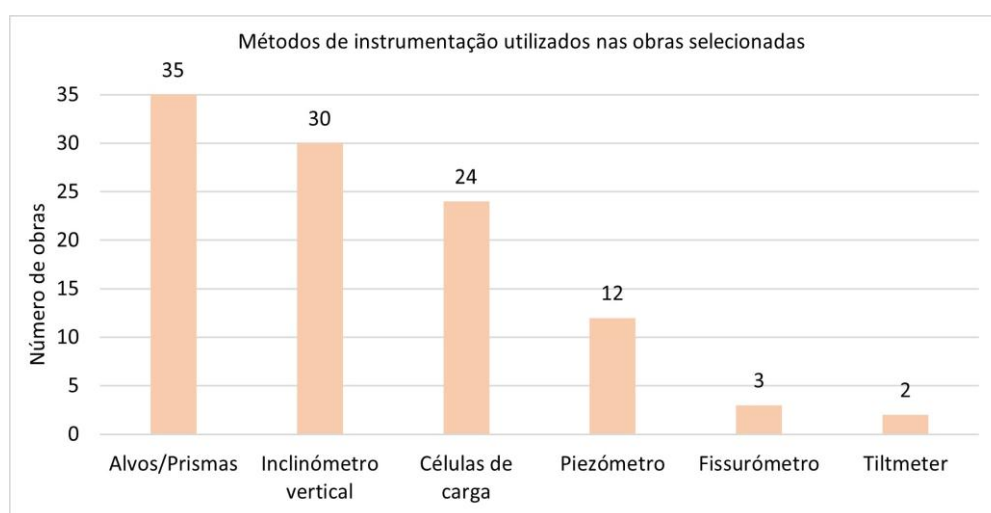


Gráfico 1 – Métodos de instrumentação utilizados nas obras selecionadas

Da análise do Gráfico 1, verifica-se que os alvos/prismas com taquímetro (estação total) e os inclinómetros verticais foram os mais utilizados. As células de carga foram utilizadas em 24 das 35 obras, podendo subdividir-se em células hidráulicas com manómetro (12 obras) e em células

elétricas ou de corda vibrante (12 obras). Os piezómetros foram utilizados em 12 obras, enquanto os fissurómetros e os *tiltmeters* apresentam uma utilização pontual.

Nas 35 obras seleccionadas, observa-se desde a utilização de um método de instrumentação único até à utilização, na mesma obra, de 5 métodos. No Gráfico 2 apresenta-se a percentagem correspondente das quantidades de métodos de instrumentação utilizados por obra.

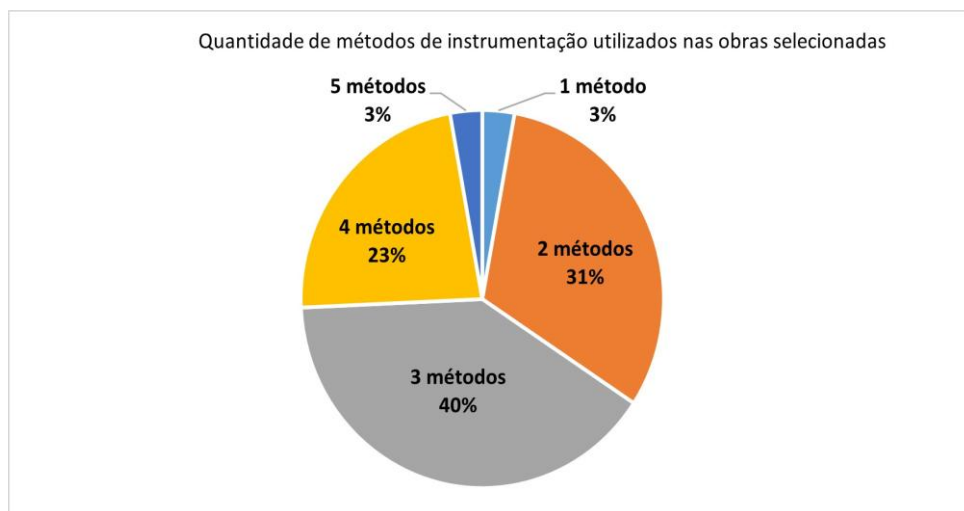


Gráfico 2 – Quantidade e correspondente percentagem de métodos de instrumentação utilizados por obra

Analisando o Gráfico 2, conclui-se que, em mais de 90% das obras seleccionadas, foram utilizados dois, três ou quatro métodos, sendo a maior percentagem (40%) correspondente à utilização de três métodos de instrumentação.

Dentro de cada método de instrumentação, podem ser individualizadas as quantidades de equipamentos/instrumentos de medição ou de dispositivos de observação utilizados. No Gráfico 3 apresenta-se a quantidade média de equipamentos, instrumentos ou dispositivos utilizados por cada método de instrumentação.

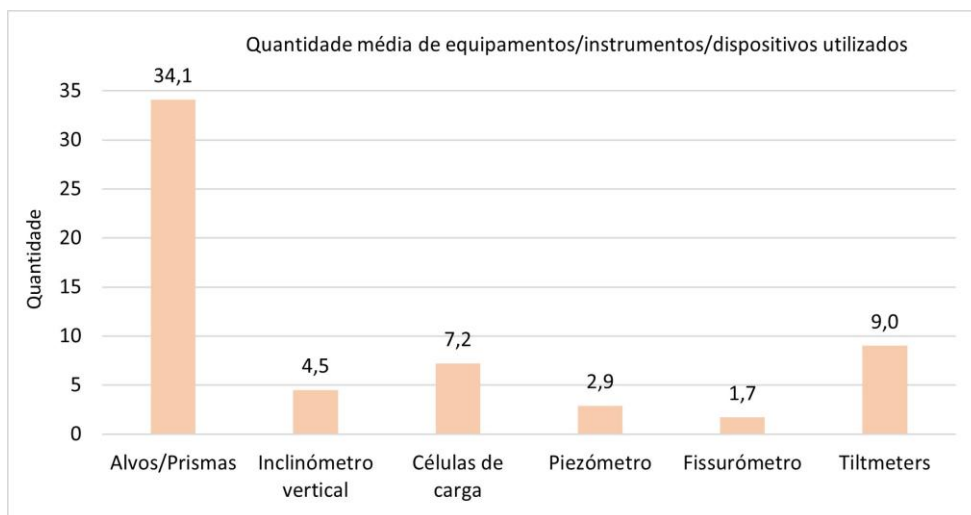


Gráfico 3 – Quantidade média de equipamentos/instrumentos/dispositivos utilizados por cada método de instrumentação

Refere-se que, relativamente às células, individualizando as de carga hidráulicas e as elétricas ou de corda vibrante registou-se, respetivamente, uma quantidade média de 7,1 e de 7,3.

Para além das quantidades médias, importa mencionar as quantidades máximas e mínimas de equipamentos/instrumentos/dispositivos implementados para os quatro métodos de instrumentação mais utilizados, assim surge:

- Alvos/Prismas – Quantidade máxima 84, quantidade mínima 9;
- Inclínometro vertical – Quantidade máxima 12, quantidade mínima 2;
- Células de carga – Quantidade máxima 15, quantidade mínima 2;
- Piezómetros – Quantidade máxima 5, quantidade mínima 1.

No caso dos inclinómetros verticais, importa ainda perceber o seu comprimento. No total das 30 obras que apresentam este método, foram considerados 134 furos inclinométricos, verificando-se uma profundidade média por inclinómetro de 14,3 metros. Nestes inclinómetros verifica-se um comprimento máximo de 30 metros e um comprimento mínimo de 8 metros.

Outro dado importante para o presente estudo é o número de campanhas de leitura realizadas. Nas 35 obras consideradas para análise, foram realizadas um total de 1747 campanhas, que corresponde a uma média de 49,9 campanhas por obra. Desta análise destaca-se o número máximo de campanhas de 159 e o número mínimo de campanhas de 12.

Por último, além das obras com aquisição manual de dados, foram também analisados os instrumentos fornecidos para instalação em obras de escavação a céu aberto em meio urbano

com aquisição automática de dados. Desta análise destacam-se: inclinómetros SAAV; células de carga de corda vibrante; piezómetros de corda vibrante; e *wireless tiltmeter*.

Outros métodos de instrumentação e, respetivamente, outros equipamentos e instrumentos podem ser utilizados entre os inúmeros disponibilizados pelas diferentes marcas de equipamentos, contudo, face à análise realizada no presente subcapítulo, considera-se relevante focar nos prismas de reflexão total ou alvos, inclinómetros verticais, células de carga, piezómetros, fissurómetros e *tiltmeters*.

3.5.2. Alvos/Prismas

Na monitorização topográfica de obras de escavação a céu aberto em meio urbano destacam-se os alvos topográficos, os mini prismas e os prismas para leitura de deformações tridimensionais (x, y e z), através da leitura de ângulos e distâncias, utilizando-se como equipamento de leitura o taquímetro, vulgarmente conhecido como estação total (Figura 6 A).

Atualmente, na maioria das obras de escavação em meio urbano, a leitura destes dispositivos é realizada manualmente (Figura 6 B); contudo, nas obras de grande dimensão, tal como a construção do metro, é utilizada a aquisição automática de dados com uma estação total.

Os alvos (Figura 6 C), os mini prismas e os prismas topográficos são dispositivos de observação instalados como pontos fixos para monitorização de estruturas ou infraestruturas. Para a implementação do sistema de observação, para além dos respetivos dispositivos de monitorização (alvos ou prismas), é necessário instalar também referências externas (alvos ou prismas) fora da zona de influência a monitorizar, considerados fixos, para referenciação da rede topográfica a implementar (Dunnicliff, 1988; Eberhardt & Stead, 2011).

A instalação dos alvos pode ser feita diretamente na estrutura ou podem ser utilizados acessórios metálicos para melhor orientação dos alvos para o posicionamento de leitura, sendo os apoios metálicos instalados diretamente nas estruturas. Para a fixação dos prismas às estruturas é necessário realizar um furo nas mesmas. Habitualmente, utilizam-se mini prismas do tipo em L que permitem um ajuste de direção para o posicionamento da leitura.

Os alvos e prismas são lidos com recurso a estação total, sendo as estações com precisão angular de 0,5" as mais específicas para monitorização, uma vez que se pretende rigor máximo nas medições. Estas estações totais têm incorporado módulos de *software* específicos para monitorização (Leica Geosystems, 2025b).

A leitura dos alvos e dos prismas topográficos inicia-se com a correta colocação da estação total e do seu tripé, isto é, com o eixo principal da estação total coincidente com a vertical do ponto da estação, criando-se, assim, a primeira estação de leitura. Desta estação, são lidos todos os dispositivos de observação topográfica que estejam visíveis. Caso haja dispositivos ocultos na primeira estação de leitura é necessário criar outras estações de leitura que permitam a sua monitorização, sendo importante criar estações com uma curta distância entre elas, de forma a minimizar os erros de leitura (Veiga et al. 2007).

A determinação dos deslocamentos em x , y e z , pode ser efetuada por vários métodos, destacando-se a triangulação, que se baseia na medição de ângulos. Neste método, para além dos dispositivos em análise, devem ser utilizados pelos menos dois pontos externos fixos (pontos de referência), de coordenadas conhecidas, para a obtenção de uma rede de triângulos. Após a determinação dos ângulos, estes são transformados em coordenadas através de correlações trigonométricas (Veiga et al. 2007).

Para além da possibilidade de utilizar o método da triangulação, as estações totais mais atuais têm sempre incorporado um sistema EDM de infravermelhos, sendo que este sistema faz a recolha automática das coordenadas através da emissão de um feixe de luz contra um dispositivo de observação. Após a incidência do feixe no dispositivo, é medida a velocidade eletromagnética da radiação entre o equipamento de leitura e o dispositivo de leitura, permitindo a recolha das coordenadas de cada ponto (Dunnicliff, 1988; Veiga et al. 2007).



Figura 6 – (A) Taquímetro (estação total); (B) Aquisição manual de dados com estação total; (C) Alvo topográfico (fotografias do autor)

3.5.3. Inclínómetros verticais

Durante a realização de escavações em meio urbano podem ocorrer deslocamentos horizontais no terreno e/ou nas estruturas, sendo que a sua avaliação em profundidade é frequentemente realizada através da utilização de inclinómetros verticais. Estes inclinómetros são constituídos por uma sonda com um transdutor sensível à gravidade, concebido para medir a inclinação presente nas camadas (Dunnicliff, 1988).

A deformação registada pelos inclinómetros pode ser obtida de forma manual com a utilização de sonda inclinométrica (Figura 7 A e B) ou de forma automática, no caso de inclinómetros *in-place* de sensores elétricos ou SAAV, que ficam sempre instalados no interior da calha.

Primeiramente, para este método de instrumentação, é necessário instalar uma calha inclinométrica no local desejado, realizando-se para tal um furo vertical com recurso, p. ex., a um equipamento de sondagens. As calhas inclinométricas apresentam vários diâmetros e vários tipos de materiais, sendo os mais comuns o ABS ou PVC com diâmetro de 70 ou 85 mm (Ou, 2006; Encardio, 2023a; Geokon, 2025). Estas têm o detalhe de possuir chanfros (marcas de referência), que servem de guia para as rodas da sonda inclinométrica ou dos instrumentos *in-place*.

Durante a instalação da calha deve-se garantir que uma das direções dos chanfros fica alinhada com o sentido em que se espera a ocorrência de maior deformação, ficando a outra direção perpendicular à direção de maior deformação (Eberhardt & Stead, 2011).

A calha inclinométrica é instalada no local pretendido, com o comprimento adequado a cada caso, devendo a sua base ficar entre 3 e 5 m abaixo da zona que se pretende monitorizar, garantindo que a base fica em local onde não é expectável a ocorrência de deslocamentos (mesmo que seja por fluência do terreno).

Após a furação e instalação da calha com os chanfros devidamente orientados, procede-se à selagem do espaço anelar entre o furo e a calha. O principal objetivo da selagem é solidarizar a calha inclinométrica com o terreno envolvente, ou outro material estrutural, de forma a que os movimentos do terreno e/ou estrutura se reflitam na calha, sendo que a selagem deve ser feita com uma matriz de cimento, bentonite e areia, evitando assim os espaços vazios (Bassett, 2012).

Para a realização de leituras recorrendo a uma unidade de aquisição manual de dados é utilizada uma unidade portátil que o operador transporta até ao local de instalação de cada uma das calhas. De forma concisa, a unidade de leitura portátil consiste em: torpedo, geralmente com sensores biaxiais; unidade portátil de aquisição de dados; e cabo de ligação entre o torpedo e a unidade portátil (Ou, 2006; Roctest, 2025).

Para a adequada aquisição e interpretação dos dados é importante garantir que a principal direção de medição do torpedo fica alinhada com a direção dos chanfros onde se espera que haja maior deformação, no caso a direção do interior da escavação, designada como direção A+. O cabo que faz a ligação ao torpedo exibe marcas, geralmente de 50 em 50 cm, que são utilizadas como referência para a realização de leituras sempre no mesmo sítio e com referência no topo da calha inclinométrica.

A leitura manual do inclinómetro é realizada da sua base para o seu topo, com leituras geralmente espaçadas de 50 cm ou 1 m. No caso de torpedos com sensores biaxiais, isto é, com leitura simultânea em duas direções ortogonais, no final da primeira leitura (A+ e B+), o torpedo é rodado 180°. Assim, faz-se coincidir a principal direção de leitura do torpedo com o sentido oposto da maior deformação expectável (designada de direção A-), realizando-se nova leitura (A- e B-) (Segalini et al. 2017) (Figura 7 C).

Segundo Bassett (2012) e várias marcas de referência no mercado, a realização de duas leituras com direção oposta no mesmo inclinómetro, permite a confirmação de resultados e a eliminação ou deteção de eventuais erros de leitura.

Após a leitura, é preciso interpretar os dados registados, transferindo-os para o computador. Com a utilização de programas informáticos específicos é feito o tratamento dos resultados, com cálculos da deformação a partir da inclinação medida na calha em cada posição de leitura e com a criação de gráficos de deslocamento em profundidade para cada uma das leituras.



Figura 7 – (A) Aquisição manual de dados com sonda inclinométrica; (B) Redundância de leituras entre inclinómetro vertical e prisma topográfico; (C) Calha inclinométrica com marcas de referência e orientação de leitura (fotografias do autor)

Como mencionado, para além da aquisição manual, existem sistemas de aquisição automática de dados, nomeadamente com inclinómetros *in-place* ou SAAV (Figura 8 A e B). A monitorização com

recurso a estes inclinómetros é, geralmente, utilizada em obras que requerem alta qualidade de dados, em tempo real e com intervalos de leitura muito reduzidos (Bassett, 2012).

Os inclinómetros *in-place* são compostos por sensores elétricos, geralmente espaçados entre 50 cm e 3 m, encontrando-se estes sensores sequencialmente conectados a uma unidade de leitura automática (*datalogger*). Desta forma, é possível a realização de leituras de inclinação de forma contínua, precisa e em tempo real, do terreno e/ou da estrutura, ao longo de todo o comprimento do inclinómetro.

Após o registo dos dados, estes são transmitidos para o *datalogger* (módulo de comunicação digital) através do cabo de dados que se encontra associado ao inclinómetro. O módulo de comunicação digital funcionará como um recetor e armazenador de dados, transmitindo-os posteriormente diretamente para a internet, ou via rádio frequência para um *gateway*, sendo imprescindível que o *gateway* consiga comunicar com o *datalogger*.

O *gateway* tem a função de gerir o sistema, comunicando com os diferentes *datalogger* para que seja feita a leitura e recolha de dados. Para além disso, o *gateway* comunica imediatamente os dados para plataforma na internet, onde podem ser consultados em formato numérico e/ou gráfico. Como alternativa, os dados da monitorização também podem ser acedidos através de ligação diretamente no equipamento *gateway*.



Figura 8 – (A) Instalação de inclinómetro vertical de aquisição automática SAAV (fotografia do autor); (B) Sensor geotécnico representativo dos inclinómetros *in-place* (Encardio, 2023a)

3.5.4. Células de carga

A carga que as estruturas aplicam ao terreno e o contrário deve ser alvo de uma monitorização regular durante a fase de escavação, de forma a prevenir que o valor de cedência não seja atingido durante a fase de imposição de cargas. Para este tipo de medições são utilizadas células

de carga em ancoragens que podem ser empregues para monitorizar estruturas temporárias ou permanentes, durante a fase de construção e na fase de exploração (Dunnicliff, 1988).

No âmbito de escavações em meio urbano, as células de carga são utilizadas sobretudo para monitorizar a tensão nos apoios das estruturas de contenção (ancoragens ou escoras). De forma mais completa, as células de carga são sensores utilizados para medir a força ou a carga exercida sobre uma estrutura, monitorizando as cargas horizontais que atuam sobre os muros de contenção ou sobre os sistemas de escoramento ou de ancoragem.

Atualmente, distinguem-se três tipos principais de células de carga, nomeadamente células hidráulicas, células elétricas e células de corda vibrante (Dunnicliff, 1988; Ou, 2006; Encardio, 2023a; Geokon, 2025). As principais características de cada uma são:

- Células de carga hidráulicas – possuem um orifício central em torno do qual apresentam uma câmara com o interior preenchido em vácuo por óleo, que se encontra conectada a um transdutor de pressão. Habitualmente, o transdutor é um manómetro de *Bourdon* com escala em quilonewtons (kN) ou bar que permite a monitorização visual da carga. Lateralmente a célula é selada com material metálico ou de borracha, associado a um cordão de soldadura. As células hidráulicas, também conhecidas como células manométricas, registam as variações de pressão do fluído quando são impostas ou removidas cargas (Figura 9 A);
- Células de carga elétricas – apresentam um formato relativamente idêntico às células hidráulicas, cilíndrico, e podem ser constituídas por aço ou liga de alumínio. No interior da célula, junto do limite externo, são instalados vários *strain gages* de resistência elétrica. Os *strain gages* encontram-se equidistantes, ligados em sequência, e com uma única saída para medição de resistência que é convertida em carga (Figura 9 B);
- Células de carga de corda vibrante – são concebidas com o mesmo princípio das células hidráulicas (têm óleo), mas em vez de usarem manómetro, são instalados sensores de corda vibrante (Figura 9 C e D). Existem, ainda, umas células de carga de corda vibrante em desuso, com princípio idêntico ao das células elétricas, possuindo três ou mais sensores de corda vibrante, que registam a carga de forma separada, devendo-se depois obter a sua média.

Para a aquisição do valor de carga presente na célula hidráulica é necessário realizar uma leitura visual no manómetro de *Bourdon*. No caso das células elétricas e de corda vibrante, utilizando-se o cabo de leitura que se encontra acoplado à célula, é possível realizar a leitura de carga de forma

manual com recurso a uma unidade de leitura própria. Por outro lado, estas células podem estar associadas a um sistema de aquisição automática de dados, composto por *datalogger* e *gateway*.

Por último, referir que a exatidão da leitura de carga por parte destas células encontra-se diretamente relacionada com a sua correta instalação, pelo que, se a instalação não for adequada, podem registar-se variações significativas de leitura (Dunnicliff, 1988). Para a correta instalação é imprescindível seguir os passos, os intervalos de tempo e os valores de carga presentes nos respetivos procedimentos de instalação. As células de carga devem ser devidamente centradas na ancoragem, utilizando-se, em baixo e em cima, placas de distribuição de carga, evitando que as células dobrem ou cedam, devendo estas placas conseguir distribuir de forma homogénea a carga pela superfície da célula (Figura 9 C).



Figura 9 – (A) Célula de carga hidráulica com manómetro *Bourdon* instalada próxima de alvo topográfico; (B) Célula de carga elétrica com placa de distribuição de carga; (C) Instalação de célula de carga de corda vibrante; (D) Célula de carga de corda vibrante (fotografias do autor)

3.5.5. Piezómetros

Durante a realização de escavações em meio urbano, a presença de água é um dos principais problemas, pois modifica as tensões efetivas existentes no solo, podendo originar, p. ex., variações de impulsos atuantes em contenções ou deslizamentos em taludes. Para tal, os

piezômetros permitem a monitorização do nível freático (nível de água) presente no interior do terreno ou da pressão intersticial no terreno. Existem diversos tipos de piezômetros, sendo que, em escavações em meio urbano, os mais comuns são os de tubo aberto, de Casagrande, elétricos ou de corda vibrante (Eberhardt & Stead, 2011; Segalini et al. 2017).

Os piezômetros de tubo aberto (Figura 10 A) podem apresentar diferentes configurações. Uma destas é apresentarem o fundo do tubo aberto com o comprimento das calhas do piezómetro totalmente impermeável. Numa outra configuração, estes piezômetros têm o fundo do tubo tapado e apresentam uma extensão grande de calha crepinada para a afluência de água ao interior do tubo (Segalini et al. 2017). A utilização de piezômetros com calha crepinada é mais adequada para aquíferos livres e, habitualmente, impermeabiliza-se o trecho mais superficial, em cerca de três metros, para não ocorrer afluência de água de escorrência superficial. No caso de um terreno com possíveis diferentes níveis de água, é necessário definir as cotas das diferentes zonas crepinadas, sendo cada nível de água materializado por um tubo de acesso individual.

Os piezômetros de Casagrande consistem num filtro poroso instalado na ponta de um tubo (Figura 10 B). Neste tipo de piezômetros são instalados dois tubos, um para leitura, que apresenta o filtro poroso, e outro para respiração do sistema, possibilitando um equilíbrio mais rápido do nível de água. O filtro poroso instalado na ponta do tubo deve ser colocado na profundidade desejada, a área com o filtro deve ser envolta em material drenante, p. ex., areão calibrado, e o restante comprimento do piezómetro deve ser selado com bentonite (Dunnicliff, 1988; Segalini et al. 2017). Neste tipo de piezómetro existe também a hipótese de instalar, no mesmo furo, vários filtros porosos a diferentes profundidades, sendo, para tal, necessário selar com bentonite o comprimento entre cada filtro.

Por sua vez, os piezômetros elétricos ou de corda vibrante (Figura 10 C) têm as grandes vantagens de apresentar uma resposta muito rápida a qualquer alteração de pressão da água no terreno e uma precisão muito superior quando comparados com os anteriormente referidos. Estes piezômetros consistem em sensores instalados no interior de furos e, associado a estes, encontra-se um cabo de dados que comunica até à superfície (Segalini et al. 2017). Antes da instalação destes sensores, é recomendável a sua saturação em água para evitar a presença de bolhas de ar que influenciem as leituras. Após a colocação destes sensores na profundidade desejada, os mesmos devem ser envoltos em material filtrante como, p. ex., o areão calibrado. Cada sensor deve ficar individualizado pela colocação de bentonite acima do material filtrante (Eberhardt & Stead, 2011). Em caso de várias profundidades de admissão de pressão, cada sensor deve ser envolto em areão e individualizado de outro sensor pela colocação de uma camada de bentonite, garantindo-se que não existe passagem de água pela área de furação.

Para a instalação deste tipo de piezômetros é necessário realizar um furo no terreno, com o comprimento adequado e com diâmetro de furação compatível com o tipo e diâmetro de calha selecionada, sendo o mais habitual a instalação de calhas piezométricas de PVC de 2". No entanto, em caso de piezômetros elétricos ou de corda vibrante, também existe a hipótese de os sensores serem instalados diretamente no terreno, para maior precisão e rápida resposta na medição de pressão intersticial. Neste último caso os sensores são perdidos, enquanto se forem instalados no interior de calhas podem ser recuperados posteriormente.

Em suma, após a furação e instalação das calhas e/ou sensores, o espaço anelar entre estes e a parede de furação deve ser preenchido. Primeiro, a extensão de calha crepinada, a área dos filtros porosos, ou a área dos sensores elétricos ou de corda vibrante deve ser preenchida por material que permita a afluência de água, por exemplo, com areão calibrado. Após o segmento preenchido, deve ser colocado, pelo menos, um metro de bentonite, preenchendo o restante comprimento com material resultante da furação (Eberhardt & Stead, 2011; Segalini et al. 2017).

Relativamente à leitura dos piezômetros de tubo aberto (Figura 10 A) ou de Casagrande, é necessário utilizar uma sonda piezométrica de nível portátil com uma fita graduada em milímetros. Quando esta sonda contacta com a água, acende uma luz e emite um sinal sonoro (Dunnicliff, 1988; Eberhardt & Stead, 2011).

No caso dos sensores elétricos ou de corda vibrante, utilizando-se o cabo de leitura que se encontra acoplado aos sensores, é possível realizar a leitura de pressão intersticial de forma manual com recurso a uma unidade de leitura própria. Por outro lado, estes piezômetros podem estar associados a um sistema de aquisição automática de dados (Figura 10 D).



Figura 10 – (A) Piezómetro de tubo aberto com leitura manual através de sonda piezométrica; (B) Filtro poroso do piezómetro Casagrande; (C) Piezómetro de corda vibrante; (D) Instalação de piezómetros elétricos em sistema de aquisição automática de dados (fotografias do autor)

3.5.6. Fissurómetros

Os fissurómetros ou *crackmeters* são instrumentos que permitem monitorizar fissuras/fraturas superficiais em estruturas constituídas por variados materiais (Segalini et al. 2017), medindo a largura e o deslocamento das fissuras (Encardio, 2023c).

No âmbito de escavações em meio urbano, sobretudo em zonas históricas, o surgimento de fissuras é uma problemática constante. A ocorrência de fissuras é originada geralmente em resposta a tensões de compressão ou de tração a que os diferentes materiais são sujeitos. As fissuras surgem quando ocorre acumulação excessiva de tensões em zonas de fraqueza da estrutura e/ou dos materiais, sendo ultrapassada a capacidade de carga máxima (Bassett, 2012).

Segundo Segalini et al. (2017) os fissurómetros podem classificar-se em óticos, mecânicos e elétricos. Os fissurómetros óticos e mecânicos são de aquisição manual de dados, enquanto os fissurómetros elétricos podem ter leitura manual com dispositivo portátil ou automatizada. A tipologia elétrica pode ser constituída por potenciómetros ou por transdutores de corda vibrante.

As principais características destes fissurómetros são:

- Fissurómetro ótico – é constituído por dois elementos de plástico paralelos e interligados entre si. Estes elementos são colocados sobre a fratura de modo a permitirem a medição dos deslocamentos em duas direções perpendiculares (Segalini et al. 2017). Para além desta configuração, estes fissurómetros podem apresentar os dois elementos de plástico graduados perpendiculares entre si. Nestas duas configurações, à medida que a fissura aumenta ou fecha, uma placa move-se relativamente à outra, permitindo a correspondente leitura (Figura 11 A);
- Fissurómetro mecânico – podem ser uniaxiais ou triaxiais. Se forem uniaxiais são constituídos por uma barra de aço instalada ortogonalmente à direção da fratura, fixa de um lado da fratura e livre do outro lado. No caso de fissurómetro triaxial é constituído por uma secção quadrada e uma estrutura externa com três comparadores, onde é possível medir deformações, com recurso a defletómetro, ao longo dos três eixos ortogonais (*op. cit.*) (Figura 11 B);
- Fissurómetro elétrico – é constituído por um transdutor de corda vibrante e apresenta duas âncoras fixas de cada lado da fissura em monitorização (Figura 11 C). Estes fissurómetros também podem ser triaxiais se forem adicionados mais transdutores de corda vibrante (*op. cit.*). A aquisição de dados pode ser manual ou automática.

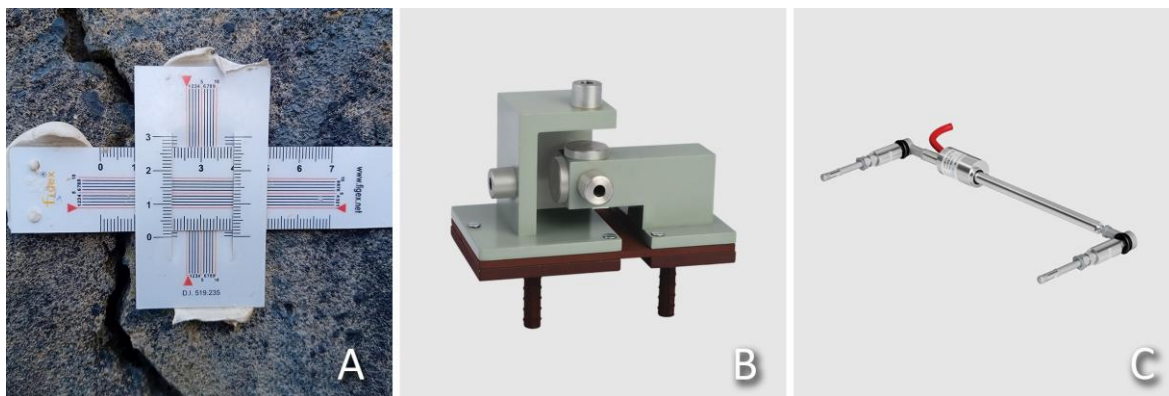


Figura 11 – (A) Instalação e leitura manual de fissurômetro ótico (fotografias do autor); (B) Fissurômetro mecânico uniaxial (Encardio, 2023a); (C) Fissurômetro elétrico com sensor de corda vibrante (Encardio, 2023a)

3.5.7. *Tiltmeters*

Os *tiltmeters* (ou clinômetros) são sensores utilizados para monitorizar a variação de inclinação de estruturas (como é o caso de fachadas de edifícios), de muros de contenção, de sistemas de escoramento, entre outros, que estão expostos a potenciais movimentos rotacionais impostos pela alteração da condição do terreno (Eberhardt & Stead, 2011; Segalini et al. 2017).

Em obras de escavação profunda, os *tiltmeters* são utilizados para monitorizar qualquer movimento ou inclinação que possa ocorrer. A inclinação de qualquer estrutura pode ser afetada, entre outros, por escavações, por influência externa no nível de água, ou por aumento ou imposição de cargas sobre determinadas estruturas (Dunnicliff, 1988).

A deteção atempada de uma inclinação excessiva pode ajudar a prevenir falhas estruturais e a garantir a segurança, permitindo a atuação em tempo oportuno.

Atualmente, existem no mercado diversos tipos de *tiltmeters*, destacando-se os seguintes:

- *Tiltmeter* digital – é constituído por sensores de tecnologia *MEMS*, podendo realizar medições tanto na horizontal como na vertical. A recolha dos dados é manual e estes dispositivos podem ser fixos ou portáteis (Encardio, 2023a; Geokon, 2025). Estes *tiltmeters* apresentam elevada exatidão e baixo custo, mas são sensíveis à temperatura (Segalini et al. 2017);
- *Tiltmeter* de corda vibrante – é instalado fixo na estrutura a monitorizar, permitindo medições verticais ou horizontais, relativamente a potenciais movimentos de rotação no centro de gravidade do equipamento. Estes *tiltmeters* apresentam, na parte superior, um pêndulo fixo que se encontra conectado ao sistema de corda vibrante, permitindo as

leituras de inclinação (Dunnicliff, 1988; Geokon, 2025) (Figura 12 A). Os dados podem ser registrados manualmente ou em sistema de aquisição automática;

- *Wireless tiltmeter* – são constituídos por acelerómetros de tecnologia *MEMS* e permitem a leitura triaxial (x, y e z), tornando-os atualmente um instrumento muito valioso na monitorização de inclinação de estruturas em tempo real. Estes *tiltmeters* apresentam elevada precisão e resolução de leituras, sendo os registos de dados obtidos automaticamente (Figura 12 B). Os dados podem ser descarregados via cabo diretamente do *tiltmeter* ou podem estar associados a um sistema completamente automático de recolha e transmissão de dados. Estes instrumentos apresentam uma estrutura externa estanque, podendo ser utilizados em ambientes desfavoráveis, e também apresentam um sensor de temperatura integrado na estrutura. Para além disto, estes *tiltmeters* triaxiais podem ser combinados com um sistema laser para monitorização de distância (World Sensing, 2025) (Figura 12 C).

Para a correta instalação dos *tiltmeters* é necessário ter em atenção se permitem leituras uniaxiais, biaxiais ou triaxiais, orientando os instrumentos de acordo com o eixo de medição pretendido. A sua instalação na estrutura a monitorizar é feita com recurso a placas de referência, podendo ser externas ou já estar acopladas ao *tiltmeter*. Estas placas são devidamente fixas nas estruturas, de modo vertical ou horizontal, permitindo que o *tiltmeter* registre a sua inclinação. A inclinação e variação de inclinação registada pelo instrumento será coincidente entre este e a estrutura.



Figura 12 – (A) *Tiltmeter* uniaxial de corda vibrante (Geokon, 2025); (B) *Wireless tiltmeter* triaxial; (C) *Wireless tiltmeter* triaxial associado a sistema laser para medição de distância (fotografias do autor)

Capítulo IV

Metodologias e métodos de instrumentação e monitorização selecionados

[página propositadamente em branco]

4. Metodologias e métodos de instrumentação e monitorização selecionados

4.1. Análise técnica e operacional dos equipamentos e instrumentos de medição selecionados

O presente subcapítulo focar-se-á nas vantagens e desvantagens da utilização dos equipamentos e instrumentos de medição selecionados, quer para aquisição manual, quer para aquisição automática de dados, analisando-os do ponto de vista técnico e operacional. Para cada método de instrumentação serão analisados três ou quatro equipamentos/instrumentos de medição.

Com base no anteriormente exposto, para o presente estudo, foram selecionados os seguintes métodos de instrumentação: alvos/prismas; inclinómetros verticais; células de carga; piezómetros; e *tiltmeters*. Face à reduzida expressão, quer para a aquisição manual quer automática, optou-se pela exclusão dos fissurómetros.

Na análise técnica serão comparadas as especificações dos equipamentos e instrumentos de medição selecionados, com especial destaque para a precisão, variação e tipo de tecnologia associada a cada sensor geotécnico.

Na análise operacional serão tidas em conta as exigências funcionais para a implementação de cada sistema, destacando-se a instalação dos dispositivos de observação, o modo de aquisição de dados e o respetivo tempo de leitura.

Ao longo do subcapítulo serão apresentadas várias tabelas de dados, sendo estes obtidos pela consulta de catálogos e de fichas técnicas dos principais fabricantes e fornecedores mundiais de instrumentação geotécnica. Os dados constantes nas tabelas de síntese comparativa das

principais características técnicas apresentam-se como valores de referência de mercado, podendo variar ligeiramente entre as diferentes marcas fornecedoras de instrumentação e entre os vários equipamentos/instrumentos de medição.

4.1.1. Alvos/Prismas

Para a análise técnica e operacional de monitorização com recurso a topografia, foi selecionado o equipamento de medição taquímetro, vulgarmente conhecido como estação total. Dentro das inúmeras hipóteses de estação total presentes no mercado, foram selecionadas para análise comparativa dois pares de equipamentos, sendo estes pertencentes às marcas de referência mundial *Leica Geosystems* e *Trimble Geospatial*.

A estação total permite a realização de leituras de deformação tridimensional (x, y e z), necessitando, para o efeito, de dispositivos de observação, sendo considerados para o presente estudo os alvos e os prismas topográficos. Atualmente, na generalidade das obras de escavação em meio urbano, a leitura destes dispositivos é realizada de modo presencial e de forma semiautomática porque são utilizados alvos refletivos, contudo a estação total também permite uma aquisição completamente automática de dados no caso de serem utilizados prismas e acoplado sistema de transmissão de dados.

Os alvos e os prismas podem ser lidos com recurso a estação total com precisão de 5", 3", 2", 1" ou 0,5", no entanto, presentemente, na generalidade de monitorização de escavações só são aceites as estações de 1" ou 0,5", sendo estas as estações consideradas durante o estudo.

Na Tabela 3 apresenta-se a comparação das principais características técnicas e operacionais entre as diferentes opções de estação total.

Tabela 3 – Síntese comparativa das principais características técnicas e operacionais entre as diferentes opções de estação total

Análise técnica e operacional de estação total		
Características	<i>Leica TS16 / Trimble S7</i>	<i>Leica TM60 / Trimble S9</i>
Precisão angular	1", 2", 3" ou 5"	0,5" ou 1"
Precisão de distância (<i>EDM</i>) Com prisma	1 mm + 1,5 ppm / 1 mm + 2 ppm	0,6 mm + 1 ppm / 1 mm + 2 ppm
Precisão de distância (<i>EDM</i>) Sem prisma	2 mm + 2 ppm	2 mm + 2 ppm
Alcance com prisma	0,9 m até 3 500 m / 0,2 m até 2 500 m	0,9 m até 3 500 m / 0,2 m até 2 500 m
Variação de temperatura (°C)	- 20 até + 50	- 20 até + 50
Modo de aquisição de dados	Presencial	Remota
Método de aquisição de dados	Semiautomática ou automática	Automática
Tempo de leitura	Minutos a horas	Instantânea a minutos

Analisando a Tabela 3 constata-se que os quatro modelos de estação total selecionados, em dois pares de equipamentos equivalentes, apresentam características técnicas relativamente idênticas, distinguindo-se sobretudo pela parte operacional.

Os equipamentos *Leica TS16* e *Trimble S7* apresentam uma precisão angular entre 1" e 5" com uma precisão de distância de 1 mm + 1,5/2 ppm, quando utilizados prismas. Estas estações totais necessitam de uma aquisição de dados presencial, em modo semiautomático ou automático, demorando a leitura dos dispositivos de observação alguns minutos até horas.

Na aquisição de dados semiautomática são usados alvos, enquanto na aquisição automática são usados prismas topográficos. A estação total possui um sistema que a permite rodar 360° e que possibilita a detecção automática dos alvos e prismas (desde que já conheça as suas coordenadas). Para a leitura das coordenadas dos dispositivos de observação (alvos e/ou prismas) é emitido um feixe *EDM* (*Electronic distance measurement*) de laser ou de infravermelhos.

Os alvos são dispositivos quadrados planos, de diferentes dimensões, com padrão de alto contraste, permitindo que a estação total os detete. No entanto, terá de ser o operador a apontar para o seu centro e a realizar a sua leitura, uma vez que não centram o feixe laser incidido sobre eles. Por sua vez, os prismas são dispositivos óticos em vidro, com um sistema de espelhos que permitem centrar o feixe laser incidido sobre eles e a reflexão para a estação total, possibilitando,

assim, não só que a estação os detete, mas também que encontre o seu centro, realizando uma leitura totalmente automática.

Para além da aquisição presencial de dados, existe a hipótese de uma aquisição, armazenamento e transmissão de dados completamente automática. Neste âmbito, destacam-se os modelos de estação total *Leica TM60* e *Trimble S9* que apresentam, face às anteriores, maior precisão angular (0,5" ou 1") e maior precisão de distância, sendo que nas leituras automáticas é obrigatório utilizar prismas topográficos. O tempo de leitura varia de pequenos instantes até alguns minutos, consoante o número de dispositivos de observação. Estas estações apresentam um *software* específico para leituras remotas e contínuas em curtos espaços de tempo, sendo necessária a instalação de um *datalogger* especializado para estação total e de um *gateway*, para se obter um sistema completamente automático de aquisição e transmissão de dados.

Para a análise económica versada nos capítulos seguintes e, para simplificação de efeitos comparativos entre aquisição manual e automática de dados, os dois pares de equipamentos foram uniformizados, considerando-se uma única opção de estação total para aquisição manual e automática de dados.

4.1.2. Inclínómetros verticais

Para o presente estudo foram selecionados três tipos de equipamentos/instrumentos para leituras inclinométricas, nomeadamente:

- Inclínómetros convencionais (sonda inclinométrica);
- Inclínómetros *in-place*;
- Inclínómetros *SAA (Shape Accel Array)*.

Nos inclínómetros convencionais e *in-place* foram consultados vários fabricantes de referência mundial, enquanto nos inclínómetros *Shape Accel Array* foi adotado como base o equipamento *SAAV* da marca *Measurand*.

Para a instalação e utilização dos três tipos de equipamentos/instrumentos de medição é necessário, previamente, a furação vertical do terreno com a instalação de calhas inclinométricas. No caso dos instrumentos *SAAV*, contudo, a instalação de calhas não é obrigatória, implicando, porém, a não recuperação do instrumento.

No âmbito da furação do terreno é necessário ter em conta alguns pontos, tais como:

- Mobilização de equipamento de furação;

- Mobilização de equipa de trabalho;
- Posicionamento(s) de equipamento de furação;
- Furação em rocha e/ou solo.

Após o necessário período de monitorização em determinada obra, os inclinómetros *in-place* ou SAAV podem ser reutilizados, instalando-se novamente em outros furos. Para tal, é necessária a sua correta remoção, manutenção, calibração e armazenamento, realçando-se que, para o sucesso desta operação, é de suma importância que a selagem do espaço anelar tenha sido realizada corretamente, permitindo a recuperação integral do instrumento de medição.

Os inclinómetros *in-place* são constituídos por vários segmentos acoplados, sendo possível a adição ou remoção de segmentos, de forma a corresponderem a diferentes profundidades de monitorização. Por sua vez, os inclinómetros SAAV são fornecidos de fábrica com o comprimento pretendido, pelo que a sua reutilização está dependente do seu comprimento original.

Nas Tabela 4 e Tabela 5 apresenta-se a comparação das principais características técnicas e operacionais, respetivamente, entre as diferentes opções de inclinómetros.

Tabela 4 – Síntese comparativa das principais características técnicas entre as diferentes opções de inclinómetros

Análise técnica			
Características	Convencionais	<i>In-place</i>	SAAV
Sensor geotécnico	<i>MEMS</i> , biaxial	<i>MEMS</i> , biaxial	<i>MEMS</i>
Precisão	± 2 mm/30 m	± 2 mm/30 m	± 0,5 mm/30 m
Variação	± 30° (vertical)	± 30° (vertical)	± 60° (vertical)
Resolução	0,005 mm/m	0,004 mm/m	0,012 mm/m
Variação de temperatura (°C)	- 30 até + 70	- 40 até + 65	- 35 até + 60
Espaçamento de leituras (Min.)	50 em 50 cm	50 em 50 cm	50 em 50 cm

Tabela 5 – Síntese comparativa das principais características operacionais entre as diferentes opções de inclinómetros

Análise operacional			
Características	Convencionais	<i>In-place</i>	SAAV
Diâmetro das calhas	54 ou 85 mm	70 ou 85 mm	27 a 85 mm
Material das calhas	ABS ou PVC	ABS ou PVC	PVC
Tempo de leitura	Minutos a horas	Instantânea	Instantânea
Aquisição de dados	Manual	Automática	Automática
Aquisição de dados em condições meteorológicas adversas	Não	Sim	Sim
Aquisição de dados em calhas com grande deformação	Não	Variável	Sim

Da análise da Tabela 4 constata-se que os três tipos de inclinómetros são constituídos por sensores geotécnicos com tecnologia *MEMS*, que a sua resolução e variação de temperatura são relativamente idênticas e que apresentam o mesmo espaçamento mínimo entre leituras. Relativamente à análise operacional (Tabela 5) surgem maiores diferenças entre estes tipos de inclinómetros.

Os inclinómetros convencionais distinguem-se dos inclinómetros *in-place* essencialmente porque um é lido com equipamento portátil e o outro tem os sensores sempre instalados no seu interior. Isto significa que o tempo de leitura é diferente e a qualidade dos dados também, porque no primeiro caso o sensor é móvel e no segundo os sensores estão sempre no mesmo local. Os inclinómetros convencionais, com leitura manual, apresentam um tempo de leitura entre minutos e horas, consoante o seu comprimento. Para além disso, para este tipo de inclinómetros, não é recomendável a sua leitura em condições atmosféricas adversas e em calhas muito deformadas, uma vez que o torpedo não se consegue adaptar à deformação e percorrer a totalidade da calha. Acresce ainda que, por muito cuidado que o operador tenha, pode haver sempre ligeiros desvios de posicionamento ao longo do comprimento.

Por sua vez, os inclinómetros *in-place* apresentam como principal vantagem face aos convencionais, a aquisição instantânea e automática de dados, sem influência de nenhum operador, sendo possível realizar leituras nas mais variadas condições meteorológicas e com frequência elevada. Estes inclinómetros são constituídos por vários segmentos rígidos, mas conseguem adaptar-se a elevada deformação; em casos extremos, pode, todavia, dar-se o caso de não se conseguir recuperar o equipamento

Convém referir ainda que os inclinómetros convencionais e *in-place* apresentam uma precisão e variação praticamente idênticas, e que podem ser utilizados em calhas inclinométricas de ABS ou PVC de diâmetro 54 ou 85 mm.

Relativamente ao inclinómetro do tipo *Shape Accel Array*, este é um instrumento de aquisição automática de dados que permite uma recolha rápida, contínua e fidedigna da variável a estudar – neste caso, deslocamentos horizontais em profundidade. Pode ser instalado em calhas inclinométricas já existentes, mesmo aquelas que já se encontram bastante deformadas para realizar uma leitura manual/convencional ou para instalar inclinómetros *in-place*, eliminando desta forma a necessidade de realizar novos furos. A utilização de inclinómetros SAAV permite a realização de leituras em qualquer condição meteorológica.

Devido ao seu diâmetro mais reduzido, o SAAV pode ser instalado em tubos de PVC de pequeno diâmetro, isto é, de 27 a 85 mm. Estas calhas, ao contrário das calhas inclinométricas tradicionais, não necessitam de ter chanfros para orientação do equipamento de leitura, uma vez que os sensores do tipo *Shape Array* não possuem rodas. A instalação em tubos de PVC de menor diâmetro confere uma vantagem económica face aos outros dois tipos de inclinómetros, quer no menor diâmetro de furação, quer no menor valor dos tubos em PVC.

Da análise das características técnicas do SAAV pode destacar-se que este instrumento de medição é composto por uma sequência de segmentos intercalados por juntas rotulares que possibilitam a adaptação às calhas e a movimentos em qualquer direção, isto é, sem eixo preferencial como acontece na opção convencional ou *in-place*. Estes inclinómetros apresentam três acelerómetros por segmento, calibrados de fábrica de forma a possibilitarem leituras tridimensionais, podendo ser instalados verticalmente, horizontalmente ou em circunferências para medição de convergências, sendo esta mais uma vantagem face aos outros inclinómetros.

Os inclinómetros do tipo SAAV apresentam principalmente duas vantagens técnicas face aos outros dois inclinómetros, nomeadamente a precisão e a variação. O SAAV apresenta uma maior precisão, sobretudo por se tratar de um instrumento menos suscetível a erros sistemáticos e mais ajustável às deformações existentes. Para além disso, a tecnologia associada permite uma maior variação nas suas medições, podendo alcançar $\pm 60^\circ$ face à vertical, advindo este facto da sua configuração tridimensional, conferindo-lhe mais uma versatilidade.

Por último, referir que os inclinómetros *in-place* e SAAV também permitem a recolha manual de dados diretamente no instrumento de medição, sem necessidade de *datalogger* e *gateway*. Contudo, esta opção não foi considerada para o presente estudo, uma vez que, como será abordado posteriormente, o valor de aquisição destes instrumentos é bastante significativo, não

sendo pelo valor dos *datalogger* e *gateway* que não seria escolhida a opção de aquisição instantânea e em curtos espaços de tempo da variável em estudo.

Para a análise económica versada nos capítulos seguintes foram avaliados individualmente os equipamentos/instrumentos acima considerados. Contudo, com base no exposto e, para simplificação de efeitos comparativos entre aquisição manual e automática de dados, no Capítulo VI foram selecionados, respetivamente, os inclinómetros convencionais e SAAV.

4.1.3. Células de carga

Para a análise comparativa das células de carga (CC) foram selecionados três tipos de instrumentos de medição, nomeadamente:

- Células de carga hidráulicas com manómetro de *Bourdon*;
- Células de carga elétricas;
- Células de carga de corda vibrante.

Nas células de carga hidráulicas com manómetro de *Bourdon* foi consultado o instrumento comercializado pela fabricante *Gestecno*, enquanto nas células de carga elétricas e de corda vibrante foram consultados vários fabricantes de referência mundial.

Antes da instalação das células, é necessária a prévia furação do terreno com a inclinação definida em projeto, seguida da instalação e selagem da ancoragem. As células de carga devem ser devidamente centradas na ancoragem, utilizando-se nos dois lados da célula placas de distribuição de carga.

Os três tipos de células selecionadas podem ser utilizados de forma temporária ou permanente para monitorizar estruturas também elas temporárias ou permanentes, durante a fase de escavação, de construção e de exploração.

Nas Tabela 6Tabela 4 e Tabela 7Tabela 5 apresenta-se a comparação das principais características técnicas e operacionais, respetivamente, entre as diferentes opções de células de carga.

Tabela 6 – Síntese comparativa das principais características técnicas entre as diferentes opções de células de carga

Análise técnica			
Características	CC hidráulicas c/ manómetro	CC elétricas	CC corda vibrante
Sensor geotécnico	Hidráulico	<i>Strain gages</i> elétricos	Corda vibrante
Capacidade de carga (KN)	250 até 2500	300 até 2500	250 até 2500
Capacidade máxima	120 %	150 %	150 %
Precisão	± 1,5 % fs (full scale)	± 0,25 % fs	± 0,5 % fs
Resolução	± 0,5 % fs	± 0,025 % fs	± 0,025 % fs
Variação de temperatura (°C)	- 35 até + 60	- 20 até + 80	- 20 até + 80

Tabela 7 – Síntese comparativa das principais características operacionais entre as diferentes opções de células de carga

Análise operacional			
Características	CC hidráulicas c/ manómetro	CC elétricas	CC corda vibrante
Tempo de leitura	Minutos	Minutos ou instantânea	Minutos ou instantânea
Aquisição de dados	Visual (manual)	Manual ou automática	Manual ou automática
Aquisição de dados em condições meteorológicas adversas	Variável	Variável	Variável

Da análise técnica das diferentes células de carga (Tabela 6) verifica-se que os três tipos de células apresentam tecnologia diferente na sua conceção, contudo, a sua abrangência de capacidade de carga é praticamente igual. As células de carga hidráulicas apresentam, face às células elétricas e de corda vibrante, menor precisão e resolução, conferindo-lhes uma clara desvantagem. Por sua vez, comparando as células elétricas e de corda vibrante, observa-se que, para além da diferença no tipo de sensor geotécnico, as suas principais características são praticamente idênticas, excetuando a precisão, que no caso das células elétricas é superior.

Relativamente à análise operacional (Tabela 7), constata-se que a aquisição de dados nas células hidráulicas com manómetro é realizada de modo visual, demorando a sua leitura poucos segundos até alguns minutos, dependendo da localização e acessos. Uma vez que estas células não necessitam de uma unidade de leitura específica, a aquisição de dados pode ser realizada praticamente em todas as condições meteorológicas em que se verifique segurança. A aquisição

de modo visual da carga presente em cada célula, associada também à menor precisão do manómetro, confere mais uma desvantagem face às células elétricas e de corda vibrante.

As células de carga elétricas e de corda vibrante podem estar associadas a sistemas de aquisição manual ou automática de dados. Na aquisição manual de dados é necessária a utilização de uma unidade de leitura específica para o tipo de tecnologia presente em cada célula, sendo que a aquisição de dados demora alguns segundos até breves minutos por instrumento. Por sua vez, quando associada a *datalogger* e *gateway*, a aquisição de dados é feita de forma instantânea e automática, sem necessidade de deslocação ao local. Por último, referir que na aquisição manual, em que é necessário utilizar unidade de leitura própria, em condições meteorológicas mais adversas pode não ser possível a aquisição de dados.

Para a análise económica presente nos capítulos seguintes, foram avaliados individualmente os instrumentos acima considerados. No entanto, com base no exposto e, uma vez que as elétricas e de corda vibrante são equivalentes, para simplificação de efeitos comparativos entre aquisição manual e automática de dados, no Capítulo VI foram selecionadas, respetivamente, as células hidráulicas com manómetro e as células elétricas.

4.1.4. Piezómetros

No que concerne ao estudo dos piezómetros foram selecionados três tipos de equipamentos/instrumentos, nomeadamente:

- Piezómetros de tubo aberto (sonda piezométrica);
- Piezómetros elétricos;
- Piezómetros de corda vibrante.

Os dados técnicos e operacionais apresentados nas seguintes tabelas foram obtidos pela consulta de catálogos e fichas técnicas de vários fabricantes de referência mundial.

Tal como para os inclinómetros, para a instalação e utilização dos piezómetros é necessária, previamente, a furação vertical do terreno, com instalação ou não de calhas piezométricas. No âmbito da furação do terreno devem considerar-se: a mobilização de equipamento de furação; a mobilização de equipa de trabalho; o(s) posicionamento(s) de equipamento de furação; e a furação em rocha e/ou solo.

Terminado o período de monitorização da obra, quando instalados no interior de calhas piezométricas, os piezómetros elétricos ou de corda vibrante poderão ser reutilizados, sendo

viável a sua instalação noutros furos. Para tal, é necessária a sua correta remoção, manutenção, calibração e armazenamento. Para que esta operação seja bem-sucedida, é de suma importância que a selagem do espaço anelar tenha sido realizada corretamente, permitindo a recuperação integral do instrumento de medição.

Para a reinstalação em novos furos, é necessário ter em atenção a profundidade de monitorização pretendida, uma vez que pode haver a necessidade de acoplar mais metragem de cabo de dados ao cabo associado ao instrumento, perfazendo a metragem necessária para o novo caso.

Nas Tabela 8 e Tabela 9 apresenta-se a comparação das principais características técnicas e operacionais, respetivamente, entre as diferentes opções de piezómetros.

Tabela 8 – Síntese comparativa das principais características técnicas entre as diferentes opções de piezómetros

Análise técnica			
Características	Tubo aberto Sonda piezométrica	Pz elétricos	Pz corda vibrante
Sensor geotécnico	Elétrico	<i>MEMS</i>	Corda vibrante
Objetivo de monitorização	Nível freático	Pressão intersticial	Pressão intersticial
Variação	-	0,2 até 5 MPa	0,2 até 10 MPa
Variação máxima	-	130 %	150 %
Precisão	± 3 %	± 0,25 % fs	± 0,25 % fs
Resolução	1 mm	0,025 % fs	0,025 % fs
Variação de temperatura (°C)	- 55 até + 80	- 20 até + 80	- 20 até + 80

Tabela 9 – Síntese comparativa das principais características operacionais entre as diferentes opções de piezómetros

Análise operacional			
Características	Tubo aberto Sonda piezométrica	Pz elétricos	Pz corda vibrante
Instalação de calhas	Obrigatório	Opcional	Opcional
Material e diâmetro das calhas	PVC de 50 mm (2")	PVC de 50 mm (2")	PVC de 50 mm (2")
Tempo de leitura	Minutos	Minutos ou instantânea	Minutos ou instantânea
Aquisição de dados	Manual	Manual ou automática	Manual ou automática
Aquisição de dados em condições meteorológicas adversas	Variável	Variável	Variável

Analisando a Tabela 8 e a Tabela 9, para o caso de piezômetro de tubo aberto lido com sonda piezométrica, verifica-se que o seu objetivo é identificar o nível freático, sendo este obtido com utilização de nível portátil com fita graduada em milímetros. Para este tipo de piezômetro é obrigatória a instalação de calhas e a aquisição manual de dados, podendo esta ser realizada praticamente em todas as condições em que se verifique segurança.

Relativamente aos piezômetros elétricos e de corda vibrante, com objetivo de monitorização da pressão intersticial do terreno, constata-se que as suas características técnicas são praticamente idênticas, excetuando a variação de leitura, uma vez que a tecnologia de corda vibrante permite um alcance de leitura maior.

Para a aquisição de dados destes piezômetros pode ser utilizado o cabo de leitura que se encontra acoplado aos sensores, realizando a leitura de pressão intersticial de forma manual com recurso a uma unidade de leitura própria. Por outro lado, estes piezômetros podem estar associados a um sistema de aquisição automática de dados, composto por *datalogger* e *gateway*, com leituras instantâneas.

Por último, referir que os piezômetros elétricos e de corda vibrante permitem a direta instalação no terreno, para maior precisão e rápida resposta na medição de pressão intersticial. Neste caso os sensores são perdidos, enquanto se forem instalados no interior de calhas podem ser recuperados posteriormente.

Na análise de custos versada nos capítulos seguintes foram avaliados individualmente os equipamentos/instrumentos acima considerados. Contudo, com base no exposto e como os piezômetros elétricos são semelhantes aos de corda vibrante, para simplificação de efeitos comparativos entre aquisição manual e automática de dados, no Capítulo VI foram selecionados, respetivamente, os piezômetros de tubo aberto e de corda vibrante.

4.1.5. *Tiltmeters*

Relativamente aos *tiltmeters* foram selecionados três tipos de equipamentos/instrumentos para leituras de inclinação e rotação, nomeadamente:

- *Tiltmeter* digital;
- *Tiltmeter* de corda vibrante;
- *Wireless tiltmeter*.

Para a análise técnica e operacional dos diferentes *tiltmeters* foram consultados vários fabricantes de referência mundial, sendo que, no caso de uma configuração específica do *wireless tiltmeter*, foi adotado como referência o instrumento de medição Laser Tilt90 do fabricante *Worldsensing*.

Os três tipos de *tiltmeters* selecionados podem ser instalados no decurso das escavações ou podem ser instalados em fases mais avançadas da empreitada. Para além da área de intervenção, podem ser instalados em estruturas vizinhas, por exemplo fachadas de edifícios, com orientação e à cota pretendida. Quando instalados em estruturas vizinhas ou em fases mais avançadas da obra pode haver a necessidade de utilização de plataforma elevatória ou de bailéu de grua.

Nas Tabela 10 e na Tabela 11 apresenta-se a comparação das principais características técnicas e operacionais, respetivamente, entre as diferentes opções de *tiltmeters*.

Tabela 10 – Síntese comparativa das principais características técnicas entre as diferentes opções de *tiltmeters*

Análise técnica			
Características	<i>Tiltmeter</i> digital	<i>Tiltmeter</i> corda vibrante	<i>Wireless tiltmeter</i>
Sensor geotécnico	<i>MEMS</i> Uniaxial ou biaxial	Corda vibrante (VW) Uniaxial ou biaxial	<i>MEMS</i> Triaxial
Direção de medição	Vertical ou horizontal	Vertical ou horizontal	X, Y e Z
Precisão	$\pm 0,1 \%$ fs	$\pm 0,1 \%$ fs	$\pm 0,0075^\circ$ ($\pm 0,13$ mm/m)
Variação	$\pm 15^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 90^\circ$
Resolução	$\pm 0,05$ mm/m	$\pm 0,05$ mm/m	$\pm 0,00025^\circ$ ($\pm 0,004$ mm/m)
Variação de temperatura (°C)	- 20 até + 80	- 20 até + 80	- 40 até + 80

Tabela 11 – Síntese comparativa das principais características operacionais entre as diferentes opções de *tiltmeters*

Análise operacional			
Características	<i>Tiltmeter</i> digital	<i>Tiltmeter</i> corda vibrante	<i>Wireless tiltmeter</i>
Bases orientação externas	Não	Não	Sim
Tempo de leitura	Minutos ou instantânea	Minutos ou instantânea	Instantânea
Aquisição de dados	Manual ou automática	Manual ou automática	Automática
Aquisição de dados em condições meteorológicas adversas	Variável	Variável	Sim
Possibilidade de acoplação de dispositivos de observação	Não	Não	Sim

Analisando as Tabela 10 e Tabela 11 constata-se que os *tiltmeters* digitais e de corda vibrante são praticamente idênticos, distinguindo-se sobretudo pela tecnologia utilizada nos sensores geotécnicos, respetivamente *MEMS* e corda vibrante (*VW*). Estes *tiltmeters* podem ser colocados na vertical ou na horizontal, realizando leituras uniaxiais ou, quando utilizados em par, realizando leituras biaxiais.

Os *tiltmeters* digitais e de corda vibrante não necessitam da colocação externa de bases de orientação (ou placas de referência), sendo a sua instalação realizada com a estrutura metálica acoplada a estes instrumentos.

Relativamente à aquisição de dados, estes dois tipos de *tiltmeters* permitem a aquisição manual com recurso a uma unidade de leitura apropriada ao sensor geotécnico, demorando a leitura e aquisição dos dados breves minutos por equipamento. Por outro lado, estes *tiltmeters* podem ser instalados em sistema de aquisição e transmissão automática de dados, para tal é necessário a instalação e associação de um *datalogger* e *gateway*. Dependendo do modo de aquisição de dados, em condições meteorológicas adversas podem ou não estar reunidas as condições necessárias, sendo que em sistemas automáticos esta questão não se coloca.

Por sua vez, o *wireless tiltmeter* apresenta várias vantagens, quer técnicas quer operacionais, face aos *tiltmeters* digitais e de corda vibrante. Estes *tiltmeters* são instrumentos de medição 2 em 1, isto é, para além da aquisição dos dados também apresentam a capacidade de transmissão automática diretamente para o *gateway*; para tal têm incorporado um sistema de *datalogger*.

O *wireless tiltmeter* funciona como um sistema de aquisição e transmissão de dados completamente automático, com leituras instantâneas em curtos espaços de tempo. Estes *tiltmeters* apresentam uma estrutura externa estanque, podendo ser utilizados em ambientes desfavoráveis. Para além disso, também apresentam na sua estrutura um sensor de temperatura.

Da análise da Tabela 10 observa-se que o *wireless tiltmeter* é composto por acelerómetros *MEMS* com capacidade de leitura triaxial (X, Y e Z) e com variação de campo de leitura de $\pm 90^\circ$. Para além destas vantagens, apresenta uma precisão e resolução muito superiores aos *tiltmeters* digitais e de corda vibrante.

Na análise operacional (Tabela 11), pode destacar-se a necessidade de utilização de bases de orientação externa para a instalação do *wireless tiltmeter*. Estas bases podem ser colocadas nas estruturas de modo horizontal ou vertical, possibilitando diversas orientações de instalação dos instrumentos. Além desta vantagem, as bases de orientação permitem acoplar alguns dispositivos de observação, como os prismas topográficos, promovendo, assim, a redundância de leituras.

Estes *tiltmeters* triaxiais podem ainda ser combinados com um sistema laser para monitorização de distância, nomeadamente no instrumento de medição Laser Tilt90 da *Worldsensig*. Este instrumento, além do sensor de inclinação e do *datalogger* (2 em 1), apresenta incorporado um medidor laser. O sistema de laser é composto pelo sensor *Visible* laser 655 N-m com precisão de ± 1 mm, resolução de 0,1 mm, e alcance da medição em condições favoráveis de 0,05 a 150 m. Em síntese, este tipo de *wireless tiltmeter* permite a medição de inclinação e rotação, a medição de distância face a um ponto fixo e a transmissão direta de dados para o *gateway*, não sendo necessária a instalação de um *datalogger* externo ao instrumento, conferindo-lhes vantagens claras quando comparados com outros tipos de *tiltmeters*.

Para a análise de custos apresentada nos capítulos seguintes, foram avaliados individualmente os equipamentos/instrumentos acima considerados. Contudo, com base no exposto e, para simplificação de efeitos comparativos entre aquisição manual e automática de dados, no Capítulo VI foram selecionados, respetivamente, os *tiltmeters* digitais e os *wireless tiltmeter*.

4.2. Análise das metodologias de monitorização selecionadas e dos seus componentes

No presente subcapítulo pretende-se realizar uma análise síntese das principais vantagens e desvantagens da utilização das diferentes metodologias de monitorização, analisando-as do ponto de vista técnico e operacional. Como referido anteriormente, para o corrente estudo, foram selecionados equipamentos e instrumentos que permitem aquisição manual e/ou automática.

Na metodologia de aquisição manual de dados é necessário que um ou mais técnicos especializados se desloquem a determinada obra e, dentro desta, a cada local com equipamentos ou instrumentos de medição. Para a recolha dos dados de monitorização são utilizados equipamentos portáteis, tais como: sonda inclinométrica; sonda piezométrica; estação total; e unidades de leitura próprias para as diferentes tecnologias de sensores geotécnicos, nomeadamente digitais, de corda vibrante e elétricos.

A aquisição manual tem como principal vantagem o custo inicial reduzido e a sua simplicidade de implementação, contudo apresenta algumas desvantagens, como a necessidade de deslocação ao local, a menor frequência de leituras e potenciais erros associados às leituras. Todos os equipamentos/instrumentos selecionados permitem aquisição manual de dados, no entanto face ao preço de aquisição de alguns destes instrumentos, por exemplo os sensores de inclinómetro *in-place* ou SAAV, não fará sentido considerar a sua instalação com aquisição manual de dados.

No caso da aquisição automática de dados podem ser consideradas três opções, nomeadamente com aquisição local no *datalogger*, com aquisição remota no *gateway*, ou com aquisição e transmissão de dados para plataforma *on-line*.

Dos equipamentos/instrumentos selecionados, apenas os inclinómetros convencionais, as células de carga hidráulicas com manómetro e os piezómetros de tubo aberto não podem ser considerados para aquisição automática de dados. A estação total, quando associada a *datalogger*, *modem* e *software* específico, permite a recolha remota de dados.

A aquisição automática de dados no local necessita que cada instrumento de medição esteja conectado a um *datalogger*, apresentando como principal vantagem face à leitura manual, a possibilidade de recolha de dados contínuos, obtidos em curtos espaços de tempo, e sem interferência humana. No entanto, apresenta também várias desvantagens, como: a necessária deslocação até cada instrumento de medição, recolhendo os seus dados através de ligação direta ao *datalogger*; a possibilidade de perda de informação se a recolha for muito espaçada; e a impossibilidade de receção de avisos associados aos níveis de alerta e alarme.

Relativamente à aquisição remota, para além do(s) *datalogger(s)*, poderá ser necessária a instalação de um *gateway*. Após a obtenção dos dados, estes são transmitidos para o *datalogger* (nódulo de dados) através do cabo de dados que se encontra associado a cada instrumento. O *datalogger* funcionará como um recetor e armazenador de dados, transmitindo-os posteriormente diretamente para a internet ou ao *gateway* (módulo de comunicação) via rádio frequência, 4G, satélite, *WiFi*, etc., sendo imprescindível que o *gateway* consiga comunicar com o *datalogger*. O *gateway* tem a função de gerir o sistema, comunicando com os diferentes *dataloggers* para que seja feita a leitura e recolha de dados.

Na aquisição automática remota, os dados da monitorização podem ser obtidos através de ligação direta ao *gateway* ou, em alternativa e com mais vantagens, o *gateway* pode comunicar os dados para uma plataforma *on-line*, onde estes podem ser consultados e descarregados em formato numérico e/ou em formato gráfico para alguns tipos de dados.

Face à aquisição automática local, a aquisição remota apresenta um custo superior de instalação e operação e está dependente da cobertura de comunicação entre os *dataloggers* e o *gateway*. Por outro lado, quando associada a plataforma, apresenta como principais vantagens o acesso remoto e em tempo real aos dados obtidos.

Por último, surge a aquisição automática de dados associada a plataforma *on-line* inteligente. Neste caso, o *gateway* transmite automaticamente os dados recolhidos para uma plataforma inteligente na nuvem.

Esta plataforma desenvolve uma análise avançada de dados e uma visualização interativa e objetiva dos dados de monitorização. A plataforma *on-line*, para além da qualidade de interpretação e visualização de dados, permite uma fácil integração dos dados com outros sistemas de análise, p. ex., sistemas de gestão de risco. Como desvantagem face à aquisição de dados diretamente no *gateway*, surge o custo mensal associado à plataforma.

Como demonstrado, é possível a recolha de dados automáticos através do *datalogger* ou do *gateway*. Contudo, como será abordado nos seguintes capítulos, face ao custo de aquisição e de instalação de alguns dos instrumentos selecionados, não se torna exequível a sua utilização sem a possibilidade de análise e interpretação de dados com recurso a plataforma *on-line* inteligente. Assim, face ao exposto e, tendo em conta o objetivo de comparação entre aquisição manual e automática de dados, para a análise económica versada nos seguintes capítulos será considerada a metodologia de aquisição manual de dados e a metodologia com recolha e transmissão de dados automáticos para plataforma *on-line* inteligente.

Para uma correta aquisição automática de dados é necessário escolher um *datalogger* compatível com o tipo de tecnologia presente no equipamento/instrumento de medição. Atualmente, existem várias hipóteses, destacando-se os *analog node* (*datalogger* analógico), os *vibrating wire (vw) node* (*datalogger* de corda vibrante) e os *digital node* (*datalogger* digital), sendo que estas três opções podem apresentar um único canal de ligação (*single channel*) ou vários canais de ligação (*multi channel*).

Os *dataloggers* com vários canais podem apresentar de duas até mais de dezasseis entradas de ligação, porém para a análise de custos foram considerados os de quatro ou cinco ligações.

Associando os diferentes *dataloggers* com os equipamentos/instrumentos de medição selecionados para estudo, surge:

- *Datalogger* analógico (*single* ou *multi channel*) – célula de carga e piezómetro elétrico (Figura 13 A);
- *Datalogger* digital (*single* ou *multi channel*) – inclinómetro *in-place* e SAAV e *tiltmeter* digital (Figura 13 B).
- *Datalogger* de corda vibrante (*single* ou *multi channel*) – *tiltmeter*, célula de carga e piezómetro de corda vibrante (Figura 13 C);

Importa relembrar que os *wireless tiltmeter* são instrumentos 2 em 1, incorporando no instrumento um sistema de *datalogger*.

No que respeita à topografia, nomeadamente à estação total, existem nas várias marcas de referência do setor opções de *dataloggers* específicos para cada modelo ou conjunto de modelos de estação total, considerando-se para o presente estudo a utilização de um *datalogger* genérico compatível com estação total (taquíómetro).

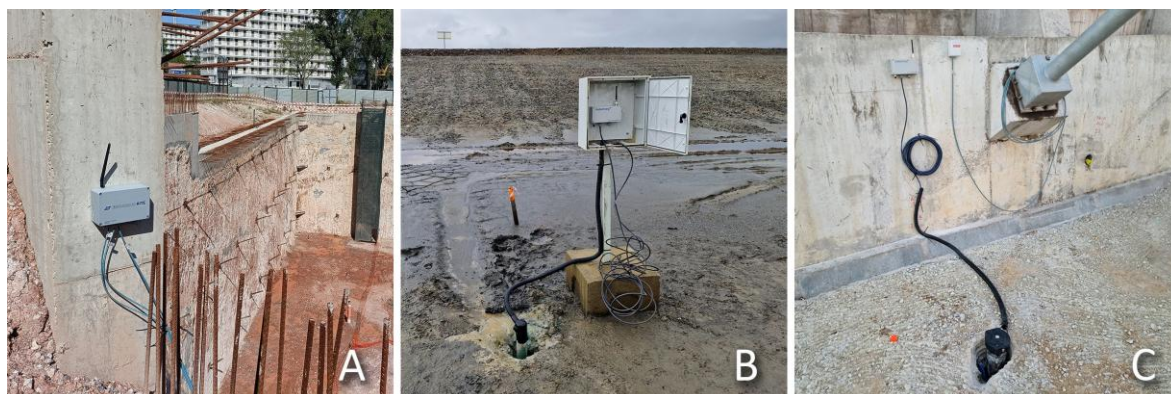


Figura 13 – (A) *Datalogger* analógico associado a células de carga elétrica; (B) *Datalogger* digital ligado a inclinómetro SAAV; (C) *Datalogger* de corda vibrante conectado a célula de carga e, à esquerda, *Datalogger* digital ligado a inclinómetro SAAV (fotografias do autor)

Relativamente ao *gateway*, existem diversas opções no mercado, mas todas elas com características relativamente idênticas. Importa mencionar que este poderá ficar ligado à corrente elétrica ou, em caso de impossibilidade, ser associado a um painel solar (Figura 14 A e B). Para a análise de custos serão consideradas estas duas opções e será considerado um *gateway* genérico.

Por último, no subsequente estudo económico será englobada, de forma geral, uma plataforma *on-line* inteligente de dados, tendo estas plataformas a particularidade do seu custo não estar associado a uma quantidade, mas sim a um valor mensal por obra.

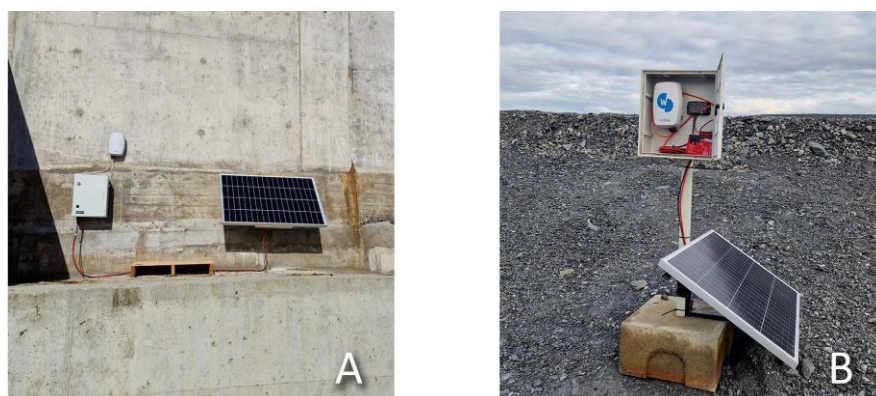


Figura 14 – (A) e (B) *Gateway* associado a *painel* solar (fotografias do autor)

4.3. Análise de complementaridade e/ou concorrência

Após a análise da seleção dos equipamentos e instrumentos de medição, bem como das metodologias de monitorização, importa agora desenvolver uma análise síntese de complementaridade e/ou concorrência entre as diferentes opções selecionadas para estudo.

Como já abordado, associando a grandeza a medir (problema geotécnico) com os métodos de instrumentação selecionados, obtemos a monitorização de:

- Alvos e prismas – deformações superficiais (horizontais e verticais);
- Inclínómetros verticais – deformações horizontais;
- Células de carga – tensão nas ancoragens;
- Piezómetros – nível freático e/ou pressão intersticial do terreno;
- *Tiltmeters* – inclinação e rotação.

Analisando o exposto, verifica-se que nenhuma grandeza a medir é diretamente sobreposta por diferentes métodos de instrumentação, concluindo-se, assim, que nenhum dos métodos selecionados é concorrente de outro. Deste modo, os métodos de instrumentação selecionados podem ser aplicados individualmente ou em conjunto.

No que respeita aos diferentes equipamentos/instrumentos de cada método de instrumentação, a sua seleção e instalação deverá ter em conta as suas especificidades, bem como o objetivo da monitorização e a precisão pretendida. Regra geral, por cada método de instrumentação, só se utiliza um tipo de equipamento/instrumento (com uma ou várias unidades), contudo, em casos particulares poderá ser necessária a utilização de diferentes instrumentos para monitorização da mesma grandeza a medir. Neste caso, é particularmente necessário ter em atenção as características técnicas de cada instrumento, comparando os diferentes valores obtidos com a precisão e variação do instrumento em causa. Como exemplo, pode destacar-se a aplicação na mesma obra de células hidráulicas com manómetro e de células elétricas ou de corda vibrante.

Dentro dos métodos de instrumentação, os *tiltmeters* são utilizados para medição de inclinação e rotação, não obstante, através dos valores obtidos em ângulos é possível calcular a respetiva deformação em milímetros. Desta forma, os inclínómetros verticais, a topografia (alvos e prismas) e os *tiltmeters* permitem a monitorização de deformações horizontais.

No caso dos inclínómetros, a monitorização é realizada ao longo de determinado comprimento, em intervalos de distância geralmente de 50 em 50 cm. Por sua vez, os alvos/prismas (estação

total) e os *tiltmeters* realizam leituras de monitorização pontuais, no local da sua instalação. Estes três métodos de instrumentação permitem uma complementaridade e redundância de leituras.

Relativamente aos piezómetros e às células de carga, a grandeza a medir por estes métodos não apresenta complementaridade ou concorrência nos outros métodos seleccionados, no entanto, se instalados em conjunto, permitem uma análise global e integrada de todas as variáveis.

Os métodos seleccionados, quando aplicados em conjunto, em cenário de complementaridade de informação de monitorização, permitem uma redundância de leituras, com confirmação e validação de eventuais deformações. Porém, para que este cenário seja verificado, é necessário que a sua instalação seja realizada relativamente próxima.

Utilizando como exemplo um alçado genérico de uma escavação, mais concretamente o meio do alçado, é possível a aplicação complementar de inclinómetros verticais, de alvos e/ou prismas, de *tiltmeters*, de células de carga e de piezómetros. Desta forma, no local da estrutura onde é expectável que haja maior deformação, é possível a obtenção completa e integrada de todas as deformações e forças atuantes na própria estrutura. Estes alinhamentos são habitualmente designados de perfis ou secções de instrumentação. Neste caso, independente do modo de aquisição de dados, os inclinómetros verticais e os piezómetros seriam instalados próximos um do outro, na parte do alçado não sujeita a escavação. Por sua vez, os alvos/prismas e os *tiltmeters* seriam instalados em alguns pontos do muro/parede de contenção, enquanto as células seriam instaladas na cabeça das ancoragens.

Relativamente à área envolvente, também é possível a complementaridade e redundância de leituras nas estruturas vizinhas, neste caso, com a aplicação na mesma área ou até no mesmo local de alvos/prismas e de *tiltmeters*. Para a monitorização, quer da estrutura em construção, quer das estruturas envolventes, é possível a aquisição de dados em modo completamente manual ou de modo integralmente automático. Para além destes modos, existe a possibilidade de complementar a monitorização manual com a monitorização automática e, vice-versa.

No cenário de leituras semiautomáticas, isto é, com aquisição manual e com aquisição automática de dados, é geralmente implementada a aquisição manual nos métodos mais dispendiosos em leituras automáticas, sendo estes complementados com a obtenção de dados automáticos através de outros métodos de instrumentação economicamente menos dispendiosos. Nos seguintes capítulos da análise económica esta e, outras opções, serão analisadas e contextualizadas com mais pormenor.

Como exemplo, associando os equipamentos/instrumentos seleccionados ao cenário de leituras semiautomáticas, destaca-se a complementaridade de aquisição de dados através da topografia

(x, y e z) e dos *wireless tiltmeters* (x, y e z). Os *wireless tiltmeters* de aquisição automática de dados, com monitorização em curtos espaços de tempo, podem ser complementados, com verificação e validação das deformações registadas, através de periódicas leituras manuais com estação total.

[página propositadamente em branco]

Capítulo V

Metodologia de análise técnico-económica de planos de instrumentação

[página propositadamente em branco]

5. Metodologia de análise técnico-económica de planos de instrumentação

5.1. Generalidades

Concluída a análise técnica e operacional das metodologias e dos métodos de instrumentação e monitorização selecionados para o presente estudo, importa agora realizar a sua análise técnico-económica.

Para tal, foi concebida e desenvolvida uma metodologia de estudo que assenta em duas vertentes de análise. Numa das vertentes surge a abordagem técnica, com a realização de análise de custo-benefício, enquanto a outra vertente da metodologia diz respeito a uma análise económica. A integração total das duas vertentes da metodologia permite a realização de uma análise técnico-económica completa e crítica.

Esta metodologia foi desenvolvida com o intuito de ser aplicada em projetos de obras de escavação a céu aberto em meio urbano, realizando-se uma análise técnico-económica para os métodos selecionados, nomeadamente: alvos/prismas; inclinómetros verticais; células de carga; piezómetros; e *tiltmeters*.

Para a análise técnica foram considerados os principais fatores de risco associados a escavações a céu aberto em meio urbano, criando-se uma matriz de risco. Esta matriz expõem as ponderações a considerar para cada fator de risco, calculando-se o cenário de risco de determinada obra através do somatório das respetivas ponderações.

A matriz de risco tem como objetivo a avaliação da compensação a atribuir à instrumentação automática face à opção manual. Da aplicação da matriz resulta um fator de ponderação de risco, associando-se cada fator a uma quantificação do benefício da monitorização automática.

Relativamente à análise económica global, foi concebida uma ferramenta de cálculo que permite realizar várias simulações de custo por método de instrumentação, bem como por plano de instrumentação. Em cenário de obra, a ferramenta permite a análise simultânea entre dois a cinco métodos de instrumentação, sempre na perspetiva de aquisição manual *versus* aquisição automática de dados.

Apesar do propósito original da ferramenta, esta pode ser aplicada à definição de planos de instrumentação de outros tipos de obra de engenharia, desde que envolvam os métodos selecionados para este estudo.

Para o desenvolvimento da ferramenta de análise económica optou-se pela utilização do programa *Microsoft Office Excel*.

Atendendo que um dos objetivos do presente estudo é o contributo para a modernização e otimização dos atuais planos de instrumentação, optou-se pelo *Excel* por ser um programa amplamente disponível, de fácil utilização e interpretação e que para a generalidade dos técnicos da área é uma ferramenta de trabalho usada no dia a dia, não constituindo uma nova aprendizagem.

Para além disso, o *Excel* permite uma fácil integração de dados durante a fase de desenvolvimento da ferramenta, mas também, em perspetivas futuras de utilização, com a adição de novos dados.

O *Excel* possibilita ainda uma grande flexibilidade e personalização para cada caso específico, com uma rápida e fácil criação de gráficos e tabelas de dados para visualização e análise das variáveis em estudo, destacando-se a possibilidade de atualização dos valores aqui utilizados.

Ao longo do presente Capítulo serão expostas e explicitadas as duas vertentes da metodologia de estudo, iniciando-se pela vertente técnica (subcapítulos 5.2 a 5.4) e finalizando na ferramenta de cálculo para a análise económica.

5.2. Análise de benefício à monitorização manual e automática

Ao longo do presente estudo têm sido apresentadas as vantagens e desvantagens de cada um dos sistemas de monitorização e dos seus constituintes. Pelo exposto, torna-se evidente que, se nos basearmos exclusivamente em critérios técnicos e operacionais, sem preocupações financeiras, a opção recai claramente pela monitorização automática.

A monitorização automática apresenta uma supremacia técnica evidente, destacando-se: a elevada precisão dos equipamentos/instrumentos; a ausência de erro de operador; a maior frequência de leituras; a possibilidade de um acompanhamento permanente em tempo real; e a receção de alertas automáticos.

Por outro lado, considerando a opção financeira, torna-se evidente que a grande mais-valia da monitorização manual é o seu reduzido custo inicial, sendo esta problemática abordada pormenorizadamente no próximo capítulo. Verificar-se-á, com base em várias simulações, que para poucas campanhas de leitura ou frequências de leitura muito baixas a monitorização manual apresenta um valor muito mais reduzido quando comparado com a monitorização automática. Para além disso, a monitorização manual permite a diluição dos seus custos ao longo do tempo de monitorização, enquanto na automática é necessário um investimento inicial muito relevante.

Desta forma, é possível afirmar que o principal benefício da monitorização manual se resume a justificativas económicas, ao passo que a monitorização automática apresenta o seu grande benefício associado à vertente técnica e operacional.

Recorrendo a um mero exercício teórico, onde os dois sistemas de monitorização apresentam um custo igual, a escolha entre estes recairia pela monitorização automática. O mesmo aconteceria se a diferença de preço fosse pequena. Em face disto, impõe-se a seguinte questão: A partir de que diferença de valor o sistema automático passa a fazer sentido face à monitorização manual?

Perante o cenário apresentado e, para além da questão colocada, torna-se crucial definir quanto é a mais-valia de um sistema automático relativamente ao sistema manual.

Pelas suas vantagens, a mais-valia, isto é, o benefício do sistema automático será tanto maior quanto maior for o risco presente em obra. Em situações de baixo risco, admite-se que é indiferente a utilização de sistema automático ou manual, podendo a seleção ser baseada na vertente financeira. Contudo, perante situações de risco elevado, a monitorização automática permite uma deteção de risco com muita brevidade (a frequência de leituras é muito superior) e com grande confiança nos dados obtidos (a precisão e resolução dos equipamentos é superior).

Torna-se, assim, evidente, que a determinação da mais-valia técnica de um sistema automático depende do grau de risco de cada projeto.

5.3. Fatores de risco associados a escavações a céu aberto em meio urbano

No âmbito de obras de escavação a céu aberto em meio urbano podem enumerar-se vários fatores de risco, destacando-se:

- O cenário geotécnico ocorrente;
- O tipo de estruturas de contenção;
- O projeto a implementar, sobretudo os pisos enterrados;
- As estruturas e infraestruturas envolventes;
- As vias de comunicação envolventes.

Relativamente ao primeiro ponto, é fundamental a determinação do risco geotécnico decorrente do conhecimento disponível, ou seja, do grau de conhecimento e de confiabilidade do cenário geotécnico. Este cenário pode ser expresso pelo enquadramento do estudo geológico-geotécnico, pela quantidade e qualidade da prospeção realizada, pelo nível de heterogeneidade do terreno ocorrente e pela presença de níveis freáticos que possam influenciar a obra.

Para a execução das estruturas de contenção também é importante a realização de uma análise de risco inerente às opções adotadas em projeto. Assim, a título de exemplo, considera-se que uma parede moldada com reforço de ancoragens é uma estrutura que apresenta menor risco face a uma cortina de estacas com vigas de distribuição. E ainda mais segura, logo com menos riscos, quando comparada com muro de Berlim ou até com parede de Lisboa construída com perfis metálicos e vigas de madeira.

O próprio projeto a implementar também é um dos componentes mais relevantes, sobretudo no que respeita aos pisos enterrados. Efetivamente, o risco envolvido na implantação de um edifício térreo em meio urbano é diferente do risco se o projeto contemplar a escavação para uma cave, e ainda mais diferente, com maior risco, se for considerada a escavação para três pisos enterrados, a título de exemplo.

Para além do cenário geotécnico e das especificidades do projeto, a envolvente de uma escavação a céu aberto em meio urbano assume uma relevância extremamente importante, destacando-se as estruturas e as vias de comunicação envolventes.

No que respeita às estruturas, o risco associado à construção na envolvente de uma estrutura reforçada ou de uma estrutura corrente é bastante diferente. Sendo este risco ainda maior na envolvente de estruturas sensíveis, como sejam monumentos (edifícios históricos com valor patrimonial) ou hospitais (edifícios com valor social).

Por último, destaca-se o risco associado à construção na envolvente de grandes aglomerados populacionais ou de vias de comunicação relevantes, como por exemplo vias rodoviárias principais, linhas de metro ou linhas férreas. No caso das vias de comunicação, podem encontrar-se à superfície ou enterradas.

5.4. Proposta de classificação de benefício para a monitorização automática

Identificados os cinco principais fatores de risco, importa agora determinar a sua relevância para a instrumentação em estudo. Para tal, recorre-se, como ponto de partida, a ponderações semelhantes às geralmente utilizadas nas matrizes de risco de obras geotécnicas, neste caso em matrizes de 5x5 (Tabela 12).

Tabela 12 – Matriz de pontuações de risco, 5x5 (adaptado de Dogan et al. 2023)

Probabilidade → Severidade ↓	Raro	Improvável	Possível	Provável	Quase certo
Insignificante	5 – Muito baixo	6 – Baixo	7 – Baixo	8 / 9 – Baixo	10 / 11 – Baixo
Menor	6 – Baixo	8 / 9 – Baixo	12 / 13 – Baixo	14 / 15 – Médio	18 / 19 – Médio
Moderado	7 – Baixo	12 / 13 – Baixo	16 / 17 – Médio	20 / 21 – Médio	22 – Alto
Maior	8 / 9 – Baixo	14 / 15 – Médio	20 / 21 – Médio	23 – Alto	24 – Alto
Crítico	10 / 11 – Baixo	18 / 19 – Médio	22 – Alto	24 – Alto	25 – Muito alto

Com base nos produtos constantes na anterior tabela, associando-os aos fatores de risco acima mencionados, apresenta-se em seguida a Tabela 13

encontrada.. Nesta tabela expõem-se as ponderações a considerar (pontuações de risco) para a avaliação da relevância de utilização de um sistema de instrumentação automático face a um sistema manual. Para cada um dos fatores deve ser definida a ponderação a considerar, sendo o resultado de cenário de risco o somatório de todas essas ponderações.

Tabela 13 – Matriz de risco para avaliação de compensação de instrumentação automática face à instrumentação manual

	Ponderação a considerar / Pontuações de risco				
	1 – Risco muito baixo	2 – Risco baixo	3 – Risco médio	4 – Risco alto	5 – Risco muito alto
Cenário geotécnico	Homogéneo ou estudo muito bem desenvolvido	Homogéneo com estudo pouco desenvolvido	Heterogéneo com estudo bem desenvolvido	Heterogéneo com estudo pouco desenvolvido	Muito heterogéneo ou estudo insuficiente
Projeto a implementar	Escavação para fundação	1 piso semienterrado	1 piso enterrado	2 pisos enterrados	3 ou mais pisos enterrados
Estruturas de contenção	Contenção definitiva armada e reforçada com ancoragens	Contenção definitiva armada	Contenção provisória reforçada com ancoragens	Contenção provisória simplificada	Sem contenção
Estruturas envolventes	Estruturas reforçadas	Estruturas correntes térreas	Estruturas correntes com vários andares	Estruturas correntes c/ vários andares e caves	Edifício histórico / hospitais ou equivalentes
Vias de comunicação envolventes	Vias secundárias c/ pouca frequência de pessoas	Vias secundárias c/ muita frequência de pessoas	Vias principais, ou metro, ou linha férrea	Vias principais e metro ou linha férrea	Vias principais, metro e linha férrea

Atendendo que os fatores de risco considerados na matriz anterior ocorrem sempre em obras de escavação a céu aberto em meio urbano, a aplicação da matriz resulta num fator de ponderação entre 5 e 25 pontos, correspondendo, respetivamente, a um cenário de risco muito baixo e de risco muito alto.

Identificados os fatores de risco e, a ponderação a considerar para cada campo em análise na matriz exposta, importa agora associá-los à monitorização manual e automática.

Como já explicitado, os principais benefícios da monitorização automática face à monitorização manual centram-se em parâmetros técnicos e operacionais, destacando-se essencialmente: a maior frequência de leituras; a maior precisão dos dados; e a maior confiança no sistema de

monitorização. Desta forma, considera-se que os sistemas automáticos são 3 vezes mais benéficos em termos técnicos que os sistemas manuais de aquisição de dados.

Assim, associando a matriz de risco para avaliação de compensação, com o fator de mais-valia para o sistema automático, corresponde-se o máximo de 25 pontos na matriz com o benefício de 3 vezes. No extremo oposto, faz-se corresponder o mínimo de 5 pontos na matriz com uma mais-valia de um, significando que para este cenário a utilização de um sistema automático é equivalente a um sistema manual, podendo a escolha ser baseada na vertente financeira.

Em suma, por cada fator de ponderação superior a cinco proveniente da matriz de risco há um incremento de 0,1 de mais-valia para o sistema de aquisição automática de dados. Destacando-se a seguinte correlação:

- Fator de ponderação 5 na matriz – benefício de 1X na monitorização automática;
- Fator de ponderação 10 na matriz – benefício de 1,5X na monitorização automática;
- Fator de ponderação 15 na matriz – benefício de 2X na monitorização automática;
- Fator de ponderação 20 na matriz – benefício de 2,5X na monitorização automática;
- Fator de ponderação 25 na matriz – benefício de 3X na monitorização automática.

É possível, com esta ponderação, determinar um fator de multiplicação para a análise económica do sistema manual, comparando-se com a análise económica do sistema automático. Desta forma, é possível desenvolver uma análise de custo-benefício integrada e completa entre a monitorização manual e automática.

5.5. Base de dados da análise económica

Toda a análise económica desenvolvida ao longo do estudo é sustentada por várias bases de dados, nomeadamente:

- Base de dados de instrumentação;
- Base de dados de sistema de aquisição automática;
- Base de dados de furação e instalação;
- Base de dados de leitura para aquisição manual e automática.

As quatro bases de dados correlacionam diferentes aspetos com a vertente monetária destes. Com base no mercado português e na experiência de trabalho adquirida, foi selecionado para cada item listado nas bases de dados um intervalo de valores típico (válido à data).

A partir do respetivo intervalo de valores foi adotado o seu valor médio como valor a considerar para os cálculos efetuados. Nota que procurou-se adotar intervalos de valores representativos, contudo, podem ocorrer no mercado valores que ultrapassem por excesso ou defeito os valores considerados, uma vez que dependem dos mercados de matérias-primas, como o aço, de componentes eletrónicos para os sensores e da oferta e procura.

A base de dados de instrumentação correlaciona os diferentes métodos em estudo com os respetivos:

- Equipamento/instrumento de medição e modo de aquisição de dados;
- Dispositivos de observação;
- Outros componentes quando aplicáveis.

Para estes pontos é indicado se devem ser considerados por quantidade ou por metro linear (m.l.), relacionando-os também com o respetivo intervalo de valores e com o seu valor para cálculo.

Nas colunas “por quantidade” e “por m.l.” quando aplicável aparece a designação “Sim”, caso contrário surge “N/A” (não aplicável).

A designação de “Sim” ou “N/A” é utilizada nas diferentes bases de dados, bem como nas folhas de análise económica por método ou por cenário de obra. Estas designações surgem nas colunas “por quantidade”, “por m.l.” e “por mês”. Pontualmente a designação “N/A” é também utilizada noutros campos.

Na Tabela 14 apresenta-se um excerto da base de dados de instrumentação a título de exemplo, para melhor ilustrar o trabalho desenvolvido e acima referido.

Tabela 14 – Excerto da base de dados de instrumentação utilizada para a análise económica

Base de dados de instrumentação								
Inclinómetros verticais, <i>Tiltmeters</i> , Células de carga, Piezómetros e Alvos/Prismas								
Equipamento Instrumento de medição	Aquisição de dados	Dispositivo de observação	Outros	Por quantidade	Por m.l.	Intervalo de valores		Valor a considerar
Inclinómetros verticais								
Inclinómetro convencional (sonda inclinométrica)	Manual			Sim	N/A	10 000 €	15 000 €	12 500 €
<i>In-place</i>	Automática			N/A	Sim	1 200 €	1 600 €	1 400 €
<i>Saav</i>	Automática			N/A	Sim	1 000 €	1 400 €	1 200 €
		Calha inclinométrica (ABS ou PVC)		N/A	Sim	15 €	19 €	17 €
		Calha piezométrica (PVC)		N/A	Sim	12 €	15 €	14 €
			Cabo de dados	N/A	Sim	3 €	6 €	5 €
<i>Tiltmeters</i>								
Unidade de leitura	Manual			Sim	N/A	1 500 €	2 800 €	2 150 €
<i>Tiltmeter</i> digital	Manual ou automática			Sim	N/A	300 €	600 €	450 €
<i>Tiltmeter</i> corda vibrante	Manual ou automática			Sim	N/A	600 €	900 €	750 €
<i>Wireless tiltmeter</i>	Automática			Sim	N/A	1 000 €	1 500 €	1 250 €
		Bases orientação		Sim	N/A	5 €	10 €	8 €
			Cabo de dados	N/A	Sim	3 €	6 €	5 €

Na base de dados de sistema de aquisição automática apresentam-se os diferentes *dataloggers* e *gateway* anteriormente explicitados, bem como a plataforma *on-line*. Esta listagem é associada às colunas “por quantidade” e “por mês” e ao respetivo “intervalo de valores” e “valor a considerar”.

Relativamente à base de dados de furação e instalação, esta foi dividida em três partes, nomeadamente dados de furação e dados de instalação a utilizar para inclinómetros verticais e piezómetros e dados de instalação a utilizar para *tiltmeters*, células de carga e alvos/prismas.

Nos dados de furação dos inclinómetros e piezómetros foram adotados os pontos referidos nas respetivas análises técnicas e operacionais. Nestes dados destacam-se: a mobilização de equipamento de furação e de equipa de trabalho que apresenta um intervalo de valores relativamente largo, uma vez que a distância de obra terá um fator preponderante no valor final a considerar; para a furação em rocha e em solo foram definidos dois intervalos de valores, no entanto, para o presente estudo considerou-se para cálculo um valor médio destes dois intervalos. Por último, foi considerado um valor para colocação de tampa de proteção no topo do inclinómetro ou do piezómetro. Atualmente, na grande maioria das obras, verifica-se a inexistência de tampas de proteção, originando, em muitos casos, alterações na posição de leitura por afetação das respetivas calhas, sendo a aplicação de tampas de proteção uma boa prática.

Nos dados de instalação optou-se pela divisão entre inclinómetros e piezómetros, e os restantes métodos. No primeiro caso, é considerada a instalação das calhas inclinométricas/piezométricas e também a instalação dos instrumentos de medição.

Para os *tiltmeters*, células de carga e alvos/prismas apenas é considerada a instalação “por quantidade” de equipamentos e instrumentos ou dispositivos de observação. Nota que nos dados das células de carga é referida a instalação “por quantidade”, mas não é admitido nenhum “valor a considerar”, uma vez que a sua instalação é, regra geral, associada ao valor das ancoragens.

Por último, surge a base de dados de leitura para aquisição manual e automática de dados, sendo esta dividida em diferentes partes. Na primeira parte apresenta-se o valor unitário para a leitura manual dos inclinómetros verticais, *tiltmeters*, células de carga, piezómetros e alvos/prismas. Na segunda parte surge o valor a considerar por relatório interpretativo até 3 métodos ou até 5 métodos de instrumentação. O relatório de monitorização manual é considerado por campanha de leitura (“por quantidade”), enquanto na monitorização automática o relatório interpretativo é considerado mensal (“por mês”). Nesta base de dados são ainda listados o valor a considerar por acompanhamento permanente em obra, nomeadamente por um técnico ou por uma equipa com vários técnicos alocada especificamente a uma obra, contudo, durante o presente estudo, estes valores não serão considerados.

No Anexo I – Base de dados da análise económica, apresenta-se na íntegra as quatro bases de dados mencionadas ao longo do presente subcapítulo.

5.6. Análise económica de método de instrumentação

Como mencionado, a análise por método de instrumentação foi desenvolvida na perspetiva de aquisição manual *versus* aquisição automática de dados. Na análise de cada método distinguem-se duas partes fundamentais, nomeadamente, a análise económica de pré-monitorização e uma análise económica que associa diferentes hipóteses de frequência de leituras com diferentes distâncias de obra.

Para a análise económica de pré-monitorização são consideradas as bases de dados de instrumentação, de sistema de aquisição automática e de furação e instalação. Para cada método e, dentro destes, na aquisição manual e automática, são considerados os respetivos pontos aplicáveis. Por sua vez, na análise com diferentes frequências de leitura e diferentes distâncias de obra, é utilizada a base de dados de leitura para aquisição manual e automática de dados.

Na Tabela 15 surge um excerto representativo do *layout* da análise económica de pré-monitorização, no caso para a aquisição manual de inclinómetros verticais.

Tabela 15 – Excerto representativo do *layout* da análise económica de pré monitorização por método de instrumentação

	Inclinómetros verticais - Análise económica pré monitorização					
	Aquisição Manual					
	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo
Equipamento instrumento	Inclinómetro convencional (sonda inclinométrica)	1	N/A	N/A	12 500 €	N/A
Dispositivo de observação	Calha inclinométrica (ABS ou PVC)	N/A	10	N/A	17 €	170 €
Outros	Cabo de dados	N/A		N/A	5 €	N/A
<i>Dataloggers</i>	N/A					
<i>Core communications</i>	N/A					
Total instrumentação						170 €
Dados de furação	Mobilização equipamento de furação e equipa de trabalho	1	N/A	N/A	2 250 €	2 250 €
	Posicionamento equipamento de furação	1	N/A	N/A	100 €	100 €
	Furação em rocha e solo	N/A	10	N/A	78 €	775 €
	Selagem	N/A	10	N/A	30 €	300 €
	Tampas de proteção	1	N/A	N/A	90 €	90 €
Dados de instalação	Calhas inclinométricas	N/A	10	N/A	30 €	300 €
	N/A					
	N/A					
Total furação + instalação						3 815 €
Total pré monitorização						3 985 €

Na Tabela 15 apresenta-se o *layout* da análise económica de pré-monitorização para a aquisição manual em inclinómetros verticais, no entanto, a conceção da ferramenta é igual para os restantes métodos de instrumentação, servindo esta tabela exclusivamente para demonstração e explicação da ferramenta de cálculo.

Refere-se que, para as diversas representações da ferramenta de análise económica constantes ao longo deste Capítulo, optou-se pela utilização numérica de 1 e de 10, respetivamente, para as colunas “por quantidade” e “por mês” e para a coluna “por m.l.”.

Primeiramente, da análise da Tabela 15 importa referir que às colunas “por quantidade”, “por m.l.”, “por mês” e “valor a considerar”, acrescenta-se o “valor para cálculo”. Este valor resulta da multiplicação do “valor a considerar” pela informação constante numa das outras três colunas.

No que respeita à instrumentação (equipamentos/instrumentos, dispositivos de observação, outros, *dataloggers* e *core communications*), estes campos estão diretamente conectados às respetivas bases de dados, quer na coluna “designação” quer na coluna “valor a considerar”. Assim, em cada célula, podem ser escolhidas as diferentes opções admitidas para cada campo em análise (Figura 15).

	Inclinómetros verticais - Análise económica pré monitorização					
	Aquisição Manual					
	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo
Equipamento instrumento	Inclinómetro convencional (sonda inclinométrica)	1	N/A	N/A	12 500 €	N/A
Dispositivo de observação	Inclinómetro convencional(sonda inclino In-place Saav	N/A	10	N/A	17 €	170 €
Outros	Cabo de dados	N/A		N/A	5 €	N/A
<i>Dataloggers</i>	N/A					
<i>Core communications</i>	N/A					
Total instrumentação						170 €

Figura 15 – Imagem representativa das diferentes opções admitidas para o campo equipamento/instrumento na análise económica de pré monitorização de inclinómetros verticais

Relativamente às colunas “por quantidade”, “por m.l.” e “por mês”, a informação constante nestes campos encontra-se associada à folha de cálculo do plano de instrumentação de obra (que será abordada no próximo subcapítulo). Desta forma, no *layout* do plano de instrumentação de obra é possível alterar estes campos, influenciando ao mesmo tempo a análise por método e por cenário de obra.

Por último, importa referir que na análise económica representada na Tabela 15 surge a linha para o total da instrumentação e para o total da furação + instalação, sendo que a sua soma perfaz o total de pré-monitorização. Ressalva-se que, para os *tiltmeters* e alvos/prismas, em vez do total de furação + instalação, surge só o total de instalação.

5.6.1. Aquisição manual e automática de dados para diferentes opções de frequência de leituras e de distância de obra

Para a análise das diferentes opções de frequência de leitura e de distância de obra importa reforçar que a aquisição manual de dados é considerada por campanha de leitura, enquanto a

aquisição automática de dados é considerada por relatório interpretativo mensal. Por este motivo e, para efeitos comparativos entre as duas metodologias de aquisição de dados, é necessário encontrar uma base comum de comparação. Assim, foram criados três cenários para diferentes frequências de leitura, surgindo:

- Cenário 1 – leituras diárias de aquisição manual de dados, correspondendo a 22 campanhas por mês. Neste cenário faz-se corresponder um mês de aquisição automática de dados, com leituras de hora a hora, a 22 campanhas de aquisição manual;
- Cenário 2 – leituras trissemanais de aquisição manual de dados, correspondendo a 12 campanhas por mês. Neste cenário faz-se corresponder um mês de aquisição automática de dados, com leituras de hora a hora, a 12 campanhas de aquisição manual;
- Cenário 3 – leitura semanal de aquisição manual de dados, correspondendo a 4 campanhas por mês. Neste cenário faz-se corresponder um mês de aquisição automática de dados, com leituras de hora a hora, a 4 campanhas de aquisição manual.

Associado aos três cenários de frequência de leituras surge o período das mesmas. No caso, optou-se pela representação anual, 12 meses, podendo ser, contudo, adotados outros valores.

Nota que, para uma análise completa das diferentes fases de obra, estes cenários podem corresponder a:

- cenário 1 – fase de escavação;
- cenário 2 – fase de construção;
- cenário 3 – fase de exploração.

Desta forma, o somatório das três fases corresponde ao número total de campanhas de aquisição manual para uma obra, podendo-se ajustar em cada fase o respetivo período de leituras. A ferramenta de cálculo foi desenvolvida com estas hipóteses, contudo, para o presente estudo serão apenas considerados os três cenários explicitados nos pontos anteriores.

Os três cenários de frequência de dados podem ser correlacionados com diferentes distâncias de deslocação a determinada obra. Para o campo da deslocação à obra, num total de ida e volta, foram consideradas três hipóteses: 50 km, 250 km e 500 km. Neste campo é necessário definir um valor (€) por km, tendo-se optado por considerar 1€ por km. Neste preço está refletido o valor por km tabelado pelo Governo de Portugal, bem como uma compensação pelo tempo em que o(s) técnico(s) está em viagem, não sendo considerado tempo útil de trabalho. Para além destes dois

parâmetros, ocorre uma pequena percentagem relativa à amortização de equipamentos de medição e de unidades de leitura de aquisição manual de dados.

Como já explicitado, as sondas inclinométricas, as sondas piezométricas e as unidades de leitura próprias para sensores elétricos ou de corda vibrante não se encontram fixas a uma determinada obra, isto é, podem ser utilizadas para leituras de monitorização em diferentes obras durante o mesmo período temporal. Por este motivo, na análise de custos da aquisição manual de dados, o seu valor de aquisição não é considerado, contudo este continua a existir, diluindo-se assim por diferentes obras.

Na Tabela 16 apresenta-se o *layout* da aquisição manual *versus* aquisição automática, para os três cenários de frequência de leituras e para uma deslocação de 50 km. Na tabela consta o método de inclinómetros verticais, sendo este representativo de todos os métodos em estudo.

Tabela 16 – *Layout* representativo da aquisição manual *versus* aquisição automática para os três cenários de frequência de leituras e para uma deslocação de 50 km

Inclinómetros verticais - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 50 km											
Cenário 1 (ou escavação)				Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)				
Manual		Automática		Manual		Automática		Manual		Automática	
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora		
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4			
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12		
Deslocação Ida e volta (km / €)	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A		
Leitura completa	30 €		N/A	30 €		N/A	30 €		N/A		
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A		
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €		
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €		
Total campanha	180 €		N/A	180 €		N/A	180 €		N/A		
Total mês (4 semanas por mês)	3 960 €		900 €	2 160 €		900 €	720 €		900 €		
Total anual (48 semanas)	47 520 €		10 800 €	25 920 €		10 800 €	8 640 €		10 800 €		
Total pré monitorização	Aquisição manual			3 985 €							
	Aquisição automática			20 850 €							

Da análise da Tabela 16 podem ainda destacar-se, para a aquisição manual, os campos da leitura completa e do relatório de monitorização por campanha, enquanto na aquisição automática destaca-se o relatório mensal e a plataforma *on-line*, sendo que estas quatro linhas estão associadas à base de dados de leitura.

Com o somatório do valor de deslocação, de leitura completa e do relatório de campanha obtém-se o total por campanha para a aquisição manual. Com o valor por campanha é possível calcular para os três cenários de frequência de leituras o total por mês, considerando 4 semanas por mês, e o total anual.

Para a aquisição automática, o total por mês é obtido pela soma do valor mensal do relatório interpretativo e da plataforma *on-line*, obtendo-se, com base neste, o total anual.

Por último, referir que na Tabela 16 surge o cenário de deslocação para 50 km, no entanto, nos próximos Capítulos serão realizadas análises para 50 km, 250 km e 500 km, sendo este o fator mais preponderante para o valor a considerar por campanha na aquisição manual de dados.

5.7. Análise económica de plano de instrumentação

A análise económica por plano de instrumentação (por cenário de obra) foi desenvolvida para os cinco métodos de instrumentação em estudo, encontrando-se o seu *layout* conectado à análise por cada método.

Tal como no subcapítulo anterior, a análise por cenário de obra é constituída por duas partes fundamentais, nomeadamente, a análise económica de pré-monitorização e uma análise económica que associa diferentes hipóteses de frequência de leituras com diferentes distâncias de obra. A principal diferença é o número de métodos de instrumentação envolvidos.

No *layout* da análise por cenário de obra, na linha do equipamento/instrumento/dispositivo é possível seleccionar, para a aquisição manual e automática, as diferentes opções admitidas para cada método em estudo. Depois é necessário indicar a sua quantidade pretendida e, quando aplicável, as quantidades em metros lineares. Os valores colocados nas células “quantidade” e “metros lineares” estão conectados aos respetivos campos nas folhas de cálculo de cada método, executando instantaneamente o valor final de pré-monitorização e o valor por campanha para cada método.

De seguida, apenas aplicável para a aquisição automática de dados, surge a linha dos *dataloggers* e do *core communications*, sendo possível, mais uma vez, escolher entre as diferentes opções admitidas para estes campos. Após a seleção do *datalogger* e do *gateway* e, influenciando as folhas de cada método, é necessário escolher as quantidades a considerar para estes campos.

Finalizada a escolha dos equipamentos/instrumentos/dispositivos, dos *dataloggers* e dos *gateway* e das respetivas quantidades a considerar, ocorrem três linhas associadas a estas escolhas e aos

somatórios promovidos nas respetivas folhas de método de instrumentação. Assim, por cada método e para a aquisição manual e automática, surgem os campos de total de instrumentação, total de furação + instalação ou total de instalação e o total de pré-monitorização.

Associado a estas três linhas, apresenta-se para o cenário de obra o campo do total de pré-monitorização para aquisição manual e o total de pré-monitorização para aquisição automática.

É de suma importância referir que, no topo do *layout*, sob a célula dos diferentes métodos e sobre as células da aquisição manual e automática, existe para cada uma destas um campo com a possibilidade de seleção de “Aplicável” e de “Não aplicável”. Quando a designação “Não aplicável” está ativa, implica que o valor total de pré-monitorização para o respetivo modo de aquisição e respetivo método não seja considerado para o total do cenário de obra.

Por último, surge a linha do valor de leitura completa para aquisição manual, sendo esta apresentada por cada método e no total dos métodos considerados. Os valores por método são obtidos pela multiplicação da quantidade selecionada para os equipamentos/instrumentos ou dispositivos de observação com o respetivo valor constante na base de dados de leitura. Quando o campo “Não aplicável” está ativo implica que o respetivo valor não seja considerado para o total de leitura manual de dados.

Na Tabela 17 apresenta-se o *layout* geral para a análise económica de pré-monitorização por cenário de obra, isto é, por plano de instrumentação de obra.

Relativamente à análise da aquisição manual e automática para diferentes opções de frequência de leituras e de distância de obra, esta é em tudo idêntica à explicitada no subcapítulo 5.6.1; a principal diferença é que, no cenário em análise, podem ser considerados entre dois a cinco métodos.

Desta forma, na célula de leitura completa para aquisição manual de dados, será considerada a leitura de diferentes equipamentos e dispositivos de observação para os vários métodos em estudo. Para além deste ponto, a principal diferença face à análise por método, é nas linhas referentes aos relatórios interpretativos – na análise por cenário de obra, existe a possibilidade, para a aquisição manual e automática, de realização de relatórios interpretativos até 3 métodos e até 5 métodos de instrumentação. Associado às linhas destes relatórios surge a designação “N/A” e diferentes valores por relatório consoante o número de métodos.

Tabela 17 – Layout da análise econômica de pré monitorização por plano de instrumentação de obra (cenário de obra)

5.8. Ponto ótimo entre aquisição manual e automática

Nos anteriores subcapítulos foi explicitado, por método e por cenário de obra, para a aquisição manual e automática, como a ferramenta de análise económica permite a obtenção de:

- Valor de pré-monitorização;
- Valor por campanha de monitorização manual, para três hipóteses de distância de deslocação à obra, concretamente 50, 250 e 500 km;
- Relação entre o valor mensal da aquisição automática de dados com diferentes frequências de leitura para a aquisição manual.

Com os dados referentes a estes três pontos foi concebida e desenvolvida uma representação gráfica que permita uma rápida e fácil interpretação das variáveis em estudo (Gráfico 4). Neste gráfico apresenta-se a título meramente representativo a aquisição manual *versus* automática para os inclinómetros verticais, expondo parte dos valores constantes no subcapítulo 5.6.

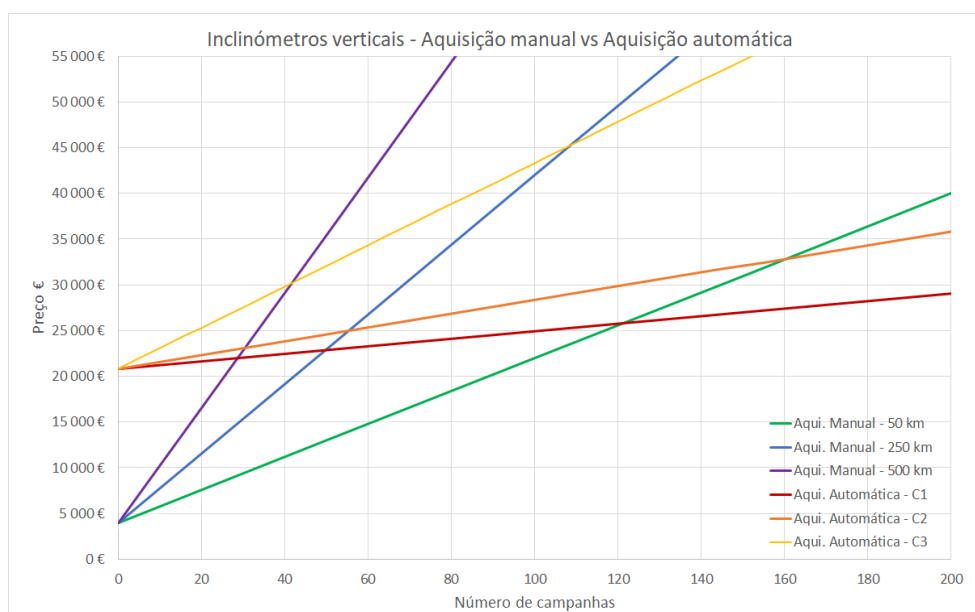


Gráfico 4 – Gráfico representativo da análise económica. Aquisição manual *versus* Aquisição automática

Analisando o Gráfico 4 observa-se que o eixo X corresponde ao número de campanhas e o eixo Y corresponde ao preço em euros (€), verificando-se no eixo Y dois valores distintos, nomeadamente o valor total de pré-monitorização para a aquisição manual e para a aquisição automática. Os valores de pré-monitorização estão associados à aquisição de

equipamentos/instrumentos, de dispositivos de observação, de *dataloggers* e de *gateway*, bem como, ao valor de furação e/ou instalação. Estes valores não implicam a realização de nenhuma campanha de monitorização, motivo pelo qual se fazem corresponder com o valor de zero campanhas no eixo X.

Como já exposto, o principal fator que influencia o valor por campanha para a aquisição manual de dados é a deslocação à obra. O valor por leitura e por relatório estão associados às escolhas de quantidades realizadas, apresentando, assim, um carácter fixo para o conjunto de quantidades definido. Adotando as hipóteses de deslocação já referidas, concretamente de 50, 250 e 500 km, é possível, a partir do valor de pré-monitorização para a aquisição manual, traçar três retas referentes ao valor por campanha para cada distância de deslocação. Estas retas apresentam-se no gráfico com legenda de “Aqui. Manual – 50 km / 250 km / 500 km”.

Relativamente à mensalidade de monitorização automática, para efeitos de comparação com a aquisição manual, faz-se corresponder um mês a determinado número de campanhas manuais. Assim, para a aquisição automática do cenário 1 (legenda: “Aqui. Automática – C1”) faz-se corresponder uma mensalidade a 22 campanhas de monitorização manual, sendo a segunda mensalidade referente a 44 campanhas de monitorização manual e assim sucessivamente. Na mesma lógica, surge a “Aqui. Automática – C2” e a “Aqui. Automática – C3”, onde, respetivamente, se faz corresponder uma mensalidade de monitorização automática a 12 campanhas e a 4 campanhas de aquisição manual e assim sucessivamente.

Desta forma, com dois pontos de partida no eixo Y, são criadas seis retas, cada uma referente a uma hipótese de monitorização. Assim, para cada reta de aquisição manual (50, 250 e 500 km) ocorre a intersecção com os três cenários de comparação com a aquisição automática.

A intersecção entre uma reta de “Aqui. Manual” com uma reta de “Aqui. Automática” simboliza o ponto ótimo, isto é, o ponto económico a partir do qual a aquisição automática passa a fazer sentido face à aquisição manual. Neste ponto é possível obter, no eixo X, o número de campanhas, e o respetivo valor (€) de monitorização no eixo Y.

[página propositadamente em branco]

Capítulo VI

Aplicação da análise económica a caso de estudo teórico

[página propositadamente em branco]

6. Aplicação da análise económica a caso de estudo teórico

6.1. Generalidades

Introduzida e descrita a ferramenta de cálculo concebida para a análise económica de suporte à decisão de planos de instrumentação de projetos de obras de escavação a céu aberto em meio urbano, importa agora promover a sua aplicação. Para tal, optou-se, por simplificação de explanação, pela criação de um caso de estudo teórico, mas representativo da maioria dos projetos em execução em cidades como exemplo Porto e Lisboa.

Na conceção do caso de estudo teórico foi tido em conta o âmbito de escavações a céu aberto em meio urbano, a comparação entre monitorização manual e automática, tal como outros pontos necessários, nomeadamente:

- Grandezas a medir;
- Precisão dos equipamentos e instrumentos de medição;
- Valor de aquisição dos equipamentos/instrumentos e dos dispositivos de observação;
- Valor de aquisição para sistemas automáticos de dados;
- Valor de instalação e furação de todo o sistema considerado;
- Quantidades por unidade e por metro linear a considerar para as diferentes escolhas;
- Frequência de leituras e período de monitorização;
- Valor total por campanha de leitura na monitorização manual;

- Valor mensal para a monitorização automática.

A definição dos pontos supracitados encontra-se em concordância com toda a análise técnica e operacional realizada ao longo do estudo, sendo agora analisada a sua vertente financeira.

Nota prévia que, ao longo do presente Capítulo, serão primeiramente analisados individualmente os métodos de instrumentação selecionados, realizando-se um estudo económico como se se tratasse de um cenário de projeto/obra, isto é, como se a monitorização de determinada obra fosse executada com um só método de instrumentação. Após a análise financeira destes métodos, promove-se a análise do cenário de obra, englobando os cinco métodos em estudo.

6.2. Definição de plano de instrumentação

Para a definição do plano de instrumentação do caso de estudo teórico foram considerados três pontos fundamentais:

- Objetivo e grandezas a medir;
- Seleção e localização de instalação dos equipamentos e instrumentos de medição e dos dispositivos de observação;
- Frequências de leitura.

Para o primeiro ponto e, considerando os métodos em estudo, considera-se:

- Alvos/Prismas – deformação superficial (x, y e z);
- Inclínómetros verticais – deformação horizontal (interior do terreno);
- Células de carga – tensão nas ancoragens;
- Piezómetros – nível freático e pressão intersticial do terreno;
- *Tiltmeters* – inclinação e rotação.

No ponto relativo às frequências de leitura, importa mencionar que foi concebida uma análise em que foram combinadas diferentes hipóteses de frequência da mesma com diferentes distâncias de deslocação à obra, não tendo sido definido um valor fixo para ambos os parâmetros.

Para a restante definição do plano de instrumentação, tratando-se de uma obra de escavação a céu aberto em meio urbano, optou-se, para simplificação do problema, por uma geometria de obra teórica quadrada, com quatro alçados.

Para a escavação, consideram-se dois pisos enterrados, cada um com 4 metros, perfazendo um total de escavação de 8 metros.

Tratando-se de uma obra em meio urbano, considera-se que, na sua envolvente, ocorrem estruturas e infraestruturas, bem como vias principais, sendo que as estruturas envolventes se encontram na área de interferência dos quatro alçados de obra.

Dos critérios base mencionados, surge para o interior da obra a seguinte seleção:

- Alvos/Prismas – 24 dispositivos de observação, 6 por cada alçado, 3 por cada piso de escavação. Estes dispositivos serão instalados diretamente na estrutura de contenção, quer no meio do alçado, quer próximos da interseção entre alçados;
- Inclínómetros verticais – 4 inclínómetros, um por cada alçado, instalados no meio do respetivo alçado. Cada inclínómetro apresenta um comprimento de 11 m, correspondendo aos 8 metros de escavação mais 3 metros de encastramento;
- Células de carga – 8 células, duas por cada alçado, uma por cada piso de escavação, sendo instaladas no meio do respetivo alçado, na cabeça das ancoragens;
- Piezómetros – 2 piezómetros, em alçados opostos, cada um com comprimento de 11 m, verificando-se a existência de nível freático na escavação, bem como, sob a fundação;
- *Tiltmeters* – 8 *tiltmeters*, dois por cada alçado, um por cada piso de escavação, sendo estes instalados no meio do alçado, diretamente na estrutura de contenção.

Reforça-se que este é um cenário representativo de muitos projetos/obras em meio urbano.

Pelo definido, conforme recomendável, promove-se a redundância de leituras onde, geralmente, é expectável a maior possibilidade de deformação, concretamente no meio do alçado. Esta redundância é obtida pelos inclínómetros verticais, pelos *tiltmeters*, pelas células de carga e pelos alvos/prismas.

Os limites dos alçados, próximos da interseção entre estes, ficam materializados por dois níveis de alvos/prismas, um por cada piso de escavação.

Relativamente às estruturas envolventes, considerando-se a sua existência na área de influência de cada alçado, define-se:

- Alvos/Prismas – 12 dispositivos, 3 por cada exterior de alçado, sendo instalados aproximadamente equidistantes nas estruturas envolventes de cada alçado;
- *Tiltmeters* – 4 *tiltmeters*, 1 por cada exterior de alçado, instalados na estrutura mais centrada com o respetivo alçado.

Na monitorização das estruturas envolventes promove-se a redundância de leituras em cada exterior de alçado, nomeadamente entre o *tiltmeter* e o alvo/prisma mais centrado na estrutura.

Com base na seleção efetuada, nos próximos subcapítulos será executada a análise económica individual para cada método de instrumentação e, por último, a análise económica para o total do plano de instrumentação idealizado, sempre na perspetiva de aquisição manual *versus* aquisição automática de dados.

No Anexo II – Plano de instrumentação – apresenta-se o esquema de instrumentação definido para o caso de estudo teórico, em vista de alçado e de topo.

6.3. Alvos/Prismas

Para a leitura dos alvos e dos prismas topográficos foi selecionado o equipamento de medição taquiómetro (estação total). Em concordância com o exposto na respetiva análise técnica e operacional, para a aquisição manual, com deslocação obrigatória à obra, são considerados os alvos. Para a monitorização automática e remota são considerados os prismas.

Nas duas metodologias de monitorização são considerados os 36 dispositivos de observação constantes no plano de instrumentação.

Na aquisição manual de dados não se considera o valor de aquisição da estação total, estando uma pequena percentagem de amortização alocada ao preço por km para deslocação. Desta forma, o total de instrumentação é unicamente referente ao valor de aquisição dos 36 alvos.

Por sua vez, o valor total da instrumentação para monitorização automática é obtido pela soma de várias partes, nomeadamente: estação total com *software* para leituras automáticas, contínuas e remotas; 36 prismas topográficos; *datalogger* específico para estação total; e *gateway* sem painel solar.

Para além da instrumentação, surge o valor de instalação para os 36 alvos e prismas, sendo este igual para as duas metodologias de monitorização.

Na Tabela 18 apresentam-se os principais valores a considerar para a análise económica de pré-monitorização dos alvos/prismas, enquanto no Anexo III surgem estes valores na íntegra.

Tabela 18 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para os alvos/prismas

Alvos/Prismas		
	Aquisição manual	Aquisição automática
Total instrumentação	900 €	68 000 €
Total instalação	162 €	162 €
Total pré-monitorização	1 062 €	68 162 €

Na Tabela 19 compilam-se os principais valores a analisar para as diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra para os alvos/prismas.

Tabela 19 – Síntese económica dos alvos/prismas para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra

Alvos/Prismas							
		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
Aquisição de dados		Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática
Frequência de leituras		22 vezes mês	Hora a hora	12 vezes mês	Hora a hora	4 vezes mês	Hora a hora
50 km	Total campanha	258 €	N/A	258 €	N/A	258 €	N/A
	Total mês	5 676 €	900 €	3 096 €	900 €	1 032 €	900 €
250 km	Total campanha	458 €	N/A	458 €	N/A	458 €	N/A
	Total mês	10 076 €	900 €	5 496 €	900 €	1 832 €	900 €
500 km	Total campanha	708 €	N/A	708 €	N/A	708 €	N/A
	Total mês	15 576 €	900 €	8 496 €	900 €	2 832 €	900 €

Da Tabela 19 depreende-se que a aquisição remota e automática de dados através da leitura dos prismas topográficos apresenta um custo total associado à manutenção da plataforma de dados na internet e ao relatório de um técnico.

Relativamente à aquisição manual de dados através da leitura dos alvos topográficos, há a considerar o valor da leitura dos 36 alvos e do relatório interpretativo. A estes valores acresce o custo variável da deslocação consoante a distância à obra, nomeadamente de 50, 250 e 500 km. A soma da leitura dos alvos, do relatório e da deslocação perfaz o total por campanha.

No Anexo III – Análise económica para os alvos/prismas – apresentam-se na íntegra todos os valores e cálculos considerados para a sua análise económica.

6.4. Inclínómetros verticais

Como mencionado na análise técnica e operacional, para o estudo dos inclinómetros verticais foi selecionado o inclinómetro convencional (sonda inclinométrica) para a monitorização manual e o instrumento SAAV para a monitorização automática.

Na monitorização manual são consideradas calhas inclinométricas ABS 70 mm, enquanto para o SAAV são consideradas calhas PVC de 60 mm, ambas com um total de 44 metros lineares.

Para a aquisição automática, atendendo à tecnologia presente no SAAV, foi considerado o *datalogger digital node*. Como o plano de instrumentação define um inclinómetro por alçado, é necessária a instalação de 4 *dataloggers*. Associado a estes, existe um *gateway* sem painel solar, considerando-se que o mesmo é ligado à rede elétrica da obra.

Estes campos constituem o respetivo total de instrumentação, sendo que na aquisição manual não se considera o valor de aquisição da sonda inclinométrica, estando uma pequena percentagem de amortização alocada ao preço por km para deslocação.

Relativamente à furação, esta é exatamente igual para as duas metodologias de monitorização, diferindo apenas no valor de instalação. Para a aquisição manual, é considerada apenas a instalação das calhas, enquanto na aquisição automática, para além das calhas, é necessário instalar 44 metros do instrumento SAAV.

Na Tabela 20 apresentam-se os principais valores a considerar na análise económica de pré-monitorização. Por sua vez, no Anexo IV – Análise económica para os inclinómetros verticais, surgem, na íntegra, todos os valores considerados para a análise.

Tabela 20 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para os inclinómetros verticais

Inclínómetros verticais		
	Aquisição manual	Aquisição automática
Total instrumentação	748 €	61 894 €
Total furação + instalação	9 060 €	9 720 €
Total pré-monitorização	9 808 €	71 614 €

Na Tabela 21 apresenta-se uma síntese de análise económica para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra para os inclinómetros verticais.

Tabela 21 – Síntese económica dos inclinómetros verticais para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra

Inclinómetros verticais							
		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
Aquisição de dados		Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática
Frequência de leituras		22 vezes mês	Hora a hora	12 vezes mês	Hora a hora	4 vezes mês	Hora a hora
50 km	Total campanha	270 €	N/A	270 €	N/A	270 €	N/A
	Total mês	5 940 €	900 €	3 240 €	900 €	1 080 €	900 €
250 km	Total campanha	470 €	N/A	470 €	N/A	470 €	N/A
	Total mês	10 340 €	900 €	5 640 €	900 €	1 880 €	900 €
500 km	Total campanha	720 €	N/A	720 €	N/A	720 €	N/A
	Total mês	15 840 €	900 €	8 640 €	900 €	2 880 €	900 €

Na mensalidade da monitorização automática entram para cálculo os campos do relatório interpretativo e da plataforma *on-line*, pelo que o seu valor será sempre igual ao longo do tempo. A monitorização automática não implica deslocação à obra.

No total da campanha de monitorização manual entram para cálculo três valores, sendo estes a deslocação, a leitura dos equipamentos e o relatório interpretativo. Estes dois últimos apresentam carácter fixo em função das escolhas promovidas no plano de instrumentação. Assim, o valor por campanha será sobretudo influenciando pela deslocação à obra (50, 250 ou 500 km).

Para cada hipótese de aquisição manual, o total por mês reflete o produto do valor por campanha pela quantidade de leituras realizadas num mês.

No Anexo IV – Análise económica para os inclinómetros verticais – apresentam-se na íntegra todos os valores considerados para a análise económica dos inclinómetros verticais.

6.5. Células de carga

Na análise económica de pré-monitorização foram consideradas as células de carga hidráulicas com manómetro e as células de carga elétricas, tal como descrito no respetivo subcapítulo da análise técnica e operacional. Quer na opção para a aquisição manual, quer para a aquisição automática, foram consideradas as 8 unidades definidas no plano de instrumentação.

Atendendo ao sensor geotécnico (elétrico) presente nas células para aquisição automática, é necessário escolher um *datalogger* do tipo analógico, podendo-se selecionar a opção “*Single-channel*” ou “*Multi-channel*”. O plano de instrumentação considerado admite a instalação de duas células por alçado, uma por cada piso de escavação, encontrando-se, assim, relativamente próximas. Desta forma, opta-se pela junção de duas células no mesmo *datalogger*, perfazendo para a obra um total de 4 *dataloggers* do tipo “*analog node Multi-channel*”. Como já habitual, a estes associa-se um *gateway* sem painel solar.

Como explicitado oportunamente, para as células de carga não se consideram os campos da furação nem da instalação dos instrumentos, sendo a análise económica de pré-monitorização baseada no total da instrumentação (Tabela 22).

Tabela 22 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para as células de carga

Células de carga		
	Aquisição manual	Aquisição automática
Total instrumentação	10 000 €	18 500 €
Total instalação	N/A	N/A
Total pré-monitorização	10 000 €	18 500 €

Na Tabela 23 apresenta-se uma síntese de análise económica para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra para as células de carga.

Tabela 23 – Síntese económica das células de carga para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra

Células de carga							
		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
Aquisição de dados		Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática
Frequência de leituras		22 vezes mês	Hora a hora	12 vezes mês	Hora a hora	4 vezes mês	Hora a hora
50 km	Total campanha	186 €	N/A	186 €	N/A	186 €	N/A
	Total mês	4 092 €	900 €	2 232 €	900 €	744 €	900 €
250 km	Total campanha	386 €	N/A	386 €	N/A	386 €	N/A
	Total mês	8 492 €	900 €	4 632 €	900 €	1 544 €	900 €
500 km	Total campanha	636 €	N/A	636 €	N/A	636 €	N/A
	Total mês	13 992 €	900 €	7 632 €	900 €	2 544 €	900 €

Da análise da Tabela 23 surge, uma vez mais, o valor mensal fixo associado à gestão da plataforma e relatórios para a monitorização automática.

Para o total por campanha relativamente à aquisição manual de dados, é necessário considerar o valor de leitura das 8 células de carga e o valor para o relatório interpretativo. A estes, acresce o valor variável para a deslocação à obra, relembrando-se que foi considerado um valor de 1 €/km para a deslocação.

O Anexo V – Análise económica para as células de carga – apresenta, na íntegra, todos os valores e cálculos considerados para a análise económica.

6.6. Piezómetros

Como constante no subcapítulo da análise técnica e operacional dos piezómetros, para o estudo financeiro foram selecionados, para a monitorização manual e automática, respetivamente, os piezómetros de tubo aberto e os piezómetros de corda vibrante.

Os piezómetros de tubo aberto são lidos através da sonda piezométrica. Tal como para a sonda inclinométrica e para a estação total, o seu valor não é considerado para efeitos de cálculo, considerando-se uma pequena amortização associada ao valor por km para deslocação.

Em concordância com o plano de instrumentação, são considerados dois piezómetros de tubo aberto e dois piezómetros de corda vibrante, com 22 metros lineares de calha piezométrica para cada modo de aquisição de dados.

Na aquisição automática, para além do *gateway* sem painel solar, é preciso considerar *dataloggers*. Atendendo à localização dos piezómetros em alçados opostos, é preferível a seleção de dois *dataloggers* “*Single-channel*”, que, para o sensor geotécnico em causa, terão de ser do tipo “*VW node Single-channel*”.

Relativamente à furação e instalação, as duas metodologias de monitorização apresentam um custo praticamente idêntico, distinguindo-se apenas na monitorização automática o custo de instalação dos dois piezómetros de corda vibrante

Na Tabela 24 destacam-se os principais valores a considerar na análise económica de pré-monitorização. Por sua vez, no Anexo VI – Análise económica para os piezómetros, surgem na íntegra todos os valores considerados para a sua análise.

Tabela 24 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para os piezómetros

Piezómetros		
	Aquisição manual	Aquisição automática
Total instrumentação	297 €	7 297 €
Total furação + instalação	5 325 €	5 355 €
Total pré-monitorização	5 622 €	12 652 €

Na Tabela 25 resumem-se os principais valores a analisar para as diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra para os piezómetros.

Tabela 25 – Síntese económica dos piezómetros para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra

Piezómetros							
		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
Aquisição de dados		Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática
Frequência de leituras		22 vezes mês	Hora a hora	12 vezes mês	Hora a hora	4 vezes mês	Hora a hora
50 km	Total campanha	159 €	N/A	159 €	N/A	159 €	N/A
	Total mês	3 498 €	900 €	1 908 €	900 €	636 €	900 €
250 km	Total campanha	359 €	N/A	359 €	N/A	359 €	N/A
	Total mês	7 898 €	900 €	4 308 €	900 €	1 436 €	900 €
500 km	Total campanha	609 €	N/A	609 €	N/A	609 €	N/A
	Total mês	13 398 €	900 €	7 308 €	900 €	2 436 €	900 €

Analisando a Tabela 25, observa-se o valor mensal fixo ao longo do tempo para a plataforma de dados na internet e relatórios para a monitorização automática.

Para os dois piezómetros de tubo aberto é necessário considerar o valor da leitura com recurso a sonda piezométrica, que acresce o valor para o relatório interpretativo. Como já transmitido, a estes é necessário somar o valor da deslocação à obra, para uma distância de 50, 250 e 500 km.

O Anexo VI – Análise económica para os piezómetros – exhibe, na íntegra, todos os valores e cálculos considerados para a análise económica.

6.7. *Tiltmeters*

Para a análise de custos dos *tiltmeters* foram selecionados os instrumentos *tiltmeter* digital e os *wireless tiltmeter*, respetivamente, para a aquisição manual e automática de dados. Importa lembrar que o primeiro instrumento é uniaxial, enquanto os *wireless tiltmeter* permitem a realização de leituras em x, y e z.

Como demonstrado na análise técnica, os *wireless tiltmeter* são instrumentos 2 em 1, resultando que, para a monitorização automática, apenas é necessária a instalação de um *gateway*, considerando-se a opção sem painel solar.

O valor de instalação destes instrumentos considera-se equivalente, uma vez que são muito semelhantes e a mão-de-obra associada à instalação dos diferentes tipos é igual.

Na Tabela 26 expõem-se os principais valores a considerar para a análise económica de pré-monitorização dos *tiltmeters*, apresentando-se, no Anexo VII, a folha de cálculo integral.

Tabela 26 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para os *tiltmeters*

<i>Tiltmeters</i>		
	Aquisição manual	Aquisição automática
Total instrumentação	5 400 €	18 500 €
Total instalação	90 €	90 €
Total pré-monitorização	5 490 €	18 590 €

Como já explicado previamente, a monitorização automática, quando considerados de um a três métodos de instrumentação, apresenta sempre o mesmo valor mensal.

No caso das leituras manuais de *tiltmeters*, ao valor associado à própria leitura, acresce o custo vinculado ao relatório interpretativo por campanha (até 3 métodos de instrumentação), bem como o encargo da deslocação de ida e volta à obra, variando, assim, o valor final por campanha consoante a deslocação de 50, 250 ou 500 km.

Na Tabela 27 resumem-se os principais valores a analisar para as diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra para os *tiltmeters*.

Tabela 27 – Síntese económica dos *tiltmeters* para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra

Tiltmeters							
		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
Aquisição de dados		Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática
Frequência de leituras		22 vezes mês	Hora a hora	12 vezes mês	Hora a hora	4 vezes mês	Hora a hora
50 km	Total campanha	204 €	N/A	204 €	N/A	204 €	N/A
	Total mês	4 488 €	900 €	2 448 €	900 €	816 €	900 €
250 km	Total campanha	404 €	N/A	404 €	N/A	404 €	N/A
	Total mês	8 888 €	900 €	4 848 €	900 €	1 616 €	900 €
500 km	Total campanha	654 €	N/A	654 €	N/A	654 €	N/A
	Total mês	14 388 €	900 €	7 848 €	900 €	2 616 €	900 €

O Anexo VII – Análise económica para os *tiltmeters* – detalha, na íntegra, todos os valores considerados para a análise económica deste método de instrumentação.

6.8. Cenário de obra

Após a aplicação da ferramenta de análise económica aos diferentes métodos de instrumentação, promove-se agora a sua aplicação para o conjunto do plano de instrumentação definido.

Atendendo à conceção e desenvolvimento da ferramenta, a análise económica de pré-monitorização para o cenário de obra corresponde à soma, para a aquisição manual e automática, dos totais de pré-monitorização obtidos para cada método de instrumentação (Tabela 28).

Tabela 28 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para o cenário de obra

Cenário de obra		
	Aquisição manual	Aquisição automática
Total pré-monitorização	31 982 €	189 518 €

Contudo, como mencionado no início do presente Capítulo, cada método de instrumentação iria ser abordado de forma individual e na perspetiva de ser o único método presente em obra. Desta

forma, torna-se necessário otimizar os valores obtidos para a criação realista de uma análise económica de pré-monitorização do cenário de obra.

Analisando todas as variáveis em estudo, constata-se que a aquisição manual já se encontra otimizada. No entanto, a aquisição automática apresenta várias hipóteses de otimização.

Como já referido, sobretudo no subcapítulo 4.2., o sistema de aquisição automática de dados selecionado para estudo implica, para além dos instrumentos de medição, *dataloggers* associados aos diferentes instrumentos, e um *gateway* conectado com os diferentes *dataloggers*.

Assim, a primeira otimização é a remoção dos *gateways* em excesso, sendo apenas necessário um *gateway* por obra. No *layout* da análise económica de pré-monitorização por cenário de obra, o *gateway* e o respetivo valor podem ficar alocados a qualquer método de instrumentação, desde que a respetiva coluna esteja identificada como “Aplicável”.

Na Tabela 29 apresenta-se a análise económica para o cenário de obra com a otimização 1.

Cada *gateway* apresenta um custo médio de 3 500 €, com a remoção de 4 *gateways*, significa um corte de 14 000 € no total de pré-monitorização para a aquisição automática.

Tabela 29 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para o cenário de obra – Otimização 1

Cenário de obra		
	Aquisição manual	Aquisição automática
Total pré-monitorização	31 982 €	189 518 €
Total pré-monitorização Otimização 1	31 982 €	175 518 €

Na análise económica de pré-monitorização relativa à aquisição automática, para além dos *gateways*, destacam-se os *dataloggers* e os instrumentos de medição, sendo que uma segunda otimização terá de influenciar ambos estes parâmetros.

Para os inclinómetros verticais foi adotado o instrumento SAAV em virtude das suas mais-valias, estando este instrumento associado a um *digital node*. Para os *tiltmeters* selecionou-se o instrumento *wireless tiltmeter*, que não necessita de *datalogger* externo. Relativamente ao taquímetro, este necessita de um *datalogger* específico.

Posto isto, a otimização da análise económica do cenário de obra terá de passar pelas células de carga e pelos piezómetros. Como mencionado, para as células de carga foi selecionada a opção de

sensor elétrico com 4 *dataloggers* do tipo “*Analog node Multi-channel*”, enquanto para os piezómetros foi selecionado o sensor de corda vibrante e 2 *dataloggers* do tipo “*VW node Single-channel*”. Para atingir otimização, as células de carga e os piezómetros têm de apresentar a mesma tecnologia de sensor geotécnico.

Na análise técnica e operacional das células de carga constatou-se que os sensores elétricos e de corda vibrante eram em tudo semelhantes, apresentando pequenas distinções, consideradas pouco significativas. Em termos monetários, analisando a tabela de instrumentação, verifica-se que as células elétricas e de corda vibrante apresentam um preço semelhante por unidade. Para além disto, observa-se que os *dataloggers multi-channel*, analógico e de corda vibrante, também apresentam o mesmo preço médio.

Pelo exposto, opta-se pela alteração das células de carga para sensores de corda vibrante. Associado a esta alteração, é necessário também ajustar o *datalogger*, concretamente para o tipo “*VW node Multi-channel*”. Tal como na anterior opção, serão instalados 4 *dataloggers* em obra, um por cada alçado, sendo que cada *datalogger* terá a ligação de duas células de carga. No entanto, estes equipamentos permitem a ligação de 4 ou 5 sensores, possibilitando ainda a ligação dos piezómetros de corda vibrante ao *datalogger* mais próximo.

Assim, sem perder qualidade técnica e sem acrescentar mais custos, é possível a otimização do sistema automático com a remoção dos dois *dataloggers* “*VW node Single-channel*” anteriormente conectados aos piezómetros.

Na Tabela 30 apresenta-se a análise económica de pré-monitorização para o cenário de obra com a otimização 2.

Tabela 30 – Síntese da análise económica de pré-monitorização para o cenário de obra – Otimização 2

Cenário de obra		
	Aquisição manual	Aquisição automática
Total pré-monitorização	31 982 €	189 518 €
Total pré-monitorização Otimização 1	31 982 €	175 518 €
Total pré-monitorização Otimização 2	31 982 €	173 768 €

Na Tabela 31 resumem-se os principais valores a analisar para as diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra para o cenário de obra completo.

Tabela 31 – Síntese económica do cenário de obra para diferentes frequências de leitura e de deslocação à obra

Cenário de obra							
		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
Aquisição de dados		Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática
Frequência de leituras		22 vezes mês	Hora a hora	12 vezes mês	Hora a hora	4 vezes mês	Hora a hora
50 km	Total campanha	502 €	N/A	502 €	N/A	502 €	N/A
	Total mês	11 044 €	950 €	6 024 €	950 €	2 008 €	950 €
250 km	Total campanha	702 €	N/A	702 €	N/A	702 €	N/A
	Total mês	15 444 €	950 €	8 424 €	950 €	2 808 €	950 €
500 km	Total campanha	952 €	N/A	952 €	N/A	952 €	N/A
	Total mês	20 944 €	950 €	11 424 €	950 €	3 808 €	950 €

Na aquisição automática, por cada método surgia uma mensalidade de 900 €, por sua vez para o plano de instrumentação completo ocorre uma mensalidade de 950 €. O valor da plataforma *on-line* mantem-se em 750 €, mas agora o relatório mensal de monitorização apresenta um valor de 200 €, respeitante a cinco métodos de instrumentação.

Para a aquisição manual considera-se um valor de 327 € para a leitura completa de todos os equipamentos/instrumentos e dispositivos inerentes ao plano de instrumentação definido. Para o relatório interpretativo até cinco métodos de instrumentação surge um custo de 125 €, perfazendo um total de 452 €. A este valor é necessário somar o custo variável da deslocação consoante a distância à obra, nomeadamente de 50, 250 e 500 km. A soma destas três parcelas constitui o valor total a considerar por campanha de aquisição manual.

No Anexo VIII – Análise económica para o cenário de obra – apresentam-se, na íntegra, todos os valores e cálculos considerados na sua análise económica, com e sem otimização.

[página propositadamente em branco]

Capítulo VII

Análise técnico-económica dos resultados do caso de estudo

[página propositadamente em branco]

7. Análise técnico-económica dos resultados do caso de estudo

7.1. Generalidades

Após a aplicação da análise económica a caso de estudo teórico, inicialmente de forma individual por método de instrumentação e, por último, para o total do plano de instrumentação, importa agora analisar e discutir do ponto de vista técnico-económico os resultados apresentados no anterior Capítulo e constantes na íntegra nos respetivos anexos.

Primeiramente, serão analisados os resultados para cada método, sendo que estes correspondem a uma análise completa por obra, isto é, como se a monitorização de determinada obra fosse executada com um só método de instrumentação.

Finalizada a análise dos cinco métodos, serão depois analisados técnico-economicamente os resultados obtidos para o cenário de obra completo, nomeadamente com os valores respeitantes à otimização 2 referida no capítulo anterior, que se considera ser a mais aproximada da realidade de um Projeto/obra com escavação em meio urbano.

Em cada subcapítulo será apresentado um gráfico de análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática e uma tabela respeitante ao ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura. A análise e interpretação do gráfico e da tabela deverá, idealmente, ser realizada em conjunto.

Como complemento, nos anexos IX a XIV, serão apresentados os gráficos e as tabelas de ponto ótimo da monitorização automática associados à análise de custo-benefício.

7.2. Alvos/Prismas

Do ponto de vista exclusivamente económico, verifica-se, para os alvos/prismas, uma grande diferença de valores na fase de pré-monitorização. Nesta fase, entre a aquisição manual e a automática, existe uma diferença de 67 100 €, sendo em grande parte explicável pelo preço de aquisição da estação total com *software* para leituras automáticas e remotas e pelo *datalogger* associado a este.

No Gráfico 5 apresenta-se a análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática, enquanto na Tabela 32 surge o ponto ótimo da aquisição automática face às várias hipóteses em estudo para a deslocação e para as frequências de leitura.

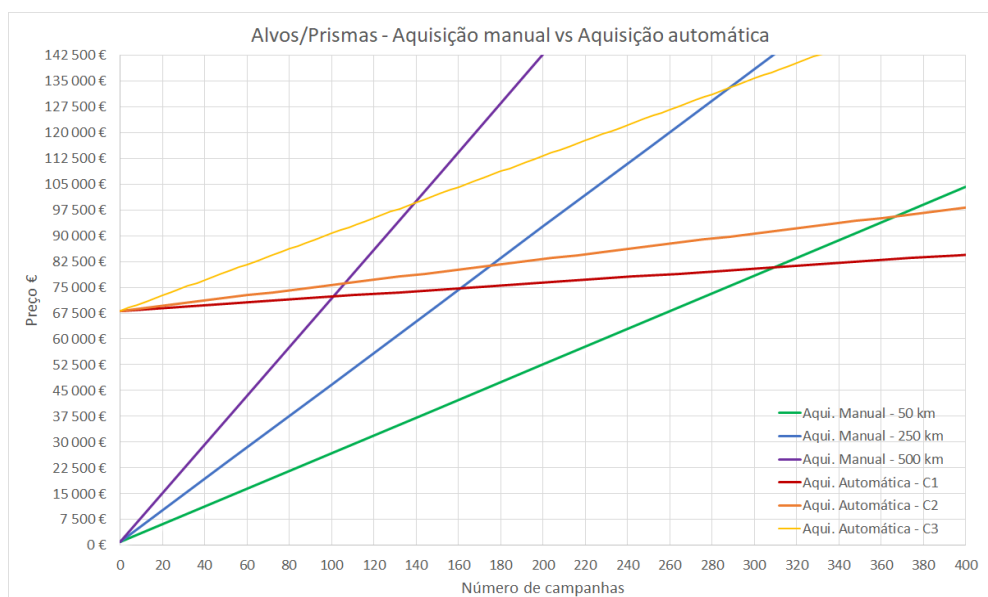


Gráfico 5 – Análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática para os alvos/prismas

Tabela 32 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para os alvos/prismas

	Alvos/Prismas								
	"Aqui. Manual – 50 km"			"Aqui. Manual – 250 km"			"Aqui. Manual – 500 km"		
	"Aqui. Automática"			"Aqui. Automática"			"Aqui. Automática"		
	"C1"	"C2"	"C3"	"C1"	"C2"	"C3"	"C1"	"C2"	"C3"
Número de campanhas	309	369	2033	161	175	288	101	106	139
Número de meses	15	31	X	8	15	72	5	9	35
Preço de Monitorização (€)	80 784	96 264	525 576	74 800	81 212	132 966	72 570	76 110	99 474

Analisando de forma integrada o Gráfico 5 e a Tabela 32, verifica-se que, para uma deslocação de 50 km (linha verde) com uma frequência de leitura semanal, a monitorização automática nunca será economicamente viável (linha amarela). Este facto prende-se com a grande diferença de valores de pré-monitorização e com valores mensais bastante semelhantes entre a aquisição manual e a aquisição automática.

Para além do cenário mencionado, analisando a Tabela 32, destacam-se três valores onde a monitorização automática apresenta mais-valia económica a muito longo termo, nomeadamente para outro cenário com deslocação de 50 km e para frequência de leitura semanal na deslocação de 250 e 500 km.

Assim, comparando a aquisição automática com uma frequência trissemanal (linha laranja) para uma deslocação de 50 km (linha verde), verifica-se que só ao final de 31 meses de monitorização será vantajoso o sistema automático. No que respeita a uma frequência de leitura semanal (linha amarela), com deslocação de 250 km (linha azul) e de 500 km (linha roxa), a monitorização automática seria uma mais-valia, respetivamente, ao fim de 72 meses (288 campanhas) e de 35 meses de monitorização (139 campanhas).

Da tabela verificam-se ainda dois valores em que a monitorização automática precisa de mais de um ano até ser financeiramente mais vantajosa que a aquisição manual. Estas situações ocorrem quando se compara a aquisição automática com a leitura manual diária para uma deslocação de 50 km, sendo necessárias 309 campanhas, equivalentes a 15 meses, para o sistema automático apresentar um custo mais reduzido. A outra situação verifica-se na comparação com uma frequência trissemanal, de 12 vezes por mês, para uma deslocação de 250 km. Neste caso seriam necessárias 175 campanhas, ou seja, 15 meses de monitorização, até a monitorização automática ser mais vantajosa.

Relativamente aos cenários onde o automático é rentável face ao manual num período inferior a um ano, destacam-se três casos. Para leituras diárias manuais com deslocação de 250 km, o sistema automático será vantajoso após 161 campanhas, completando 8 meses de monitorização.

Por sua vez, para deslocações de 500 km, com leitura manual diária ou trissemanal, a monitorização automática apresenta um custo inferior, face à monitorização manual, ao fim de 101 campanhas (5 meses) e de 106 campanhas (9 meses), respetivamente.

Em síntese, face ao valor de pré-monitorização para a aquisição automática, observa-se que, na generalidade dos cenários, são precisos vários meses de monitorização até o sistema automático ser mais vantajoso economicamente. Dos nove cenários em análise, três destes situam-se num

período de rentabilidade inferior a um ano, dois cenários num período de 1 a 2 anos e os restantes superiores a dois anos de monitorização.

Por último, para os três cenários com vantagem económica em menos de um ano, mas também para dois cenários com rentabilidade até 15 meses, realça-se que, embora a sua vantagem económica possa ser superior ao período considerado para monitorização, estes apresentam várias vantagens técnicas e operacionais. A título de exemplo refere-se que o sistema automático apresenta uma maior precisão, uma maior frequência de dados, incluindo 7 dias por semana, e uma maior confiança dos mesmos. Para além disto, em caso de necessidade é possível ainda aumentar a frequência de leituras (até poucos minutos entre elas), sem necessidade de maiores custos, e também está salvaguarda a hipótese de algum atraso na execução da empreitada.

Com a valorização técnica segundo os critérios definidos no presente estudo, conforme se apresenta no Anexo IX, o tempo de mais-valia do sistema automático relativamente ao manual diminui significativamente. Considerando um período de monitorização de 12 meses e um benefício de duas vezes para a aquisição automática, contata-se que esta é mais vantajosa face à opção manual em cinco dos nove cenários em estudo, aumentando para sete cenários se for considerado um benefício de três vezes.

7.3. Inclínómetros verticais

Economicamente, à semelhança dos alvos/prismas, verifica-se que o valor de pré-monitorização da aquisição manual e automática apresenta uma diferença de 61 806 €, em prejuízo da monitorização automática.

No Gráfico 6 apresenta-se a análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática, enquanto na Tabela 33 surge o ponto ótimo da aquisição automática face às várias hipóteses em estudo para a deslocação e para as frequências de leitura.

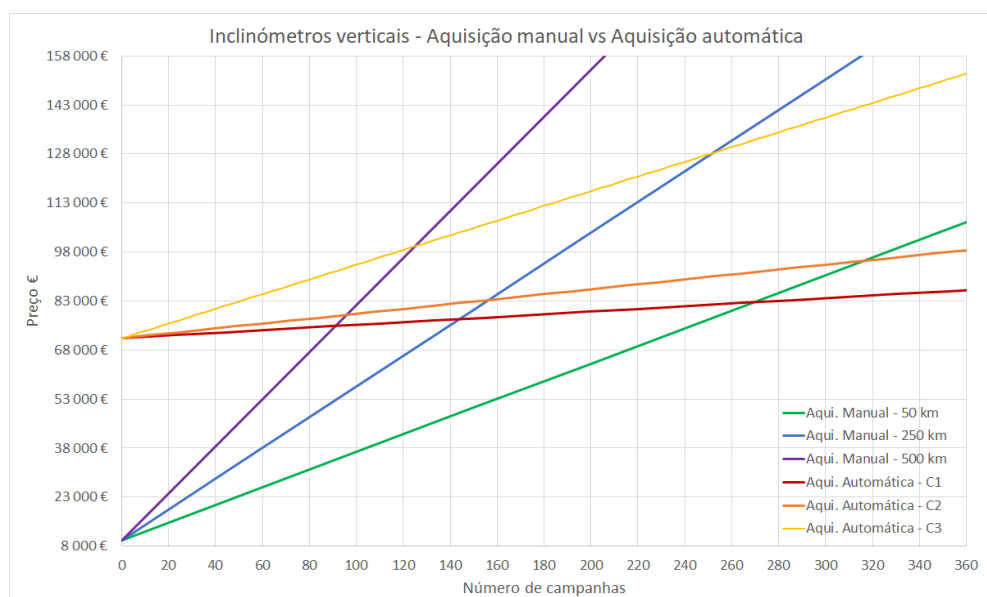


Gráfico 6 – Análise económica de aquisição manual versus aquisição automática para os inclinómetros verticais

Tabela 33 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para os inclinómetros verticais

	Inclinómetros verticais								
	“Aqui. Manual – 50 km”			“Aqui. Manual – 250 km”			“Aqui. Manual – 500 km”		
	“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”		
	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”
Número de campanhas	270	317	1373	142	154	253	91	95	125
Número de meses	13	27	X	7	13	64	5	8	32
Preço de Monitorização (€)	82 708	95 398	380 518	76 548	82 188	128 718	75 328	78 208	99 808

Da análise conjunta do gráfico e da tabela, verifica-se que, para uma deslocação de 50 km (linha verde) com uma frequência de leitura semanal (“C3”), a monitorização automática nunca será economicamente viável. Este facto está associado à grande diferença de valores de pré-monitorização e aos valores mensais bastante parecidos entre as aquisições.

Considerando ainda a comparação com uma leitura semanal (“C3” – linha amarela), observa-se, que, mesmo para uma deslocação de 250 ou 500 km, a aquisição automática demora muito tempo a ser financeiramente vantajosa. Concretamente, para uma deslocação de 500 km (linha roxa), só ao fim de mais de dois anos e meio (32 meses) é que a monitorização automática faria

sentido face à monitorização manual. No caso de deslocação de 250 km seriam precisos 64 meses de monitorização manual até o sistema automático ficar mais barato.

Para uma deslocação pequena de 50 km (linha verde) e para frequências de leitura superiores, leitura diária ou trissemanal (linha vermelha e laranja), a aquisição automática é economicamente superior à aquisição manual, respetivamente, ao 13º mês e ao 27º mês.

Por sua vez, quando a deslocação à obra apresenta um peso maior no valor por campanha da aquisição manual, a diferença para o sistema automático fica mais ténue. Para deslocações mais significativas e para frequências de leitura superiores, a aquisição automática é economicamente melhor que a aquisição manual aproximadamente num período de monitorização de um ano.

Para uma deslocação de 250 km (linha azul) com leituras trissemanais, 12 leituras por mês (linha laranja), a aquisição automática é mais vantajosa ao 13º mês, enquanto para leituras diárias, 22 leituras por mês (linha vermelha), a aquisição automática é mais vantajosa ao 7º mês.

Este cenário torna-se ainda mais evidente quando considerada uma deslocação de ida e volta de 500 km (linha roxa). Assim, para leituras trissemanais (linha laranja), a monitorização automática é vantajosa a partir do 8º mês e a partir do 5º mês para leituras diárias (linha vermelha).

Em suma, atendendo à grande diferença de valor de pré-monitorização, a aquisição automática demora algum tempo a ser economicamente mais vantajosa que a monitorização manual. Como expectável, em polos opostos, surge a monitorização automática quando comparada com uma leitura manual diária com deslocação de 500 km, com um ponto de inversão a partir dos 5 meses. Por sua vez, a monitorização automática, quando comparada com uma leitura manual por semana com deslocação de 50 km, nunca apresentará vantagens económicas.

Para os cinco cenários onde a monitorização automática é economicamente mais vantajosa que a monitorização manual, num período de aproximadamente um ano ou menos, destaca-se alguns pontos técnicos. Assim, mesmo que o número de meses obtido seja superior ao estimado para a monitorização de obra é importante considerar que o sistema automático apresenta um conjunto de benefícios adicionais como seja uma maior precisão, uma maior frequência de dados e uma maior confiança dos mesmos. Para além disto, em caso de necessidade é possível ainda aumentar a frequência de leituras (até poucos minutos entre elas), sem necessidade de maiores custos, e também está salvaguarda a hipótese de algum atraso na execução da empreitada.

Aplicando a metodologia de benefício ou de valorização técnica apresentada no Capítulo V, surge uma redução de tempo significativa para a instrumentação automática ser vantajosa relativamente à manual, conforme consta nos gráficos e tabelas do Anexo X. A título de exemplo, para um período de monitorização de 12 meses e um benefício do sistema automático de duas

vezes, observa-se que este é mais vantajoso face à opção manual em sete dos nove cenários, aumentando para oito cenários se for considerado um benefício de três vezes.

7.4. Células de carga

Relativamente às células de carga, a análise económica de pré-monitorização para a aquisição manual e automática de dados revela uma diferença de 8 500 €. Esta diferença encontra-se associada ao *datalogger* e *gateway*, uma vez que o valor, por unidade, das células é igual.

No Gráfico 7 apresenta-se a análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática, enquanto na Tabela 34 surge o ponto ótimo da aquisição automática face às várias hipóteses em estudo para a deslocação e para as frequências de leitura.

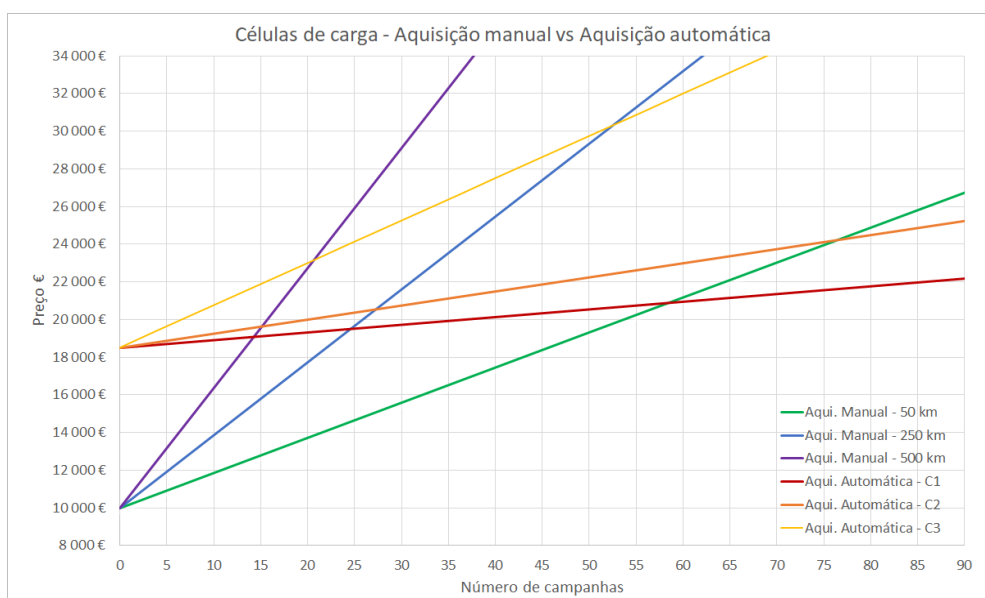


Gráfico 7 – Análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática para as células de carga

Tabela 34 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para as células de carga

	Células de carga								
	"Aqui. Manual – 50 km"			"Aqui. Manual – 250 km"			"Aqui. Manual – 500 km"		
	"Aqui. Automática"			"Aqui. Automática"			"Aqui. Automática"		
	"C1"	"C2"	"C3"	"C1"	"C2"	"C3"	"C1"	"C2"	"C3"
Número de campanhas	59	77	X	25	28	53	14	16	21
Número de meses	3	7	X	2	3	14	1	2	6
Preço de Monitorização (€)	20 974	24 322	X	19 650	20 808	30 458	18 904	20 176	23 356

Observando conjuntamente o Gráfico 7 e a Tabela 34 é perceptível, uma vez mais, que para uma deslocação de 50 km (linha verde) considerando uma campanha por semana, num total de 4 campanhas por mês (linha amarela), a monitorização automática nunca será uma hipótese se o critério for exclusivamente monetário.

Para além do exposto, analisando a Tabela 34, verifica-se que só num cenário a aquisição automática precisa de mais de um ano de monitorização até ser mais rentável que a aquisição manual. Este caso ocorre para uma deslocação de 250 km (linha azul) com uma frequência de leitura manual por semana (linha amarela), sendo necessárias 53 campanhas, 14 meses, para o sistema automático ser economicamente vantajoso.

Nas restantes hipóteses considerando uma deslocação de 50 km, constata-se que a monitorização automática passa a ser mais económica a partir do terceiro e do sétimo mês de monitorização, respetivamente, quando comparada com frequência de leitura manual diária (linha vermelha, “C1”) e trissemanal (linha laranja, “C2”).

Para uma deslocação à obra de 250 km (linha azul), os valores expostos são ainda mais baixos. Assim, a aquisição automática, quando comparada com leituras manuais diárias, precisa de 25 campanhas, 2 meses, para ser mais vantajosa, necessitando de 28 campanhas, 3 meses, quando comparada com 12 campanhas manuais por mês.

Por último, a comparação de monitorização automática com manual para uma deslocação de 500 km, revela que, no cenário mais desfavorável, correspondente a leitura semanal (linha amarela), precisa de 6 meses de monitorização (21 campanhas) para o sistema automático ser a melhor opção. Quando comparado com leituras diárias, bastam 14 campanhas, menos de 1 mês para ser economicamente mais baixo. Para o cenário de 12 campanhas por mês, são precisos 2 meses para a monitorização automática ser mais económica que a manual.

Pelo exposto, e como demonstrado no Gráfico 7 e a Tabela 34, verifica-se que a monitorização automática com células de carga apresenta, na maioria das hipóteses em estudo, um excelente rácio e, com isso, uma excelente perspetiva de real aplicação nas obras de escavação a céu aberto em meio urbano.

Se a esta análise económica for adicionada a valorização técnica segundo os critérios definidos no presente estudo, conforme se apresenta no Anexo XI, o tempo de mais-valia do sistema automático relativamente ao manual diminui significativamente. Como exemplo, aplicando-se um fator de multiplicação de dois ao sistema manual, correspondente a um benefício de duas vezes para a monitorização automática, constata-se que, logo à partida, em todos os cenários, a opção mais benéfica é a automática.

7.5. Piezómetros

A análise económica de pré-monitorização dos piezómetros para a aquisição manual e automática de dados revela uma diferença de 7 030 €. Esta diferença encontra-se associada ao *datalogger* e *gateway*, mas também ao valor de aquisição dos piezómetros de corda vibrante.

No Gráfico 8 apresenta-se a análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática. Por sua vez, na Tabela 35 surge o ponto ótimo da aquisição automática face às várias hipóteses em estudo para a deslocação e para as frequências de leitura.

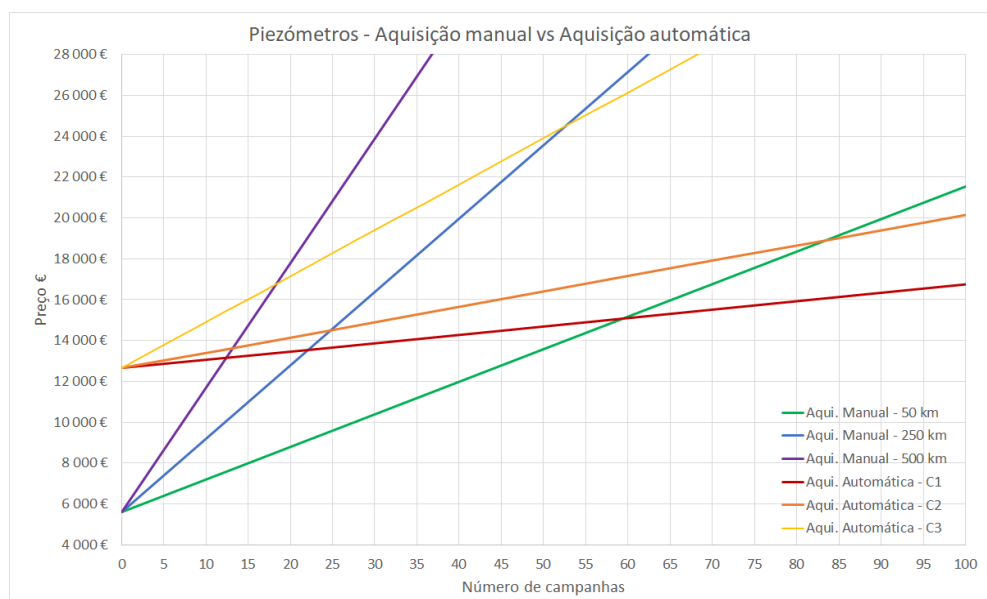


Gráfico 8 – Análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática para os piezómetros

Tabela 35 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para os piezómetros

	Piezómetros								
	"Aqui. Manual – 50 km"			"Aqui. Manual – 250 km"			"Aqui. Manual – 500 km"		
	"Aqui. Automática"			"Aqui. Automática"			"Aqui. Automática"		
	"C1"	"C2"	"C3"	"C1"	"C2"	"C3"	"C1"	"C2"	"C3"
Número de campanhas	60	85	X	22	26	52	11	13	19
Número de meses	3	8	X	1	3	13	1	2	5
Preço de Monitorização (€)	15 162	19 137	X	13 520	14 956	24 290	12 321	13 539	17 193

Analisando o Gráfico 8 e a Tabela 35 verifica-se, que, para uma deslocação de 50 km (linha verde) considerando uma campanha por semana, num total de 4 campanhas por mês (linha amarela), a monitorização automática nunca será economicamente rentável.

Em concordância com as células de carga, analisando a Tabela 35, observa-se que só em um cenário a aquisição automática precisa de mais de um ano de monitorização até ser economicamente mais vantajosa que a aquisição manual. Esta situação ocorre para uma deslocação de 250 km (linha azul) e para uma frequência de leitura manual por semana (linha amarela), sendo necessárias 52 campanhas, para que o sistema automático apresente um custo inferior ao manual.

Para as restantes hipóteses, com uma deslocação de 50 km (linha verde), constata-se que a monitorização automática passa a ser mais rentável financeiramente a partir do 3º e 8º mês de monitorização, respetivamente, quando comparada com frequência de leitura manual diária (linha vermelha, “C1”) e trissemanal (linha laranja, “C2”).

Considerando uma deslocação à obra de 250 km (linha azul), os valores apresentados são ainda mais baixos. Assim, a aquisição automática, quando comparada com leituras manuais diárias, precisa somente de 22 campanhas, 1 mês exato, para ser mais vantajosa, requerendo 26 campanhas, 3 meses, quando comparada com leituras trissemanais (12 campanhas por mês).

Por fim, em comparação com as várias hipóteses de deslocação de 500 km para leituras manuais (linha roxa), observa-se que a monitorização automática é economicamente mais vantajosa em menos de meio ano de monitorização. Para o cenário mais desfavorável, de leitura semanal (linha amarela), a aquisição automática precisa de 5 meses (19 campanhas) para ser a melhor opção. Quando comparada com leituras diárias, bastam 11 campanhas, menos de um mês para apresentar um custo inferior. Para o cenário de 12 campanhas por mês (“C2”), são precisos 2 meses para a monitorização automática ser economicamente mais vantajosa que a manual.

Uma vez mais, pelo explicitado e demonstrado no Gráfico 8 e a Tabela 35, verifica-se que a monitorização automática com piezómetros apresenta, na maioria dos cenários em estudo, um excelente rácio económico. Assim sendo, é recomendável a sua consideração qualquer obra de escavação a céu aberto em meio urbano.

Se ao fator económico for adicionada a ponderação de valorização técnica segundo os critérios definidos no presente estudo, o tempo de mais-valia do sistema automático relativamente ao manual diminui significativamente, conforme se apresenta no Anexo XII. Como exemplo, para uma valorização de duas vezes do sistema automático, constata-se que em oito dos nove cenários em estudo a opção automática é vantajosa logo ao primeiro mês de monitorização.

7.6. Tiltmeters

Relativamente aos *tiltmeters*, constata-se que o valor de pré-monitorização para a aquisição automática é mais dispendioso em 13 100 € que o respetivo valor para a aquisição manual.

No Gráfico 9 apresenta-se a análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática de dados. Por sua vez, na Tabela 36 demonstra-se o ponto ótimo da aquisição automática face às várias hipóteses para a deslocação e para as frequências de leitura estudadas.

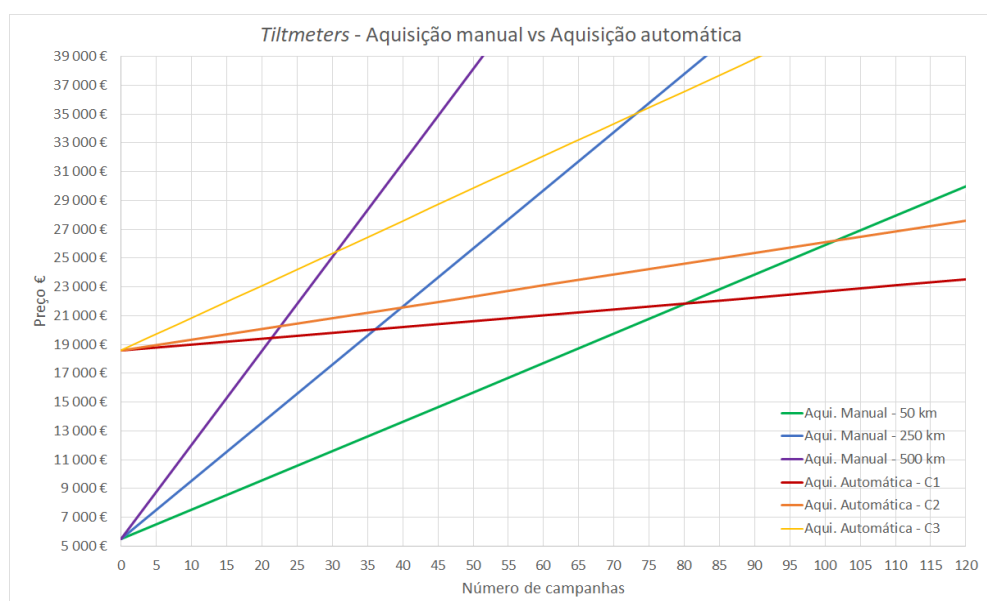


Gráfico 9 – Análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática para os *tiltmeters*

Tabela 36 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para os *tiltmeters*

	Tiltmeters								
	"Aqui. Manual – 50 km"			"Aqui. Manual – 250 km"			"Aqui. Manual – 500 km"		
	"Aqui. Automática"			"Aqui. Automática"			"Aqui. Automática"		
	"C1"	"C2"	"C3"	"C1"	"C2"	"C3"	"C1"	"C2"	"C3"
Número de campanhas	80	102	X	36	40	74	21	23	31
Número de meses	4	9	X	2	4	19	1	2	8
Preço de Monitorização (€)	21 810	26 298	X	20 034	21 650	35 386	19 224	20 532	25 764

Analisando os dados dos *tiltmeters*, verifica-se também que, para uma deslocação de 50 km com leitura manual semanal (“C3”), 4 campanhas por mês, a monitorização automática nunca será economicamente superior.

Considerando ainda uma deslocação de 50 km (linha verde), observa-se que a monitorização automática é economicamente mais rentável a partir do 9º mês quando comparada com leituras trissemanais de aquisição manual (linha laranja). Para esta deslocação, com frequência de aquisição manual diária (linha vermelha), verifica-se que a aquisição automática é mais vantajosa a partir da campanha 80, correspondendo a 4 meses de monitorização.

Para uma deslocação de 250 km (linha azul), constata-se, uma vez mais, que para uma reduzida frequência de leituras (linha amarela), só a longo prazo, nomeadamente 19 meses, é que a opção automática faz sentido face à manual. No entanto, quando comparada a aquisição automática com frequências de leitura manual superiores, estes valores diminuem acentuadamente.

Assim, para um total de 12 campanhas por mês (linha laranja) são precisos 4 meses de monitorização para o automático ser mais vantajoso. Se for considerada a hipótese de leituras diárias de aquisição manual (linha vermelha), bastam 2 meses, 36 campanhas de monitorização, para a aquisição automática ser a melhor solução económica.

Analisando os cenários associados a uma deslocação de 500 km para a aquisição manual (linha roxa), constata-se que para uma baixa frequência de leituras (linha amarela) serão precisos 8 meses de monitorização para o automático ser rentável financeiramente.

Quando considerada uma deslocação de 500 km com uma frequência de leituras elevada, leitura diária ou três vezes por semana, constata-se que rapidamente a monitorização automática é economicamente mais vantajosa. Para o cenário de comparação com leituras manuais três vezes por semana, são necessárias 23 campanhas, 2 meses de monitorização, para o sistema automático ser a melhor hipótese. Se compararmos com uma deslocação diária de 500 km, bastam 21 leituras, menos de um mês para o automático ser mais rentável.

Pelo exposto, destacando-se sobretudo a análise da Tabela 36, verifica-se que a aquisição automática de dados com *tiltmeters* apresenta, na generalidade das hipóteses estudadas, um excelente rácio para a real aplicação em obras.

Do ponto de vista técnico, realça-se novamente que, para a aquisição manual, foi adotado um instrumento uniaxial, enquanto para a monitorização automática adotou-se o instrumento triaxial *wireless tiltmeter*. Este instrumento, para além da monitorização da inclinação e de rotação, permite, através destes valores, calcular a deformação no seu ponto de instalação. Desta forma, verifica-se que estes instrumentos são tecnicamente e economicamente uma excelente opção

para complementar as leituras dos inclinómetros verticais e as leituras dos alvos. Relativamente à leitura dos alvos, os *wireless tiltmeters* podem ser um substituto ou um complemento.

A aplicação da metodologia de benefício ou valorização técnica apresentada no Capítulo V implica uma vantagem dos equipamentos automáticos em menos tempo que os acima referidos, conforme consta nos gráficos do Anexo XIII. A título de exemplo, aplicando um benefício de duas vezes para o sistema automático, observa-se que em sete dos nove cenários esta metodologia de monitorização é vantajosa num período igual ou inferior a dois meses.

7.7. Cenário de obra

A análise económica da fase de pré-monitorização para o cenário de obra (otimização 2) reflete em grande parte o demonstrado nos anteriores subcapítulos. Para o plano de instrumentação completo verifica-se que, entre o valor de aquisição manual e o valor do automático, existe uma diferença de 141 786 € (ordem de grandeza válida à data e para os valores considerados), sendo esta diferença fortemente condicionada pelo valor de aquisição dos instrumentos e outros componentes para os métodos de instrumentação dos inclinómetros verticais e dos alvos/prismas.

Importa salientar que, ao longo do presente subcapítulo será abordado o cenário de obra com a otimização 2, considerando-se esta a versão final para o plano de instrumentação definido para o caso de estudo teórico.

Na Tabela 37 exhibe-se o ponto ótimo da aquisição automática face às várias hipóteses em estudo para a deslocação e para as frequências de leitura. Por sua vez, no Gráfico 10 ilustra-se a análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática.

Tabela 37 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para o cenário de obra – otimização 2

	Cenário de obra – Otimização 2								
	“Aqui. Manual – 50 km”			“Aqui. Manual – 250 km”			“Aqui. Manual – 500 km”		
	“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”		
	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”
Número de campanhas	309	335	536	214	227	305	156	162	198
Número de meses	14	27	134	9	18	76	7	13	49
Preço de Monitorização (€)	187 100	200 152	301 054	182 210	191 336	246 092	180 494	186 206	220 478

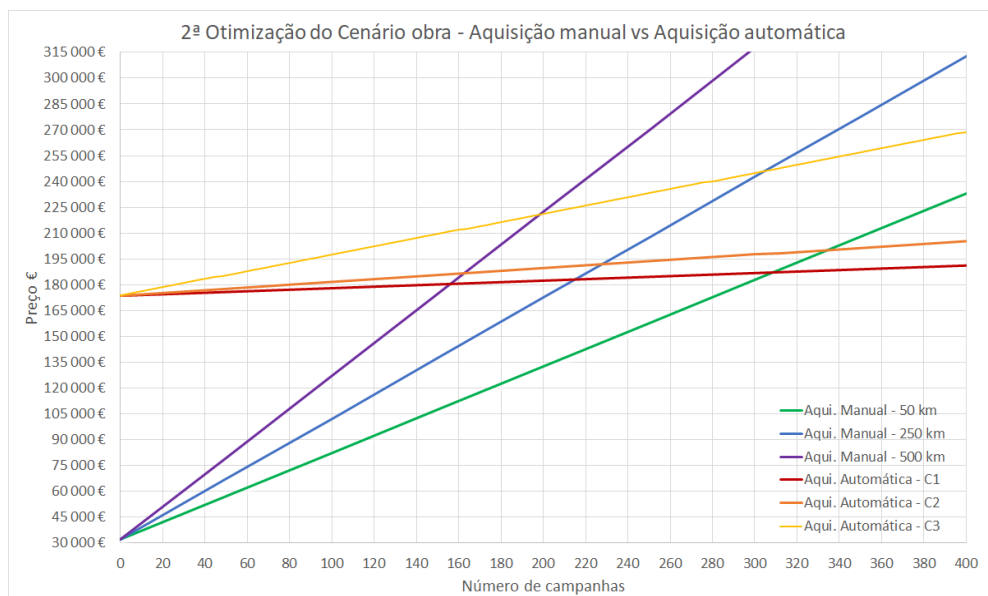


Gráfico 10 – Análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática para o cenário de obra com a otimização 2

Da análise integrada da Tabela 37 e do Gráfico 10 constata-se, agora para o cenário de projeto/obra completo, que a monitorização automática não é uma vantagem económica quando comparada com a aquisição manual, para frequências de leitura baixas. Comparando a aquisição automática com uma frequência de leitura semanal, num total de 4 campanhas por mês (linha amarela), observa-se que em qualquer deslocação considerada (50, 250 e 500 km), a sua vantagem económica será a longo prazo ou muito longo prazo.

Para uma deslocação de 50 km (linha verde), com aquisição manual por semana, a monitorização automática só é economicamente mais vantajosa que a monitorização manual para períodos superiores a 134 meses de monitorização. Do ponto de vista exclusivamente económico, esta dificilmente será uma hipótese exequível.

Considerando na mesma uma frequência de leitura semanal, mas agora associada a uma deslocação de 250 km (linha azul) e de 500 km (linha roxa), constata-se que a aquisição automática necessita de 76 meses e 49 meses, respetivamente, até apresentar um custo inferior ao da monitorização manual.

Analisando os restantes dados expostos na Tabela 37 é possível dividi-los em duas partes, consoante o período necessário para a monitorização automática ser economicamente rentável face à opção manual. Assim, opta-se por dividir os cenários em que a monitorização automática necessita de um período superior a um ano e meio (18 meses) dos correspondentes a um período de monitorização inferior a este.

Relativamente a um período de monitorização igual ou superior a 18 meses, destacam-se duas situações. A monitorização automática, quando comparada com uma frequência trissemanal, 12 campanhas por mês (linha laranja), para uma deslocação de 50 km (linha verde) necessita de 27 meses de monitorização para ser mais vantajosa. A outra ocorrência refere-se à comparação da mesma frequência de leituras, mas para uma deslocação de 250 km (linha azul), necessitando de 227 campanhas, 18 meses, até a monitorização automática apresentar um custo inferior.

Por outro lado, também se verificam cenários onde a monitorização automática é economicamente mais favorável que a monitorização manual num período inferior a 18 meses, destacando-se abaixo quatro situações.

Para uma frequência de leitura trissemanal (linha laranja), com uma deslocação associada de 500 km (linha roxa), constata-se que a opção automática apresenta um custo inferior ao fim de 13 meses de monitorização, referentes a 162 campanhas de aquisição manual de dados.

Por último, destacam-se os cenários onde a monitorização automática, regra geral, apresenta maiores vantagens económicas. Estes cenários estão associados à comparação com frequências de leitura altas, no caso, de leituras manuais diárias com uma deslocação de 50 km por dia, a opção automática é mais vantajosa ao fim de 14 meses.

No entanto, para a mesma frequência de leitura diária manual, quando associada a uma deslocação de 250 e de 500 km, a monitorização automática apresenta um custo inferior ao fim de 9 meses e de 7 meses, respetivamente.

Em suma, e concordante com o analisado individualmente por método de instrumentação, a aplicação de monitorização completamente automática é influenciada economicamente pelo valor associado aos inclinómetros verticais e à leitura remota dos prismas topográficos. Contudo, atendendo à exequibilidade de monitorização automática com *tiltmeters*, células de carga e piezómetros, a sua aplicação deve ser devidamente considerada.

A título de exemplo, considerando que não era possível aplicar na íntegra um sistema de aquisição automática de dados, deverá ser avaliada a viabilidade económica da hipótese de um sistema semiautomático. Neste sistema seriam utilizados em aquisição automática os *tiltmeters*, células de carga e piezómetros, sendo a sua leitura complementada por aquisição manual para os inclinómetros verticais e prismas topográficos, ou no caso manual, de alvos topográficos.

Para além disto, a aquisição manual não necessita de ter a mesma frequência de leituras, p. ex. os inclinómetros verticais poderiam apresentar maior frequência e a leitura dos alvos uma menor frequência de leitura. Este facto seria possível porque os *wireless tiltmeter* permitem leituras

triaxiais, servindo uma leitura mais espaçada dos alvos para confirmação e validação dos dados registados pelos *tiltmeters*.

Não obstante do exposto, realça-se, uma vez mais, que a monitorização automática apresenta inquestionável mais-valia técnica face à monitorização manual. Além das vantagens técnicas, permite, em caso de necessidade, frequências de leitura de poucos minutos, devendo-se também ter em conta potenciais atrasos na execução da empreitada, quando considerada a opção de aquisição manual.

Numa análise técnica de maior pormenor, aborda-se, no subcapítulo seguinte, a mais-valia técnica do sistema automático tendo em consideração a valorização intermédia e máxima resultantes da metodologia apresentada no Capítulo V.

7.8. Análise de custo-benefício para o cenário de obra

Atendendo exclusivamente ao aspeto financeiro verifica-se que a monitorização automática é, regra geral, mais dispendiosa; contudo, a comparação realizada não deverá ser tão restritiva e obtusa. O sistema manual encontra-se otimizado por anos de experiência, mas, por sua vez, o sistema automático representa uma possibilidade incomparável de maior frequência de leituras, incluindo fins de semana e feriados, 24h por dia, sem erro de operador, maior exatidão, e maior fiabilidade de resultados. Isto possibilita uma deteção com maior antecedência de tendências evolutivas, e acresce ainda a possibilidade de receção de alertas instantâneos automáticos.

Como referido oportunamente no presente estudo, o benefício (mais-valia) do sistema automático será tanto maior quanto maior for o risco presente em obra. Assim, perante situações de risco elevado, a monitorização automática permite uma deteção de risco com muita brevidade e com grande confiança nos dados obtidos.

Anteriormente, foi definida a ponderação a considerar para cada fator de risco associado a obras de escavação a céu aberto em meio urbano, sendo o resultado do cenário de risco o somatório de todas as ponderações em estudo. Da análise de benefício destacou-se: Ponderação 5 – benefício de 1X no automático; Ponderação 10 – benefício de 1,5X no automático; Ponderação 15 – benefício de 2X no automático; Ponderação 20 – benefício de 2,5X no automático; e Ponderação 25 – benefício de 3X no automático.

Em situações de baixo risco, fator de ponderação 5, admite-se que é indiferente a utilização de sistema automático ou manual, podendo a seleção ser baseada na vertente financeira. Este cenário foi o adotado e explicitado no anterior subcapítulo 7.7.

Seguidamente, pretende analisar-se o plano de instrumentação definido para o caso de estudo teórico, mas considerando fatores de ponderação onde se tem em consideração o risco associado ao projeto. Com esta ponderação é possível determinar um fator de multiplicação para a análise económica do sistema manual, comparando-se com a análise económica do sistema automático.

Na Tabela 38 e nos Gráfico 11 e Gráfico 12 será considerado o benefício de duas e três vezes para a monitorização automática, equivalendo a um fator de multiplicação de duas vezes e três vezes para o total (valor de pré-monitorização e valor de leituras) do sistema de aquisição manual.

Na Tabela 38 exibe-se o ponto ótimo da aquisição automática face às várias hipóteses em estudo para a deslocação e para as frequências de leitura. Nos Gráfico 11 e Gráfico 12 ilustra-se a análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática, respetivamente para um fator de multiplicação de dois e de três para a aquisição manual.

Tabela 38 – Ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para o cenário de obra (otimização 2). Sem e com fator de multiplicação de 2 e 3 vezes para a aquisição manual de dados

	Cenário de obra								
	“Aqui. Manual – 50 km”			“Aqui. Manual – 250 km”			“Aqui. Manual – 500 km”		
	“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”		
	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”
	Otimização 2 (igual a Aquisição manual 1X)								
Número de campanhas	309	335	536	214	227	305	156	162	198
Número de meses	14	27	134	9	18	76	7	13	49
Preço de Monitorização (€)	187 100	200 152	301 054	182 210	191 336	246 092	180 494	186 206	220 478
	Otimização 2 – Aquisição manual 2X								
Número de campanhas	115	119	143	81	83	94	59	61	66
Número de meses	6	10	36	4	7	24	3	6	17
Preço de Monitorização (€)	179 424	183 440	207 536	177 688	180 496	195 940	174 396	180 108	189 628
	Otimização 2 – Aquisição manual 3X								
Número de campanhas	53	55	61	38	38	42	27	27	30
Número de meses	3	5	16	2	4	11	2	3	8
Preço de Monitorização (€)	175 764	178 776	187 812	175 974	175 974	184 398	173 058	173 058	181 626

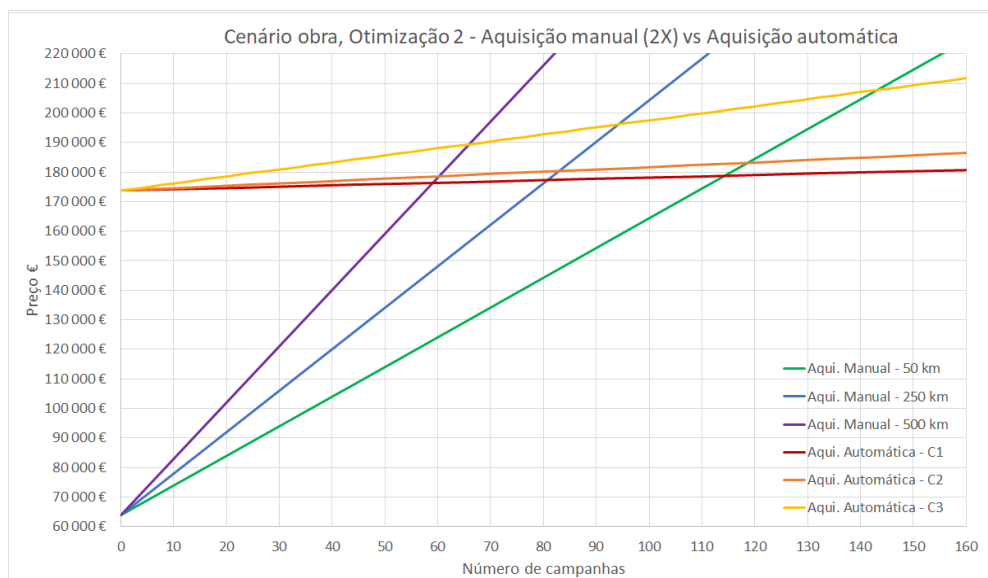


Gráfico 11 – Análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática para o cenário de obra (otimização 2) com aplicação de fator de multiplicação 2 para a aquisição manual

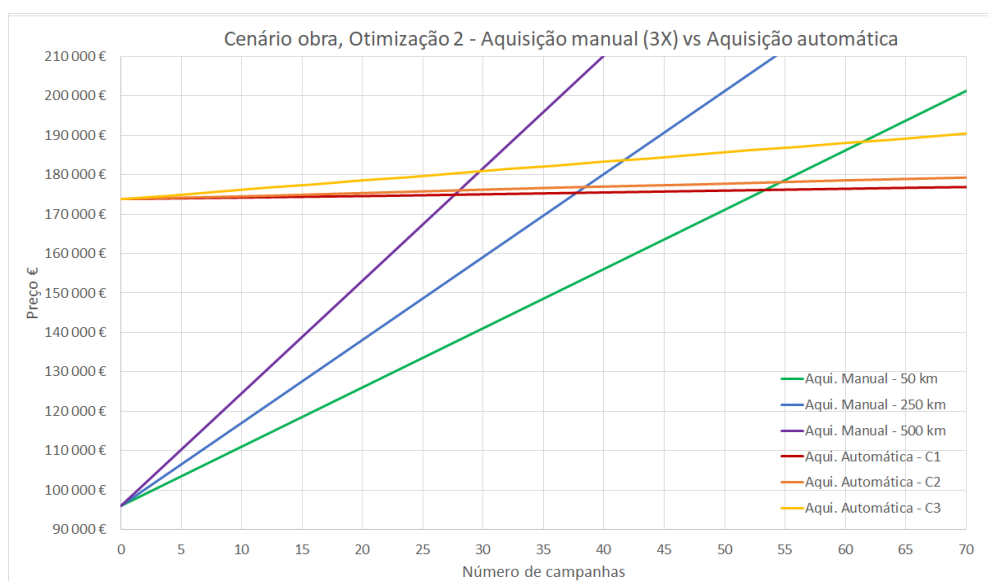


Gráfico 12 – Análise económica de aquisição manual *versus* aquisição automática para o cenário de obra (otimização 2) com aplicação de fator de multiplicação 3 para a aquisição manual

Analisando de forma integrada a Tabela 38 e os Gráfico 11 e Gráfico 12 é perceptível que, quanto maior for o risco presente em obra, maior será o benefício da monitorização automática, e mais rapidamente será mais favorável face a uma monitorização manual.

Dos nove cenários em análise, constata-se na opção com fator de multiplicação 1, isto é, sem benefício para o sistema automático, que sete cenários necessitam de um ou mais anos de monitorização até serem mais vantajosos que a opção manual. Nestes casos, apenas dois cenários

são viáveis em menos de 12 meses. Esses casos ocorrem quando se compara a aquisição automática com uma frequência de leitura manual diária para uma deslocação de 250 km e 500 km, necessitando respectivamente de 9 e 7 meses para apresentar um custo mais baixo.

Para um fator de ponderação 15 proveniente da matriz de risco, correspondendo a um benefício de duas vezes para a monitorização automática, logo com fator de multiplicação de duas vezes para o total da aquisição manual, constata-se que em apenas três cenários a mais-valia ocorre após um ano de monitorização. Estas três situações sucedem-se quando se compara a aquisição automática com uma frequência de leitura manual por semana, independente da deslocação à obra de 50 km (36 meses), 250 km (24 meses) e 500 km (17 meses).

Em sentido inverso, verifica-se que em quatro cenários são precisos 6 meses ou menos de monitorização para a opção automática ser a melhor escolha. Três dos quatro cenários ocorrem quando se compara a aquisição automática com frequências de leitura diárias manuais, verificando-se vantagem face à opção manual ao fim de 6 meses (50 km), 4 meses (250 km) e 3 meses (500 km). O outro cenário é referente à comparação com leituras trissemanais, 12 campanhas por mês, para uma deslocação de 500 km, tendo a opção automática menores custos a partir dos 6 meses.

Por fim, analisa-se as opções decorrentes de um fator de ponderação na matriz de 25, correspondendo a um fator de multiplicação de todo o sistema de aquisição manual de três vezes. Para este caso, verifica-se unicamente um cenário vantajoso para campanhas superiores a um ano de monitorização, nomeadamente 16 meses, resultante da comparação com uma deslocação de 50 km e uma frequência de leitura semanal. No entanto, em caso de obra com alto risco, a opção de monitorização manual com frequência semanal deveria, à partida, estar excluída (o que nem sempre acontece).

Dos restantes dados, destacam-se seis cenários que necessitam de 6 meses ou menos de monitorização para a aquisição automática apresentar um custo inferior face ao da opção manual. Estes seis cenários são verificados na comparação da aquisição automática com frequências de leitura manuais diárias ou trissemanais, para deslocação de 250 e 500 km. Especificamente, quando comparado com leituras trissemanais manuais, verifica-se maior rentabilidade ao 5º mês (50 km), ao 4º mês (250 km) e ao 3º mês (500 km). Por sua vez, em comparação com leituras diárias manuais, verifica-se que a monitorização automática é mais vantajosa ao 3º mês (50 km) e ao 2º mês (250 km e 500 km).

Em síntese, quanto maior for o risco associado a uma obra de escavação a céu aberto em meio urbano, maior será o benefício de utilização de monitorização automática. E a monitorização automática será a melhor opção num período mais curto de tempo.

No Anexo XIV – Análise de custo-benefício para o cenário de obra – apresenta-se a tabela do ponto ótimo da aquisição automática para as várias hipóteses de deslocação à obra e de frequências de leitura para o cenário de obra (otimização 2) com fator de multiplicação de uma vez (fica igual), uma vez e meia, duas vezes, duas vezes e meia e três vezes para a aquisição manual de dados. Expõem-se ainda os gráficos da análise tecno-económica de aquisição manual *versus* aquisição automática, respetivamente, para um fator de multiplicação de uma vez e mais e duas vezes e meia para a aquisição manual.

Capítulo VIII

Considerações finais

[página propositadamente em branco]

8. Considerações finais

Na atualidade, continua a verificar-se existência de projetos de obras de escavação a céu aberto em meio urbano com omissão, carência ou uso desadequado de metodologias. Este facto observa-se em projetos de novas construções e em recuperação de edificado antigo. Por outro lado, de forma recorrente, as metodologias de aquisição manual de dados continuam a ser seleccionadas em detrimento de metodologias mais atuais com demonstrados benefício, não só pela aparente questão económica, mas, por vezes, por desconhecimento ou desconfiança à mudança.

O principal objetivo do presente estudo é contribuir para o desenvolvimento dos planos de instrumentação geotécnica, tentando promover a sua modernização e/ou otimização do ponto de vista técnico e económico.

Com o intuito de tornar o estudo completo e abrangente, para que possa ser aplicado ao maior número de projetos/obras possível, optou-se pela análise técnica, operacional e económica dos métodos de instrumentação mais utilizados nesta tipologia de obras em Portugal.

Ao longo do estudo foram apresentadas as vantagens e desvantagens de cada um dos sistemas de monitorização, sendo evidente que, se nos basearmos exclusivamente em critérios técnicos e operacionais, a opção recai pela monitorização automática. Este tipo de monitorização apresenta uma supremacia técnica evidente, sobretudo pela elevada precisão dos equipamentos e instrumentos, pela ausência de erro do operador, pela maior frequência de leituras, pela possibilidade de um acompanhamento permanente em tempo real e pela receção automática de alertas.

Por sua vez, considerando a opção financeira, verifica-se que a grande mais-valia da monitorização manual é o seu reduzido custo inicial, permitindo ainda que os seus custos sejam diluídos ao longo do tempo de monitorização. Contudo, a aquisição manual necessita que um ou

mais técnicos se desloquem a determinada obra, apresentando uma menor frequência de leituras e potenciais erros associados às leituras. Além disso, entre campanhas de leitura não há registo de dados, podendo nesse intervalo ocorrer variações significativas no terreno e/ou estruturas.

De forma a responder ao objetivo proposto para a dissertação, foi concebida e desenvolvida uma análise técnico-económica de abordagem à definição de planos de instrumentação. A metodologia de estudo apresenta duas partes distintas, nomeadamente uma vertente técnica, com incorporação do benefício, e uma vertente de análise económica. A integração das duas vertentes da metodologia possibilita uma análise técnico-económica completa e crítica.

Da análise económica verifica-se que, comparando a aquisição automática com frequências de leitura manuais baixas, uma vez por semana, e para deslocações curtas, até 50 km, esta é economicamente inviável. Comparando na mesma com uma frequência de leitura semanal, mas agora para deslocações superiores (250 ou 500 km), verifica-se que a monitorização automática já pode ser considerada, contudo, é pouco vantajosa.

Aumentando a frequência de leituras de aquisição manual, para leituras diárias ou três vezes por semana, constata-se que a monitorização automática é cada vez mais vantajosa, sobretudo se considerarmos para a aquisição manual deslocações de 250 ou 500 km. Em concordância, o cenário onde a monitorização automática é mais vantajosa é quando se compara com deslocações de 500 km para leituras manuais diárias.

Estas considerações são válidas para os cinco métodos de instrumentação considerados e para o cenário geral de projeto/obra. Realça-se, contudo, que para as células de carga, para os piezómetros e para os *tiltmeters* a aquisição automática de dados é vantajosa em períodos de monitorização menores. Para os alvos/prismas e para os inclinómetros verticais verifica-se a necessidade de períodos de monitorização superiores para a aquisição automática apresentar custos inferiores face à manual.

Destaca-se, para as células de carga e para os piezómetros, que em seis dos nove cenários em estudo a monitorização automática é vantajosa em 6 ou menos meses, comparando-se com frequências de leitura manual diárias (50, 250 e 500 km), trissemanais (250 e 500 km) e semanais (500 km). Por sua vez, para os *tiltmeters* verifica-se este período de monitorização em cinco dos nove cenários em análise, em comparação com leituras manuais diárias (50, 250 e 500 km) e trissemanais (250 e 500 km).

Para os alvos/prismas e inclinómetros verticais, considerando um período de monitorização de 12 meses, verifica-se em ambos os métodos que só em três cenários a monitorização automática é

proveitosa face à opção manual, nomeadamente comparando com leituras manuais diárias (250 e 500 km) e trissemanais (500 km).

Relativamente ao cenário de obra, verifica-se que, em cinco dos nove cenários estudados, a monitorização automática é vantajosa em 18 ou menos meses, sendo sempre em comparação com frequências de leitura manual de uma vez por dia (50, 250 e 500 km) ou três vezes por semana (250 e 500 km).

Importa ressaltar que estes dados são para o ponto ótimo a partir do qual a monitorização automática apresenta custo inferior face à aquisição manual; no entanto, antes do ponto ótimo, ocorre uma crescente aproximação dos valores. Nesta área é necessário analisar criticamente os resultados, pois o sistema automático apresenta maior custo, mas em caso de atraso nos trabalhos, por variadíssimos motivos, ou pior, se houver algum problema estrutural, a monitorização manual poderá facilmente ultrapassar o custo do sistema automático.

Verificando o aspeto meramente financeiro, o sistema automático é mais caro que o sistema manual, mas a comparação não deverá ser tão linear. Por um lado, o sistema manual está otimizado por anos de experiência em comparação com o sistema automático. Este último apresenta, porém, incomparável possibilidade de maior frequência de leituras, menor erro, maior fiabilidade de resultados e maior antecendência de tendências evolutivas, o que resulta em evidente vantagem técnica deste último.

Para analisar a mais-valia do sistema automático, na outra parte da metodologia concebida, foi desenvolvida uma proposta de benefício para a monitorização automática. Com esta ponderação é possível determinar um fator de multiplicação para a análise económica do sistema manual, comparando-se com a análise económica do sistema automático. Desta forma, realiza-se uma análise de custo-benefício integrada e completa entre as duas monitorizações. Concretizando, para além do valor monetário de cada sistema é apresentada uma ponderação de valorização técnica para o sistema automático.

A análise meramente económica explicitada corresponde a um cenário onde a monitorização automática apresenta um benefício de uma vez (sem mais-valia técnica relativamente ao sistema manual), admitindo-se que a escolha possa ser baseada na vertente financeira. No entanto, considerando, a título de exemplo, um benefício da monitorização automática de duas vezes e de três vezes (benefício máximo), logo com multiplicação da análise económica da aquisição manual por estes fatores, constata-se que a monitorização automática é cada vez mais vantajosa. De forma simples, a monitorização automática é mais vantajosa quanto maior for o risco associado a determinado contexto de enquadramento da obra.

Se à análise económica for adicionada a valorização técnica segundo os critérios definidos no presente estudo, por exemplo, benefício de duas e três vezes, verifica-se que em todos os cenários em estudo para as células de carga a opção automática passa a ser a mais vantajosa.

Quando aplicado aos piezómetros, constata-se para um benefício de duas vezes que em oito dos nove cenários em estudo a opção automática é vantajosa logo ao primeiro mês. Para um benefício de três vezes a opção automática é à partida mais vantajosa que a opção manual.

Para os *tiltmeters*, num benefício de duas vezes, observa-se que em sete dos nove cenários estudados a monitorização automática é vantajosa em dois ou menos meses, enquanto para um benefício de três vezes a opção automática é vantajosa logo ao primeiro mês de monitorização.

Para os alvos/prismas e para os inclinómetros, considerando um período de monitorização de 12 meses, verifica-se que, com um benefício de duas vezes para a aquisição automática, esta é mais vantajosa em cinco e em sete dos nove cenários, respetivamente. Por sua vez, para um benefício de três vezes, constata-se que a opção automática é vantajosa para os alvos/prismas em sete cenários e para os inclinómetros em oito dos nove cenários em estudo.

Relativamente ao caso de obra, considerando também um período de monitorização de 12 meses, observa-se que, para um benefício de duas vezes, a monitorização automática é vantajosa em seis dos nove cenários. Para o caso extremo, com benefício de três vezes, a opção automática é vantajosa em oito dos nove cenários, considerando um período de monitorização de 12 meses.

Como referido, o sistema manual está otimizado por anos de experiência, enquanto para o sistema automático pode-se promover a sua otimização teórica, considerando-se:

- Maior fiabilidade de resultados, logo possibilidade de menor redundância de dados;
- Maior precisão dos equipamentos/instrumentos, logo menos quantidade;
- Receção de alertas automáticos, logo um técnico controla todo o sistema, por maior que este possa ser.

Para além disso, com uma utilização integrada de monitorização automática pode conseguir-se uma otimização do projeto, uma vez que eventuais riscos no decurso de execução e exploração são detetados com maior rigor e atempadamente, permitindo ainda soluções mais vanguardistas e metodologias de execução mais ambiciosas; ou seja, esta opção pode traduzir-se numa economia global do projeto/obra.

Destaca-se que muitas vezes a melhor opção técnica pode não ser possível de aplicar financeiramente, devendo-se nesses casos optar por uma análise semiautomática. Para isso, podem der utilizados, por exemplo, as células de carga, os piezómetros e os *tiltmeters* em

monitorização automática, sendo complementados pela aquisição manual de inclinómetros verticais e de alvos/prismas.

Acresce ainda que na aquisição manual poderão definir-se frequências de leitura diferentes para estes dois métodos de instrumentação, uma vez que os alvos/prismas apresentam a redundância de leituras com os *tiltmeters*. Neste cenário, a aquisição manual de dados para os alvos/prismas pode apresentar um maior espaçamento temporal, servindo de confirmação e validação das deformações registadas pelos *tiltmeters*.

Por último, salienta-se que em caso de cenários gravosos é fundamental a implementação de leituras diárias, ou bidiárias, incluindo noite e fim de semana, que foi algo que não chegou a ser abordado no presente estudo por limitação de tempo (apenas se colocou o cenário de leituras diárias em dias úteis) e que certamente reforça a mais-valia dos sistemas automáticos, tornando-os cada vez mais económicos relativamente aos manuais.

O estudo desenvolvido ao longo desta dissertação apresenta um contributo para a modernização e otimização dos planos de instrumentação geotécnica e estrutural, contudo, por sintetização e por limitações de tempo, vários aspetos ficaram por abordar, pelo que se torna relevante prosseguir com esta temática, enumerando-se algumas sugestões:

- Aplicação da análise técnico-económica a caso de obra real, comparando-se a solução produzida pelo estudo com a adotada em fase de projeto;
- Definir com maior rigor os cenários de risco associados à valorização técnica da monitorização automática, acrescentando maior abrangência na análise de risco;
- Desenvolver a metodologia de análise económica para mais métodos de instrumentação;
- Para os métodos já analisados, acrescentar mais equipamentos e instrumentos de medição;
- Desenvolver a metodologia de análise económica para mais frequências de leitura;
- Desenvolvimento e aplicação da ferramenta de análise económica a sistemas de monitorização semiautomática, utilizando as funcionalidades já criadas e desenvolvendo-se novos campos de análise;
- Aplicação da metodologia de análise técnico-económica a outros tipos de obras de engenharia, como por exemplo, obras lineares (vias de comunicação, túneis, viadutos, etc), barragens, entre outras.

[página propositadamente em branco]

Capítulo IX

Referências bibliográficas

[página propositadamente em branco]

9. Referências bibliográficas

- Baecher, G. (1981). Risk screening for civil facilities. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil Eng. CER, 81(9), 20.
- Barbisan, A., Spadotto, A., Nora, D., Turella, E., & Wergenes, T. (2012). Impactos ambientais causados pela construção civil, Unoesc & Ciência.
- Bassett, R. (2012). A Guide to Field Instrumentation in Geotechnics: Principles, installation, and reading, A Guide to Field Instrumentation in Geotechnics, CCR Press, Boca Raton, Florida.
- Das, B. (2009). Principles of Geotechnical Engineering, 7th edn. Cengage Learning, Stamford.
- Das, B. (2019). Advanced Soil Mechanics. 5th edn. CRC Press, Florida.
- Dogan, O., Bozbeyoglu, P., & Erkoç, N. (2023). Evaluation of Risks by L-Type (5x5) Matrix Method in an Ore Concentration Structure: A Case Study. International Journal of Innovative Approaches in Science Research.
- Dunnicliff, J. (1988). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance, Engineering Geology. Canadá, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Eberhardt, E., & Stead, D. (2011). Geotechnical instrumentation, in Darling, P. (ed.) SME Mining Engineering Handbook, 3rd edn. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Canadá, pp. 551–571.
- Einstein, H., Sousa, R., Karam, K., Manzella, I., & V, K. (2010). Rock slopes from mechanics to decision making. In J. Zhao, V. Labiouse, J.-P. Dudt, & J.-F. Mathier (Eds.), Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering (pp. 3–13). London: CRC Press.
- Encardio (2023a). Product catalog.
- Encardio (2023b). In: <https://www.encardio.com/blog/advantages-of-deep-excavation-monitoring> (consultado em 24 de maio de 2025).
- Encardio (2023c). In: <https://www.encardio.com/blog/top-sensors-for-deep-excavation-monitoring> (consultado em 01 de junho de 2025).
- Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J., & Veicherts, T. (2004). Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2. Tunnelling and Underground Space Technology, 19, pp. 217–237.
- Geokon (2025). Instrumentation catalog.
- GeoSitter (no date). In: https://www.geositter.com/case/geotechnical_monitoring/deep_foundation_pit_automatic_monitoring (consultado em 09 de junho de 2025).
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). The Landslide Handbook – A guide to understanding landslides. U.S. Geological Survey, Virginia.

- Holtz, R., Kovacs, W., & Sheahan, T. (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. 2nd edn. Edited by Pearson, London.
- Hudson, J., & Harrison, J. (1997). *Engineering Rock Mechanics. An introduction to the principles*. 1st edn. Edited by Pergamon, Oxford.
- Leica Geosystems (2025a). *Leica LS Digital Levels. Data sheet*.
- Leica Geosystems (2025b). In: <https://leica-geosystems.com/products/total-stations/manual-total-stations/leica-flexline-ts10> (consultado a 31 de maio de 2025)
- NP EN 1997-1. (2010). *Eurocódigo 7, Projeto geotécnico, Parte 1: Regras gerais. Monte da Caparica*.
- Oliveira, D., & Leão, M. (2016). Instrumentação geotécnica em obras subterrâneas, *Revista Fundações e Obras Geotécnicas*, pp. 76–83.
- Ou, C. (2006). *Deep Excavation. Theory and practice*, 1st edn. Taylor & Francis, London.
- Roctest (2025). In: <https://roctest.com/en/product/profil-digital-inclinometer-probe/> (consultado a 27 de maio de 2025)
- Russo, C., Brainerd, M., & Vatovec, M. (2008). Monitoring Building Response to Adjacent Construction, *Structure magazine*, November, pp. 16–19.
- Rybak, J., Ivannikov, A., Kulikova, E., & Żyrek, T. (2018). Deep excavation in urban areas - defects of surrounding buildings at various stages of construction, in 9th International Scientific Conference Building Defects, MATEC, London, pp. 1–6.
- Santos, V. (2016). *Gestão de riscos geotécnicos na construção de túneis em maciços rochosos. Dissertação de doutoramento. FCT-UNL*.
- Segalini, A., Carri, A., & Savi, R. (2017). Role of Geotechnical Monitoring: State of the Art and New Perspectives, in *GEO-EXPO 2017*, Springer, Saravejo, pp. 1–11.
- Silva, M., & Salvado, A. (2015). *Análise custo-benefício. Metodologia para apoio à decisão em intervenções de Arquitetura, Engenharia e Construção*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Slope Indicator (2004). *Guide to geotechnical instrumentation*.
- Smartec (2018). *Product Catalog*.
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd edn. John Wiley & Sons, Canadá.
- Veiga, L., Zanetti, M., & Faggion, P. (2007). *Fundamentos da Topografia*. Universidade Federal do Paraná.
- Ward, S. (1999). Requirements for an effective project risk management process. *Project Management Journal*, 3(30), pp. 37–43.
- World Sensing (2025). In: <https://www.worldsensing.com/product/lasertilt90/> (consultado a 03 de junho de 2025).

Anexos

- Anexo I – Base de dados da análise económica
- Anexo II – Plano de instrumentação
- Anexo III – Análise económica para os alvos/prismas
- Anexo IV – Análise económica para os inclinómetros verticais
- Anexo V – Análise económica para as células de carga
- Anexo VI – Análise económica para os piezómetros
- Anexo VII – Análise económica para os *tiltmeters*
- Anexo VIII – Análise económica para o cenário de obra
- Anexo IX – Análise de custo-benefício para os alvos/prismas
- Anexo X – Análise de custo-benefício para os inclinómetros verticais
- Anexo XI – Análise de custo-benefício para as células de carga
- Anexo XII – Análise de custo-benefício para os piezómetros
- Anexo XIII – Análise de custo-benefício para os *tiltmeters*
- Anexo XIV – Análise de custo-benefício para o cenário de obra

[página propositadamente em branco]

Anexo I – Base de dados da análise económica

Base de dados de instrumentação								
Inclinómetros verticais, <i>Tiltmeters</i> , Células de carga, Piezómetros e Alvos/Prismas								
Equipamento Instrumento de medição	Aquisição de dados	Dispositivo de observação	Outros	Por quantidade	Por m.l.	Intervalo de valores		Valor a considerar
Inclinómetros verticais								
Inclinómetro convencional (sonda inclinométrica)	Manual			Sim	N/A	10 000 €	15 000 €	12 500 €
<i>In-place</i>	Automática			N/A	Sim	1 200 €	1 600 €	1 400 €
<i>Saav</i>	Automática			N/A	Sim	1 000 €	1 400 €	1 200 €
		Calha inclinométrica (ABS ou PVC)		N/A	Sim	15 €	19 €	17 €
		Calha piezométrica (PVC)		N/A	Sim	12 €	15 €	14 €
			Cabo de dados	N/A	Sim	3 €	6 €	5 €
<i>Tiltmeters</i>								
Unidade de leitura	Manual			Sim	N/A	1 500 €	2 800 €	2 150 €
<i>Tiltmeter</i> digital	Manual ou automática			Sim	N/A	300 €	600 €	450 €
<i>Tiltmeter</i> corda vibrante	Manual ou automática			Sim	N/A	600 €	900 €	750 €
<i>Wireless tiltmeter</i>	Automática			Sim	N/A	1 000 €	1 500 €	1 250 €
		Bases orientação		Sim	N/A	5 €	10 €	8 €
			Cabo de dados	N/A	Sim	3 €	6 €	5 €
Células de carga								
Unidade de leitura	Manual			Sim	N/A	1 500 €	2 800 €	2 150 €
CC hidráulica c/ manómetro	Visual (manual)			Sim	N/A	1 000 €	1 500 €	1 250 €
CC elétrica	Manual ou automática			Sim	N/A	1 000 €	1 500 €	1 250 €
CC corda vibrante	Manual ou automática			Sim	N/A	1 000 €	1 500 €	1 250 €
			Cabo de dados	N/A	Sim	3 €	6 €	5 €
Piezómetros								
Unidade de leitura	Manual			Sim	N/A	1 500 €	2 800 €	2 150 €
Piezómetro de tubo aberto (sonda piezométrica)	Manual			Sim	N/A	500 €	1 000 €	750 €
Piezómetro elétrico	Manual ou automática			Sim	N/A	750 €	1 000 €	875 €
Piezómetro corda vibrante	Manual ou automática			Sim	N/A	750 €	1 000 €	875 €
		Calha piezométrica (PVC)		N/A	Sim	12 €	15 €	14 €
			Cabo de dados	N/A	Sim	3 €	6 €	5 €
Alvos/Prismas								
Taquiómetro	Manual			Sim	N/A	20 000 €	30 000 €	25 000 €
Taquiómetro	Automática			Sim	N/A	45 000 €	50 000 €	47 500 €
		Alvos		Sim	N/A	20 €	30 €	25 €
		Prismas		Sim	N/A	100 €	150 €	125 €
			Bases orientação	Sim	N/A	5 €	10 €	8 €

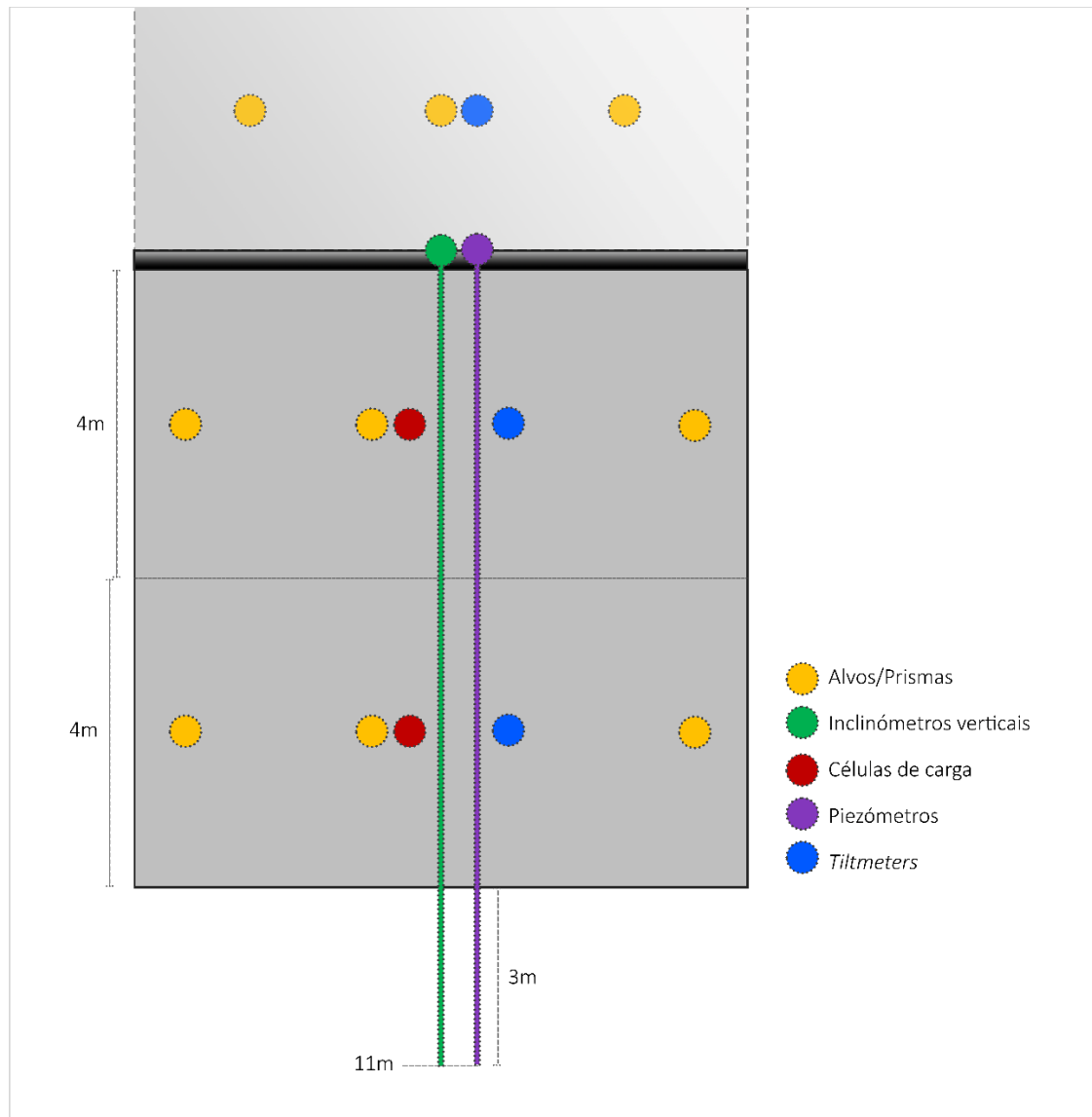
Base da dados de sistema de aquisição automática					
Equipamentos / Componentes	Por quantidade	Por mês	Intervalo de valores		Valor a considerar
Dataloggers					
Analog node Single-channel	Sim	N/A	450 €	750 €	600 €
Analog node Multi-channel	Sim	N/A	1 000 €	1 500 €	1 250 €
VW node Single-channel	Sim	N/A	750 €	1 000 €	875 €
VW node Multi-channel	Sim	N/A	1 000 €	1 500 €	1 250 €
Digital node	Sim	N/A	1 000 €	1 500 €	1 250 €
Datalogger p/ taquímetro	Sim	N/A	10 000 €	15 000 €	12 500 €
Core communications					
Gateway sem painel solar	Sim	N/A	3 000 €	4 000 €	3 500 €
Gateway com painel solar	Sim	N/A	3 500 €	4 500 €	4 000 €
Plataforma on-line					
Plataforma on-line	N/A	Sim	500 €	1 000 €	750 €

Base de dados de furação e instalação					
Inclinómetros verticais, <i>Tiltmeters</i> , Células de carga, Piezómetros e Alvos/Prismas					
Atividade / Componente	Por quantidade	Por m.l.	Intervalo de valores		Valor a considerar
Dados de furação - utilizar para inclinómetros e piezómetros					
Mobilização equipamento de furação e equipa de trabalho	Sim	N/A	1 000 €	3 500 €	2 250 €
Posicionamento equipamento de furação	Sim	N/A	75 €	125 €	100 €
Furação em rocha	N/A	Sim	80 €	120 €	78 €
Furação em solo	N/A	Sim	45 €	65 €	
Selagem	N/A	Sim	20 €	40 €	30 €
Tampas de proteção	Sim	N/A	80 €	100 €	90 €
Dados de instalação - utilizar para inclinómetros e piezómetros					
Instalação calhas inclinométricas	N/A	Sim	20 €	40 €	30 €
Instalação calhas piezométricas	N/A	Sim	10 €	20 €	15 €
Instalação inclinómetros <i>in-place e Saav</i>	N/A	Sim	20 €	40 €	30 €
Instalação piezómetros elétricos e corda vibrante	Sim	N/A	10 €	20 €	15 €
Dados de instalação - utilizar para <i>tiltmeters</i> , células de carga e alvos/prismas					
Instalação <i>tiltmeters</i> digital, corda vibrante e <i>wireless</i>	Sim	N/A	5 €	10 €	8 €
Instalação células de carga hidráulicas, elétricas e corda vibrante	Sim	N/A	N/A	N/A	N/A
Instalação alvos e prismas	Sim	N/A	3 €	6 €	5 €

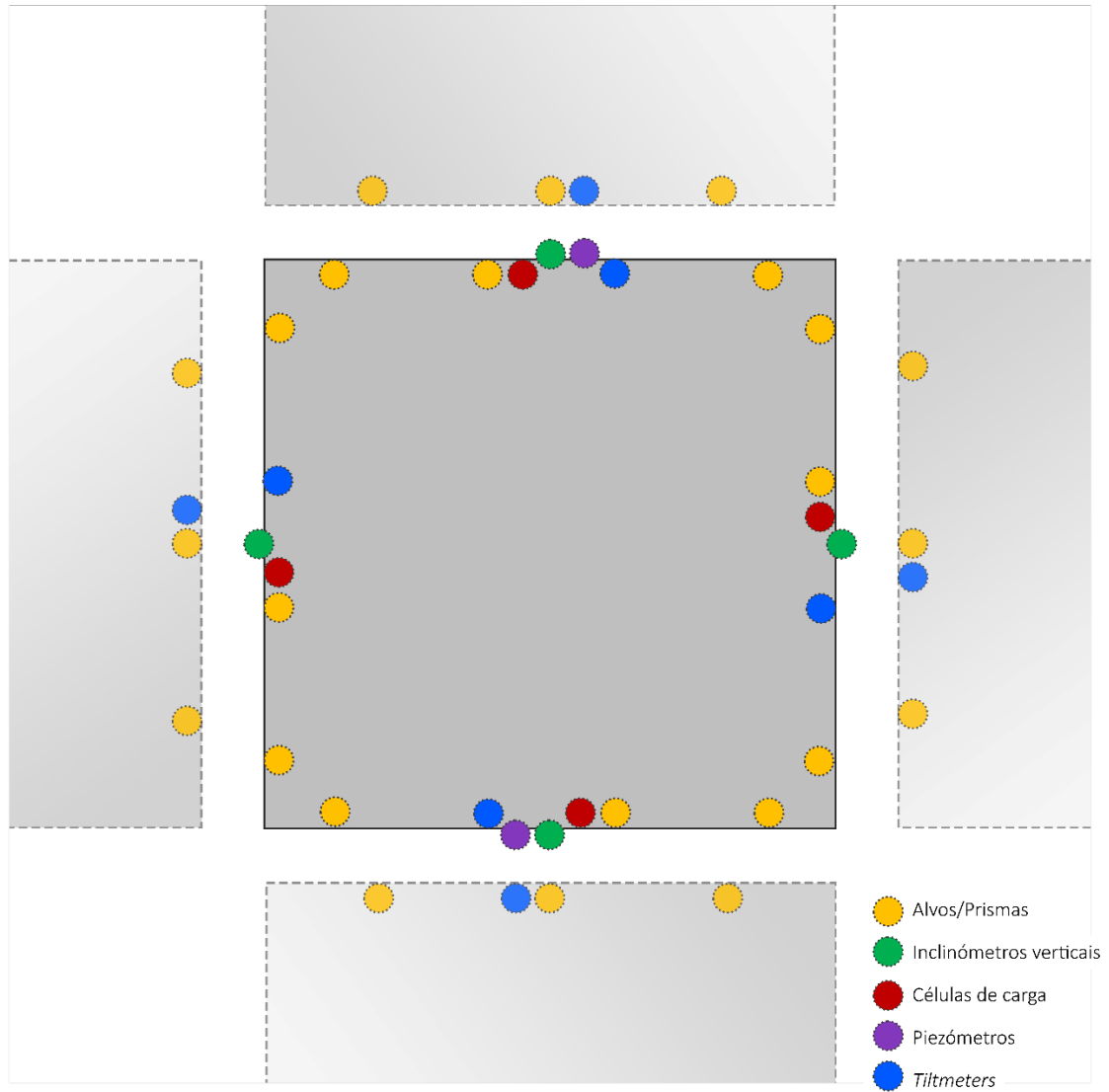
Base de dados de leitura					
Aquisição manual e automática de dados					
Atividade / Componente	Por quantidade	Por mês	Intervalo de valores		Valor a considerar
Leitura manual de aquisição de dados					
Leitura manual inclinómetros	Sim	N/A	20 €	40 €	30 €
Leitura manual <i>tiltmeters</i>	Sim	N/A	3 €	6 €	5 €
Leitura manual células de carga	Sim	N/A	3 €	6 €	5 €
Leitura manual piezómetros	Sim	N/A	3 €	6 €	5 €
Leitura manual alvos/prismas	Sim	N/A	2 €	4 €	3 €
Relatórios interpretativos de leitura manual ou automática					
Relatório de monitorização manual até 3 métodos	Sim	N/A	75 €	125 €	100 €
Relatório de monitorização manual até 5 métodos	Sim	N/A	100 €	150 €	125 €
Relatório mensal de monit. automática até 3 métodos	N/A	Sim	100 €	200 €	150 €
Relatório mensal de monit. automática até 5 métodos	N/A	Sim	150 €	250 €	200 €
Plataforma <i>on-line</i> para aquisição automática de dados					
Plataforma <i>on-line</i>	N/A	Sim	500 €	1 000 €	750 €
Técnico / equipa alocada a obra					
Técnico permanente	N/A	Sim	4 500 €	7 500 €	6 000 €
Equipa permanente	N/A	Sim	10 000 €	15 000 €	12 500 €

Anexo II – Plano de instrumentação

Plano de instrumentação para caso de estudo teórico - Vista de alçado



Plano de instrumentação para caso de estudo teórico - Vista de topo



[página propositadamente em branco]

Anexo III – Análise económica para os alvos/prismas

	Alvos/Prismas - Análise económica pré monitorização											
	Aquisição Manual						Aquisição Automática					
	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo
Equipamento instrumento	Taquiómetro (estação total)	1	N/A	N/A	25 000 €	N/A	Taquiómetro (estação total)	1	N/A	N/A	47 500 €	47 500 €
Dispositivo de observação	Alvos topográficos	36	N/A	N/A	25 €	900 €	Prismas topográficos	36	N/A	N/A	125 €	4 500 €
Outros	Bases orientação		N/A	N/A	8 €	N/A	Bases orientação		N/A	N/A	8 €	N/A
Dataloggers	N/A						Datalogger p/ taquiómetro	1	N/A	N/A	12 500 €	12 500 €
Core communications	N/A						Gateway sem painel solar	1	N/A	N/A	3 500 €	3 500 €
Total instrumentação						900 €						68 000 €
Dados de instalação	Instalação alvos e prismas	36	N/A	N/A	5 €	162 €	Instalação alvos e prismas	36	N/A	N/A	5 €	162 €
Total instalação						162 €						162 €
Total pré monitorização						1 062 €						68 162 €

Alvos/Prismas - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 50 km									
	Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
	Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A
Leitura completa	108 €		N/A	108 €		N/A	108 €		N/A
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha	258 €		N/A	258 €		N/A	258 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)	5 676 €		900 €	3 096 €		900 €	1 032 €		900 €
Total anual (48 semanas)	68 112 €		10 800 €	37 152 €		10 800 €	12 384 €		10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual			1 062 €					
	Aquisição automática			68 162 €					

	Alvos/Prismas - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 250 km								
	Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
	Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)	250	250 €	N/A	250	250 €	N/A	250	250 €	N/A
Leitura completa	108 €		N/A	108 €		N/A	108 €		N/A
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha	458 €		N/A	458 €		N/A	458 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)	10 076 €		900 €	5 496 €		900 €	1 832 €		900 €
Total anual (48 semanas)	120 912 €		10 800 €	65 952 €		10 800 €	21 984 €		10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual			1 062 €					
	Aquisição automática			68 162 €					

Alvos/Prismas - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 500 km													
		Cenário 1 (ou escavação)				Cenário 2 (ou construção)				Cenário 3 (ou exploração)			
		Manual		Automática		Manual		Automática		Manual		Automática	
Frequência de leituras	Leitura diária				Hora a hora	Leitura trissemanal				Leitura semanal			
	Leituras p/ mês	22				Leituras p/ mês	12	Hora a hora		Leituras p/ mês	4	Hora a hora	
Período de leitura	Total meses		12		Total meses		12		Total meses		12		
Deslocação Ida e volta (km / €)	500	500 €	N/A		500	500 €	N/A		500	500 €	N/A		
Leitura completa	108 €		N/A		108 €		N/A		108 €		N/A		
Relatório campanha	100 €		N/A		100 €		N/A		100 €		N/A		
Relatório mensal	N/A		150 €		N/A		150 €		N/A		150 €		
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €		N/A		750 €		N/A		750 €		
Total campanha	708 €		N/A		708 €		N/A		708 €		N/A		
Total mês (4 semanas por mês)	15 576 €		900 €		8 496 €		900 €		2 832 €		900 €		
Total anual (48 semanas)	186 912 €		10 800 €		101 952 €		10 800 €		33 984 €		10 800 €		
Total pré monitorização	Aquisição manual				1 062 €								
	Aquisição automática				68 162 €								

Anexo IV – Análise económica para os inclinómetros verticais

	Inclinómetros verticais - Análise económica pré monitorização											
	Aquisição Manual						Aquisição Automática					
	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo
Equipamento instrumento	Inclinómetro convencional (sonda inclinométrica)	4	N/A	N/A	12 500 €	N/A	Saav	N/A	44	N/A	1 200 €	52 800 €
Dispositivo de observação	Calha inclinométrica (ABS ou PVC)	N/A	44	N/A	17 €	748 €	Calha piezométrica (PVC)	N/A	44	N/A	14 €	594 €
Outros	Cabo de dados	N/A		N/A	5 €	N/A	Cabo de dados	N/A		N/A	5 €	N/A
Dataloggers	N/A						Digital node	4	N/A	N/A	1 250 €	5 000 €
Core communications	N/A						Gateway sem painel solar	1	N/A	N/A	3 500 €	3 500 €
Total instrumentação						748 €						61 894 €
Dados de furação	Mobilização equipamento de furação e equipa de trabalho	1	N/A	N/A	2 250 €	2 250 €	Mobilização equipamento de furação e equipa de trabalho	1	N/A	N/A	2 250 €	2 250 €
	Posicionamento equipamento de furação	4	N/A	N/A	100 €	400 €	Posicionamento equipamento de furação	4	N/A	N/A	100 €	400 €
	Furação em rocha e solo	N/A	44	N/A	78 €	3 410 €	Furação em rocha e solo	N/A	44	N/A	78 €	3 410 €
	Selagem	N/A	44	N/A	30 €	1 320 €	Selagem	N/A	44	N/A	30 €	1 320 €
	Tampas de proteção	4	N/A	N/A	90 €	360 €	Tampas de proteção	4	N/A	N/A	90 €	360 €
Dados de instalação	Calhas inclinométricas	N/A	44	N/A	30 €	1 320 €	Calhas inclinométricas	N/A		N/A	30 €	N/A
	N/A						Calhas piezométricas	N/A	44	N/A	15 €	660 €
	N/A						In-place ou Saav	N/A	44	N/A	30 €	1 320 €
Total furação + instalação						9 060 €						9 720 €
Total pré monitorização						9 808 €						71 614 €

Inclinómetros verticais - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 50 km									
	Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
	Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A
Leitura completa	120 €		N/A	120 €		N/A	120 €		N/A
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha	270 €		N/A	270 €		N/A	270 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)	5 940 €		900 €	3 240 €		900 €	1 080 €		900 €
Total anual (48 semanas)	71 280 €		10 800 €	38 880 €		10 800 €	12 960 €		10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual			9 808 €					
	Aquisição automática			71 614 €					

Inclinómetros verticais - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 250 km												
		Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)				
		Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática		
Frequência de leituras	Leitura diária			Leitura trissemanal			Leitura semanal			Hora a hora		
	Leituras p/ mês	22	Hora a hora		Leituras p/ mês	12		Hora a hora	Leituras p/ mês		4	Hora a hora
Período de leitura	Total meses			12	Total meses			12	Total meses			12
Deslocação Ida e volta (km / €)	250	250 €	N/A	250	250 €	N/A	250	250 €	N/A			
Leitura completa	120 €			N/A	120 €			N/A	120 €			N/A
Relatório campanha	100 €			N/A	100 €			N/A	100 €			N/A
Relatório mensal	N/A			150 €	N/A			150 €	N/A			150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A			750 €	N/A			750 €	N/A			750 €
Total campanha	470 €			N/A	470 €			N/A	470 €			N/A
Total mês (4 semanas por mês)	10 340 €			900 €	5 640 €			900 €	1 880 €			900 €
Total anual (48 semanas)	124 080 €			10 800 €	67 680 €			10 800 €	22 560 €			10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual				9 808 €							
	Aquisição automática				71 614 €							

Inclinómetros verticais - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 500 km									
	Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
	Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)	500	500 €	N/A	500	500 €	N/A	500	500 €	N/A
Leitura completa	120 €		N/A	120 €		N/A	120 €		N/A
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha	720 €		N/A	720 €		N/A	720 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)	15 840 €		900 €	8 640 €		900 €	2 880 €		900 €
Total anual (48 semanas)	190 080 €		10 800 €	103 680 €		10 800 €	34 560 €		10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual			9 808 €					
	Aquisição automática			71 614 €					

Anexo V – Análise económica para as células de carga

	Células de carga - Análise económica pré monitorização											
	Aquisição Manual						Aquisição Automática					
	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo
Equipamento instrumento	CC hidráulica c/ manómetro	8	N/A	N/A	1 250 €	10 000 €	CC elétrica	8	N/A	N/A	1 250 €	10 000 €
Outros	Cabo de dados	N/A		N/A	5 €	N/A	Cabo de dados	N/A		N/A	5 €	N/A
Dataloggers	N/A						Analog node Multi-channel	4	N/A	N/A	1 250 €	5 000 €
Core communications	N/A						Gateway sem painel solar	1	N/A	N/A	3 500 €	3 500 €
Total instrumentação						10 000 €						18 500 €
Total pré monitorização						10 000 €						18 500 €

Células de carga - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 50 km										
		Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
		Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trisemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora	
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4		
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12	
Deslocação Ida e volta (km / €)	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A	
Leitura completa	36 €		N/A	36 €		N/A	36 €		N/A	
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A	
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €	
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €	
Total campanha	186 €		N/A	186 €		N/A	186 €		N/A	
Total mês (4 semanas por mês)	4 092 €		900 €	2 232 €		900 €	744 €		900 €	
Total anual (48 semanas)	49 104 €		10 800 €	26 784 €		10 800 €	8 928 €		10 800 €	
Total pré monitorização	Aquisição manual			10 000 €						
	Aquisição automática			18 500 €						

Células de carga - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 250 km									
	Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
	Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)	250	250 €	N/A	250	250 €	N/A	250	250 €	N/A
Leitura completa	36 €		N/A	36 €		N/A	36 €		N/A
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha	386 €		N/A	386 €		N/A	386 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)	8 492 €		900 €	4 632 €		900 €	1 544 €		900 €
Total anual (48 semanas)	101 904 €		10 800 €	55 584 €		10 800 €	18 528 €		10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual			10 000 €					
	Aquisição automática			18 500 €					

Células de carga - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 500 km									
	Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
	Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)	500	500 €	N/A	500	500 €	N/A	500	500 €	N/A
Leitura completa	36 €		N/A	36 €		N/A	36 €		N/A
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha	636 €		N/A	636 €		N/A	636 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)	13 992 €		900 €	7 632 €		900 €	2 544 €		900 €
Total anual (48 semanas)	167 904 €		10 800 €	91 584 €		10 800 €	30 528 €		10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual			10 000 €					
	Aquisição automática			18 500 €					

[página propositadamente em branco]

Anexo VI – Análise económica para os piezómetros

	Piezómetros - Análise económica pré monitorização											
	Aquisição Manual						Aquisição Automática					
	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo
Equipamento instrumento	Piezómetro de tubo aberto (sonda piezométrica)	2	N/A	N/A	750 €	N/A	Piezómetro corda vibrante	2	N/A	N/A	875 €	1 750 €
Dispositivo de observação	Calha piezométrica (PVC)	N/A	22	N/A	14 €	297 €	Calha piezométrica (PVC)	N/A	22	N/A	14 €	297 €
Outros	Cabo de dados	N/A		N/A	5 €	N/A	Cabo de dados	N/A		N/A	5 €	N/A
Dataloggers	N/A						VW node Single-channel	2	N/A	N/A	875 €	1 750 €
Core communications	N/A						Gateway sem painel solar	1	N/A	N/A	3 500 €	3 500 €
Total instrumentação						297 €						7 297 €
Dados de furação	Mobilização equipamento de furação e equipa de trabalho	1	N/A	N/A	2 250 €	2 250 €	Mobilização equipamento de furação e equipa de trabalho	1	N/A	N/A	2 250 €	2 250 €
	Posicionamento equipamento de furação	2	N/A	N/A	100 €	200 €	Posicionamento equipamento de furação	2	N/A	N/A	100 €	200 €
	Furação em rocha e solo	N/A	22	N/A	78 €	1 705 €	Furação em rocha e solo	N/A	22	N/A	78 €	1 705 €
	Selagem	N/A	22	N/A	30 €	660 €	Selagem	N/A	22	N/A	30 €	660 €
	Tampas de proteção	2	N/A	N/A	90 €	180 €	Tampas de proteção	2	N/A	N/A	90 €	180 €
Dados de instalação	Calhas piezométricas	N/A	22	N/A	15 €	330 €	Calhas piezométricas	N/A	22	N/A	15 €	330 €
	N/A						Instalação piezómetros elétricos e corda vibrante	2	N/A	N/A	15 €	30 €
Total furação + instalação						5 325 €						5 355 €
Total pré monitorização						5 622 €						12 652 €

Piezómetros - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 50 km									
	Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
	Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A
Leitura completa	9 €		N/A	9 €		N/A	9 €		N/A
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha	159 €		N/A	159 €		N/A	159 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)	3 498 €		900 €	1 908 €		900 €	636 €		900 €
Total anual (48 semanas)	41 976 €		10 800 €	22 896 €		10 800 €	7 632 €		10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual			5 622 €					
	Aquisição automática			12 652 €					

Piezómetros - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 250 km									
	Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
	Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)	250	250 €	N/A	250	250 €	N/A	250	250 €	N/A
Leitura completa	9 €		N/A	9 €		N/A	9 €		N/A
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha	359 €		N/A	359 €		N/A	359 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)	7 898 €		900 €	4 308 €		900 €	1 436 €		900 €
Total anual (48 semanas)	94 776 €		10 800 €	51 696 €		10 800 €	17 232 €		10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual			5 622 €					
	Aquisição automática			12 652 €					

Piezómetros - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 500 km									
		Cenário 1 (ou escavação)		Cenário 2 (ou construção)		Cenário 3 (ou exploração)			
		Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática		
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)	500	500 €	N/A	500	500 €	N/A	500	500 €	N/A
Leitura completa	9 €		N/A	9 €		N/A	9 €		N/A
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha	609 €		N/A	609 €		N/A	609 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)	13 398 €		900 €	7 308 €		900 €	2 436 €		900 €
Total anual (48 semanas)	160 776 €		10 800 €	87 696 €		10 800 €	29 232 €		10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual			5 622 €					
	Aquisição automática			12 652 €					

Anexo VII – Análise económica para os *tiltmeters*

	Tiltmeters - Análise económica pré monitorização											
	Aquisição Manual						Aquisição Automática					
	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo	Designação	Por quantidade	Por m.l.	Por mês	Valor a considerar	Valor p/ cálculo
Equipamento instrumento	Tiltmeter digital	12	N/A	N/A	450 €	5 400 €	Wireless tiltmeter	12	N/A	N/A	1 250 €	15 000 €
Outros	Cabo de dados	N/A		N/A	5 €	N/A	N/A					
Dataloggers	N/A						Analog node Single-channel	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Core communications	N/A						Gateway sem painel solar	1	N/A	N/A	3 500 €	3 500 €
Total instrumentação						5 400 €						18 500 €
Dados de instalação	Instalação tiltmeters digital, corda vibrante e wireless	12	N/A	N/A	8 €	90 €	Instalação tiltmeters digital, corda vibrante e wireless	12	N/A	N/A	8 €	90 €
Total instalação						90 €						90 €
Total pré monitorização						5 490 €						18 590 €

Tiltmeters - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 50 km										
		Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
		Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência de leituras		Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
		Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura		Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)		50	50 €	N/A	50	50 €	N/A	50	50 €	N/A
Leitura completa		54 €		N/A	54 €		N/A	54 €		N/A
Relatório campanha		100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal		N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma on-line mensal		N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha		204 €		N/A	204 €		N/A	204 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)		4 488 €		900 €	2 448 €		900 €	816 €		900 €
		53 856 €		10 800 €	29 376 €		10 800 €	9 792 €		10 800 €
Total pré monitorização		Aquisição manual			5 490 €					
		Aquisição automática			18 590 €					

Tiltmeters - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 250 km									
		Cenário 1 (ou escavação)		Cenário 2 (ou construção)		Cenário 3 (ou exploração)			
		Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática		
Frequência de leituras	Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
	Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura	Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km / €)	250	250 €	N/A	250	250 €	N/A	250	250 €	N/A
Leitura completa	54 €		N/A	54 €		N/A	54 €		N/A
Relatório campanha	100 €		N/A	100 €		N/A	100 €		N/A
Relatório mensal	N/A		150 €	N/A		150 €	N/A		150 €
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha	404 €		N/A	404 €		N/A	404 €		N/A
Total mês (4 semanas por mês)	8 888 €		900 €	4 848 €		900 €	1 616 €		900 €
Total anual (48 semanas)	106 656 €		10 800 €	58 176 €		10 800 €	19 392 €		10 800 €
Total pré monitorização	Aquisição manual			5 490 €					
	Aquisição automática			18 590 €					

Tiltmeters - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 500 km															
		Cenário 1 (ou escavação)				Cenário 2 (ou construção)				Cenário 3 (ou exploração)					
		Manual		Automática		Manual		Automática		Manual		Automática			
Frequência de leituras	Leitura diária			Hora a hora	Leitura trissemanal			Hora a hora	Leitura semanal			Hora a hora			
	Leituras p/ mês	22			Leituras p/ mês	12			Leituras p/ mês	4					
Período de leitura	Total meses			12		Total meses			12		Total meses			12	
Deslocação Ida e volta (km / €)	500	500 €		N/A		500	500 €		N/A		500	500 €		N/A	
Leitura completa	54 €			N/A		54 €			N/A		54 €			N/A	
Relatório campanha	100 €			N/A		100 €			N/A		100 €			N/A	
Relatório mensal	N/A			150 €		N/A			150 €		N/A			150 €	
Plataforma <i>on-line</i> mensal	N/A			750 €		N/A			750 €		N/A			750 €	
Total campanha	654 €			N/A		654 €			N/A		654 €			N/A	
Total mês (4 semanas por mês)	14 388 €			900 €		7 848 €			900 €		2 616 €			900 €	
Total anual (48 semanas)	172 656 €			10 800 €		94 176 €			10 800 €		31 392 €			10 800 €	
Total pré monitorização	Aquisição manual					5 490 €									
	Aquisição automática					18 590 €									

Anexo VIII – Análise económica para o cenário de obra

Cenário de obra - Análise económica pré monitorização											
	Inclinómetros		Tiltmeters		Células de carga		Piezómetros		Alvos/Prismas		
	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	
Aquisição de dados	Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática	
Equipamento Instrumento Dispositivo	Inclinómetro convencional (sonda inclinométrica)	Saav	Tiltmeter digital	Wireless tiltmeter	CC hidráulica c/ manómetro	CC elétrica	Piezómetro de tubo aberto (sonda piezométrica)	Piezómetro corda vibrante	Alvos topográficos	Prismas topográficos	
Quantidade	4	4	12	12	8	8	2	2	36	36	
Metros lineares (m.l)	44	44	N/A	N/A	N/A	N/A	22	22	N/A	N/A	
Dataloggers	N/A	Digital node	N/A	N/A	N/A	Analog node Multi-channel	N/A	VW node Single-channel	N/A	Datalogger p/ taquímetro	
Quantidade	N/A	4	N/A	N/A	N/A	4	N/A	2	N/A	1	
Core communications	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	
Quantidade	N/A	1	N/A	1	N/A	1	N/A	1	N/A	1	
Total instrumentação	748 €	61 894 €	5 400 €	18 500 €	10 000 €	18 500 €	297 €	7 297 €	900 €	68 000 €	
Total furação + instalação ou Total instalação	9 060 €	9 720 €	90 €	90 €	N/A	N/A	5 325 €	5 355 €	162 €	162 €	
Total pré monitorização	9 808 €	71 614 €	5 490 €	18 590 €	10 000 €	18 500 €	5 622 €	12 652 €	1 062 €	68 162 €	
Total pré monitorização Aquisição manual	31 982 €										
Total pré monitorização Aquisição automática	189 518 €										
Aquisição manual	Inclinómetros		Tiltmeters		Células de carga		Piezómetros		Alvos/Prismas		Total
Leitura completa	120 €		54 €		36 €		9 €		108 €		327 €

Cenário de obra - Análise económica pré monitorização (Otimização 1)											
	Inclinómetros		Tiltmeters		Células de carga		Piezómetros		Alvos/Prismas		
	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	
Aquisição de dados	Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática	
Equipamento Instrumento Dispositivo	Inclinómetro convencional (sonda inclinométrica)	Saav	Tiltmeter digital	Wireless tiltmeter	CC hidráulica c/ manómetro	CC elétrica	Piezómetro de tubo aberto (sonda piezométrica)	Piezómetro corda vibrante	Alvos topográficos	Prismas topográficos	
Quantidade	4	4	12	12	8	8	2	2	36	36	
Metros lineares (m.l)	44	44	N/A	N/A	N/A	N/A	22	22	N/A	N/A	
Dataloggers	N/A	Digital node	N/A	N/A	N/A	Analog node Multi-channel	N/A	VW node Single-channel	N/A	Datalogger p/ taquímetro	
Quantidade	N/A	4	N/A	N/A	N/A	4	N/A	2	N/A	1	
Core communications	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	
Quantidade	N/A	1	N/A	0	N/A	0	N/A	0	N/A	0	
Total instrumentação	748 €	61 894 €	5 400 €	15 000 €	10 000 €	15 000 €	297 €	3 797 €	900 €	64 500 €	
Total furação + instalação ou Total instalação	9 060 €	9 720 €	90 €	90 €	N/A	N/A	5 325 €	5 355 €	162 €	162 €	
Total pré monitorização	9 808 €	71 614 €	5 490 €	15 090 €	10 000 €	15 000 €	5 622 €	9 152 €	1 062 €	64 662 €	
Total pré monitorização Aquisição manual	31 982 €										
Total pré monitorização Aquisição automática	175 518 €										
Aquisição manual	Inclinómetros		Tiltmeters		Células de carga		Piezómetros		Alvos/Prismas		Total
Leitura completa	120 €		54 €		36 €		9 €		108 €		327 €

Cenário de obra - Análise económica pré monitorização (Otimização 2)										
	Inclinómetros		Tiltmeters		Células de carga		Piezómetros		Alvos/Prismas	
	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável
Aquisição de dados	Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática	Manual	Automática
Equipamento Instrumento Dispositivo	Inclinómetro convencional (sonda inclinométrica)	Saav	Tiltmeter digital	Wireless tiltmeter	CC hidráulica c/ manómetro	CC corda vibrante	Piezómetro de tubo aberto (sonda piezométrica)	Piezómetro corda vibrante	Alvos topográficos	Prismas topográficos
Quantidade	4	4	12	12	8	8	2	2	36	36
Metros lineares (m.l)	44	44	N/A	N/A	N/A	N/A	22	22	N/A	N/A
Dataloggers	N/A	Digital node	N/A	N/A	N/A	VW node Multi-channel	N/A	VW node Single-channel	N/A	Datalogger p/ taquímetro
Quantidade	N/A	4	N/A	N/A	N/A	4	N/A	0	N/A	1
Core communications	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar	N/A	Gateway sem painel solar
Quantidade	N/A	1	N/A	0	N/A	0	N/A	0	N/A	0
Total instrumentação	748 €	61 894 €	5 400 €	15 000 €	10 000 €	15 000 €	297 €	2 047 €	900 €	64 500 €
Total furação + instalação ou Total instalação	9 060 €	9 720 €	90 €	90 €	N/A	N/A	5 325 €	5 355 €	162 €	162 €
Total pré monitorização	9 808 €	71 614 €	5 490 €	15 090 €	10 000 €	15 000 €	5 622 €	7 402 €	1 062 €	64 662 €
Total pré monitorização Aquisição manual	31 982 €									
Total pré monitorização Aquisição automática	173 768 €									
Aquisição manual	Inclinómetros		Tiltmeters		Células de carga		Piezómetros		Alvos/Prismas	
Leitura completa	120 €		54 €		36 €		9 €		108 €	
Total 327 €										

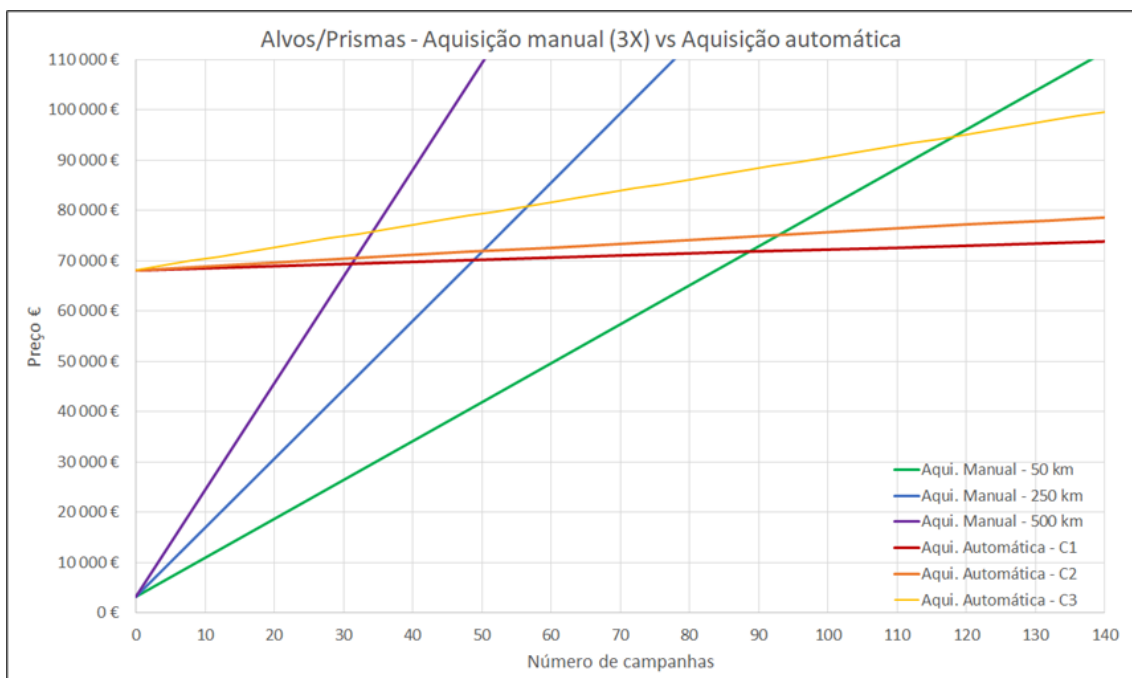
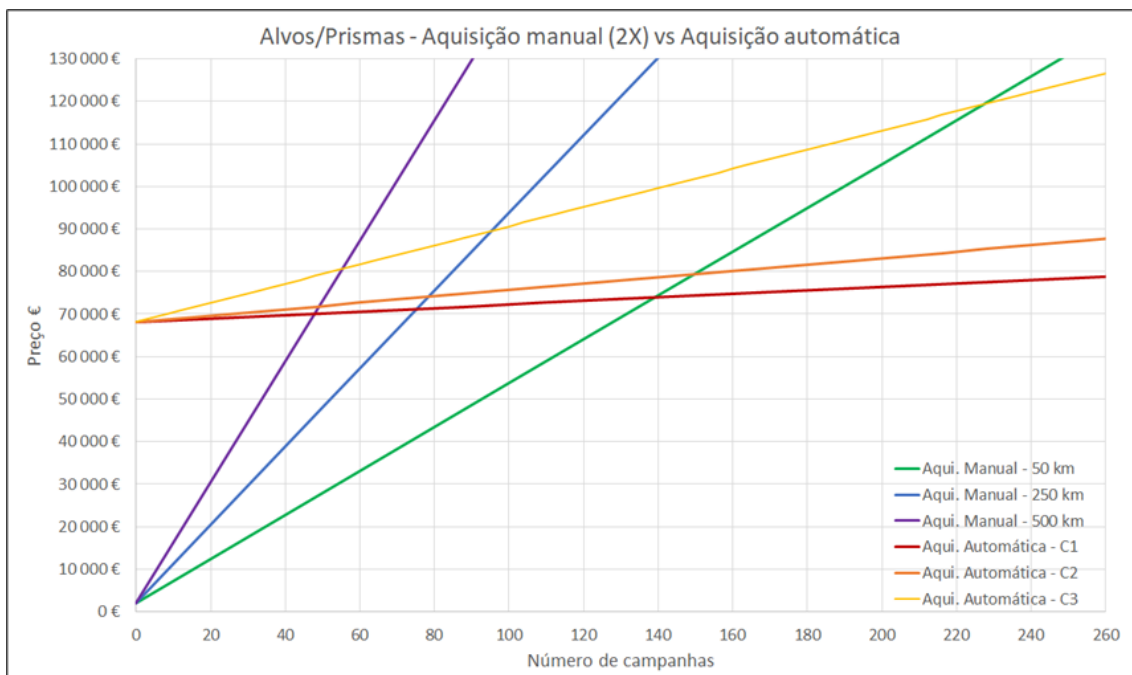
Cenário de obra - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 50 km										
		Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
		Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência leituras		Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
Período de leitura		Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
		Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km)	50	50 €		N/A	50 €		N/A	50 €		N/A
Leitura completa		327 €		N/A	327 €		N/A	327 €		N/A
Relatório de monit. manual até 3 métodos		Não aplicável		N/A	Não aplicável		N/A	Não aplicável		N/A
Relatório de monit. manual até 5 métodos		125 €		N/A	125 €		N/A	125 €		N/A
Relatório mensal de monit. automática até 3 métodos		N/A		Não aplicável	N/A		Não aplicável	N/A		Não aplicável
Relatório mensal de monit. automática até 5 métodos		N/A		200 €	N/A		200 €	N/A		200 €
Plataforma on-line mensal		N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha		502 €		N/A	502 €		N/A	502 €		N/A
Total por mês (4 semanas por mês)		11 044 €		950 €	6 024 €		950 €	2 008 €		950 €
Total anual (48 semanas)		132 528 €		11 400 €	72 288 €		11 400 €	24 096 €		11 400 €
Total pré monitorização Aquisição manual		31 982 €								
Total pré monitorização Aquisição automática		189 518 €								

Cenário de obra - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 250 km										
		Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)			Cenário 3 (ou exploração)		
		Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática
Frequência leituras		Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora
		Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4	
Período de leitura		Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12
Deslocação Ida e volta (km)	250	250 €		N/A	250 €		N/A	250 €		N/A
Leitura completa		327 €		N/A	327 €		N/A	327 €		N/A
Relatório de monit. manual até 3 métodos		Não aplicável		N/A	Não aplicável		N/A	Não aplicável		N/A
Relatório de monit. manual até 5 métodos		125 €		N/A	125 €		N/A	125 €		N/A
Relatório mensal de monit. automática até 3 métodos		N/A		Não aplicável	N/A		Não aplicável	N/A		Não aplicável
Relatório mensal de monit. automática até 5 métodos		N/A		200 €	N/A		200 €	N/A		200 €
Plataforma on-line mensal		N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €
Total campanha		702 €		N/A	702 €		N/A	702 €		N/A
Total por mês (4 semanas por mês)		15 444 €		950 €	8 424 €		950 €	2 808 €		950 €
Total anual (48 semanas)		185 328 €		11 400 €	101 088 €		11 400 €	33 696 €		11 400 €
Total pré monitorização Aquisição manual		31 982 €								
Total pré monitorização Aquisição automática		189 518 €								

		Cenário de obra - Aquisição manual vs aquisição automática - Deslocação 500 km									
		Cenário 1 (ou escavação)			Cenário 2 (ou construção)		Cenário 3 (ou exploração)				
		Manual		Automática	Manual		Automática	Manual		Automática	
Frequência leituras		Leitura diária		Hora a hora	Leitura trissemanal		Hora a hora	Leitura semanal		Hora a hora	
		Leituras p/ mês	22		Leituras p/ mês	12		Leituras p/ mês	4		
Período de leitura		Total meses		12	Total meses		12	Total meses		12	
Deslocação Ida e volta (km)	500	500 €		N/A	500 €		N/A	500 €		N/A	
Leitura completa		327 €		N/A	327 €		N/A	327 €		N/A	
Relatório de monit. manual até 3 métodos		Não aplicável		N/A	Não aplicável		N/A	Não aplicável		N/A	
Relatório de monit. manual até 5 métodos		125 €		N/A	125 €		N/A	125 €		N/A	
Relatório mensal de monit. automática até 3 métodos		N/A		Não aplicável	N/A		Não aplicável	N/A		Não aplicável	
Relatório mensal de monit. automática até 5 métodos		N/A		200 €	N/A		200 €	N/A		200 €	
Plataforma on-line mensal		N/A		750 €	N/A		750 €	N/A		750 €	
Total campanha		952 €		N/A	952 €		N/A	952 €		N/A	
Total por mês (4 semanas por mês)		20 944 €		950 €	11 424 €		950 €	3 808 €		950 €	
Total anual (48 semanas)		251 328 €		11 400 €	137 088 €		11 400 €	45 696 €		11 400 €	
Total pré monitorização Aquisição manual		31 982 €									
Total pré monitorização Aquisição automática		189 518 €									

Anexo IX – Análise de custo-benefício para os alvos/prismas

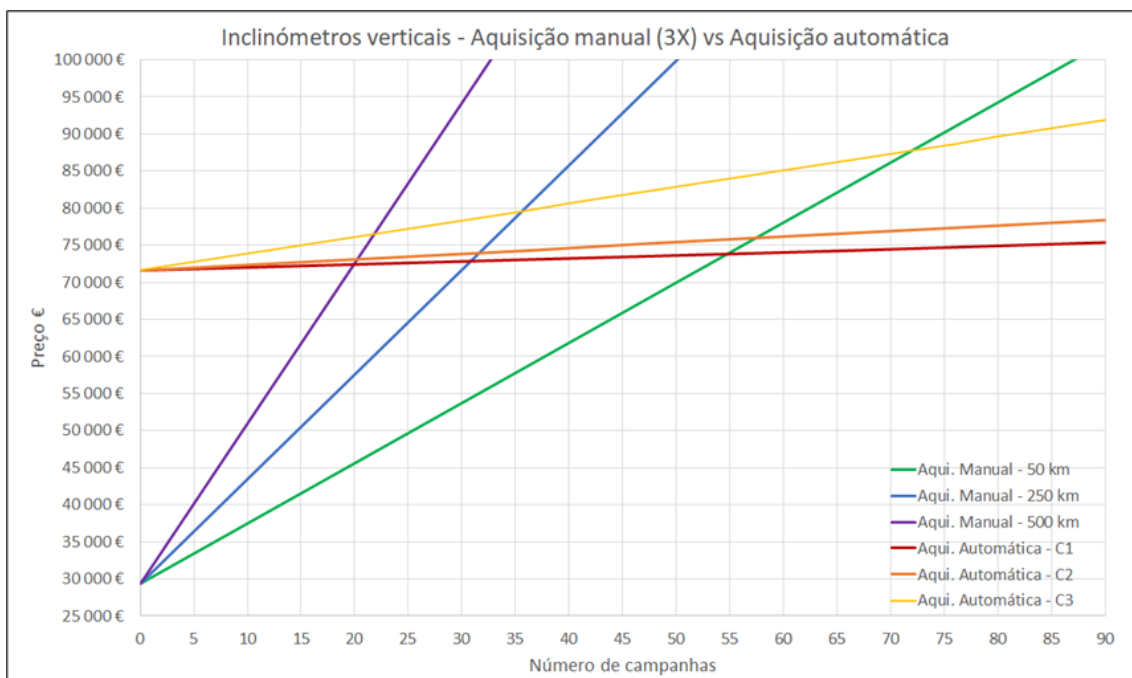
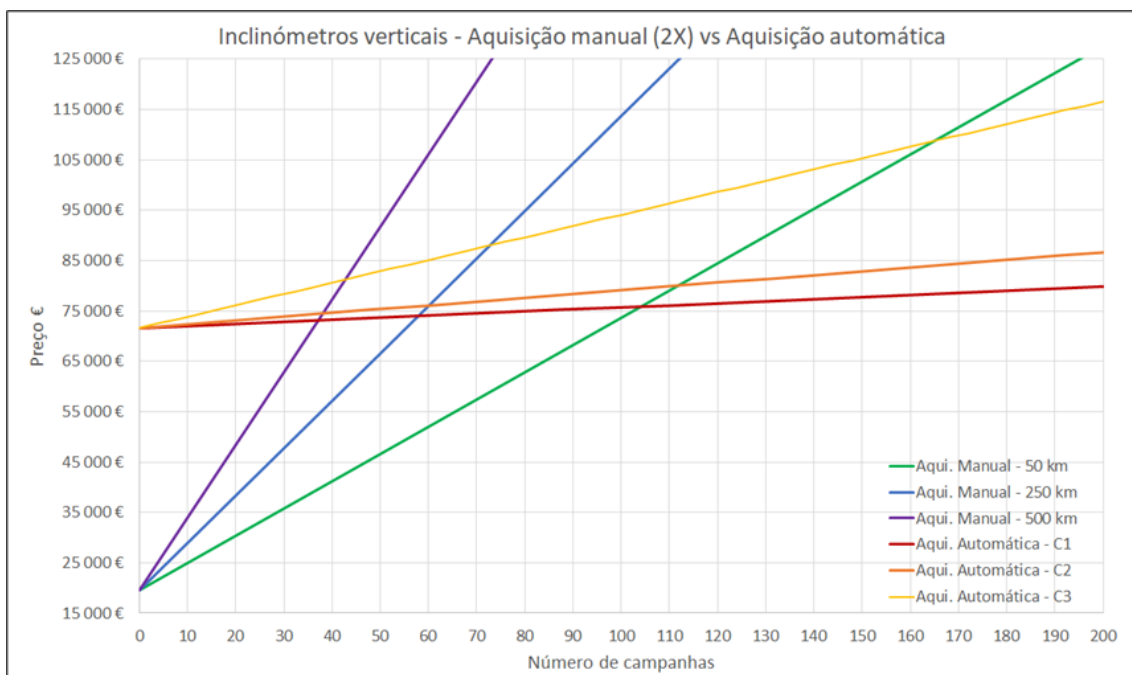
Alvos / Prismas									
“Aqui. Manual – 50 km”			“Aqui. Manual – 250 km”			“Aqui. Manual – 500 km”			
“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			
“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	
Aquisição manual 1X									
Número de campanhas	309	369	2033	161	175	288	101	106	139
Número de meses	15	31	X	8	15	72	5	9	35
Preço de Monitorização (€)	80 784	96 264	525 576	74 800	81 212	132 966	72 570	76 110	99 474
Aquisição manual 2X									
Número de campanhas	139	150	227	75	79	96	48	49	55
Número de meses	7	13	57	4	7	25	3	5	14
Preço de Monitorização (€)	73 848	79 524	119 256	70 824	74 488	90 060	70 092	71 508	80 004
Aquisição manual 3X									
Número de campanhas	89	93	118	49	50	57	31	32	34
Número de meses	5	8	30	3	5	15	2	3	9
Preço de Monitorização (€)	72 072	75 168	94 518	70 512	71 886	81 504	69 030	71 154	75 402



[página propositadamente em branco]

Anexo X – Análise de custo-benefício para os inclinómetros verticais

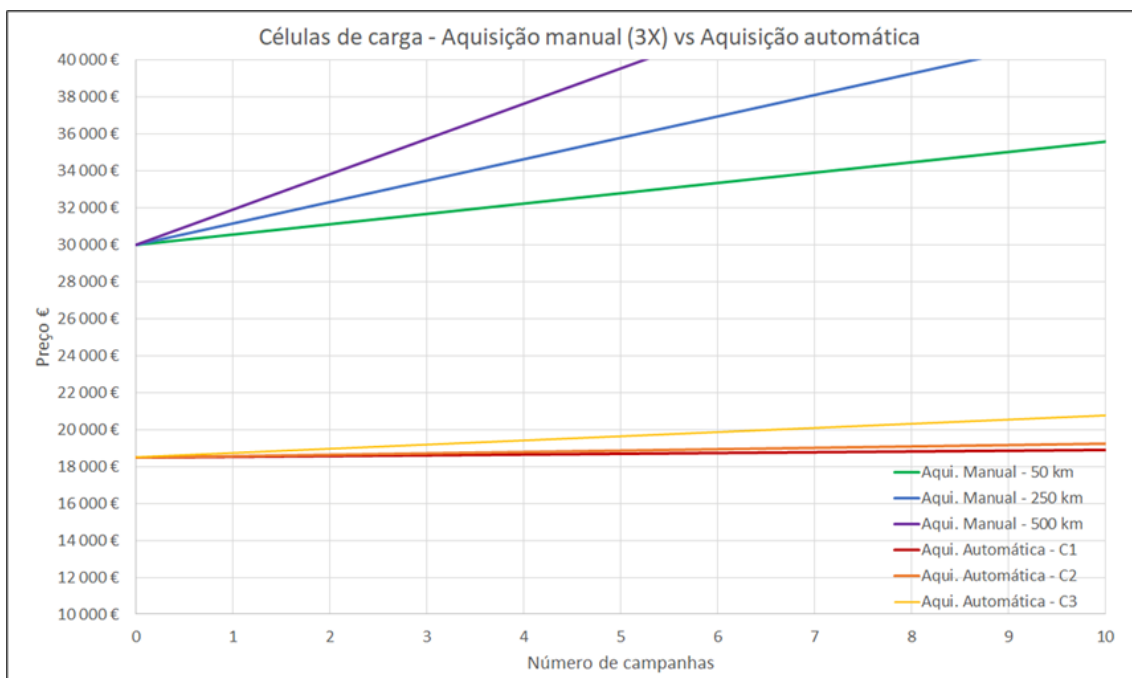
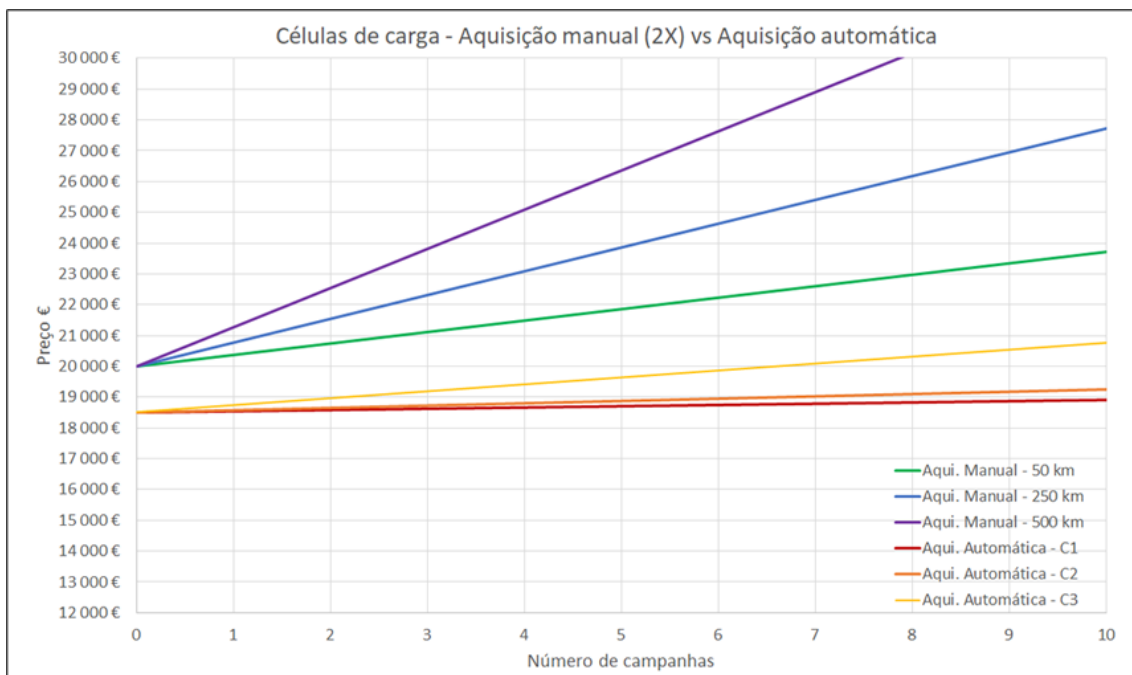
Inclinómetros verticais									
“Aqui. Manual – 50 km”			“Aqui. Manual – 250 km”			“Aqui. Manual – 500 km”			
“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			
“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	
Aquisição manual 1X									
Número de campanhas	270	317	1373	142	154	253	91	95	125
Número de meses	13	27	X	7	13	64	5	8	32
Preço de Monitorização (€)	82 708	95 398	380 518	76 548	82 188	128 718	75 328	78 208	99 808
Aquisição manual 2X									
Número de campanhas	104	112	165	58	60	73	38	39	42
Número de meses	5	10	42	3	6	19	2	4	11
Preço de Monitorização (€)	75 776	80 096	108 716	74 136	76 016	88 236	74 336	75 776	80 096
Aquisição manual 3X									
Número de campanhas	55	57	74	31	32	36	20	20	22
Número de meses	3	5	19	2	3	10	1	2	6
Preço de Monitorização (€)	73 974	75 594	89 364	73 134	74 544	80 184	72 624	72 624	76 944



[página propositadamente em branco]

Anexo XI – Análise de custo-benefício para as células de carga

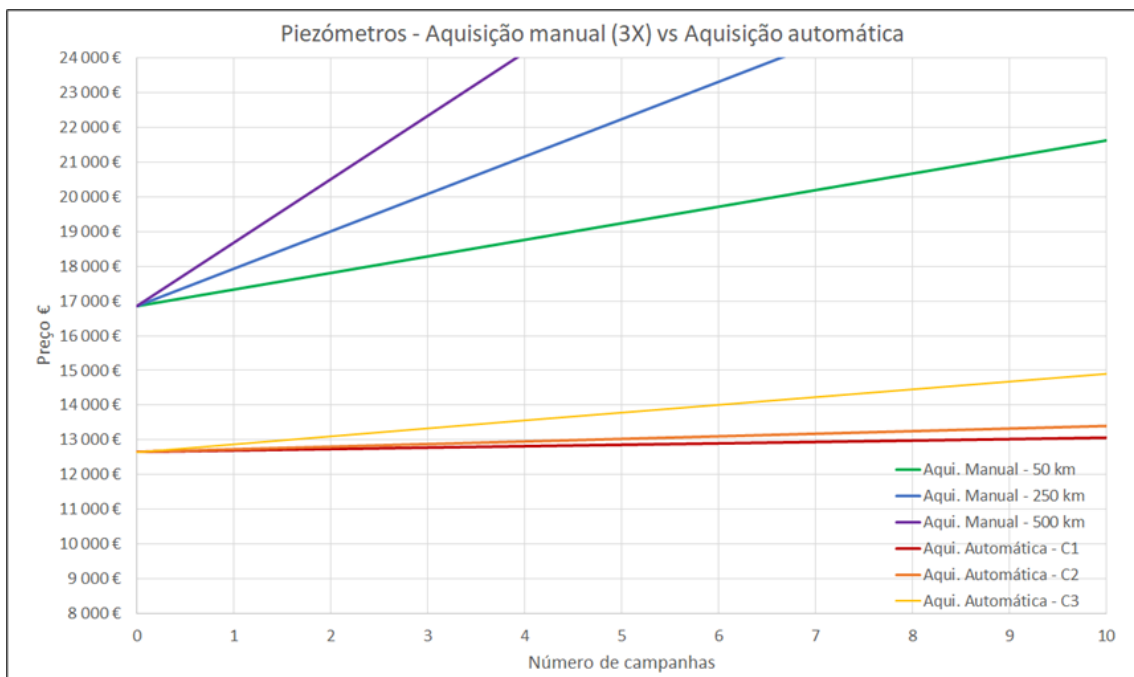
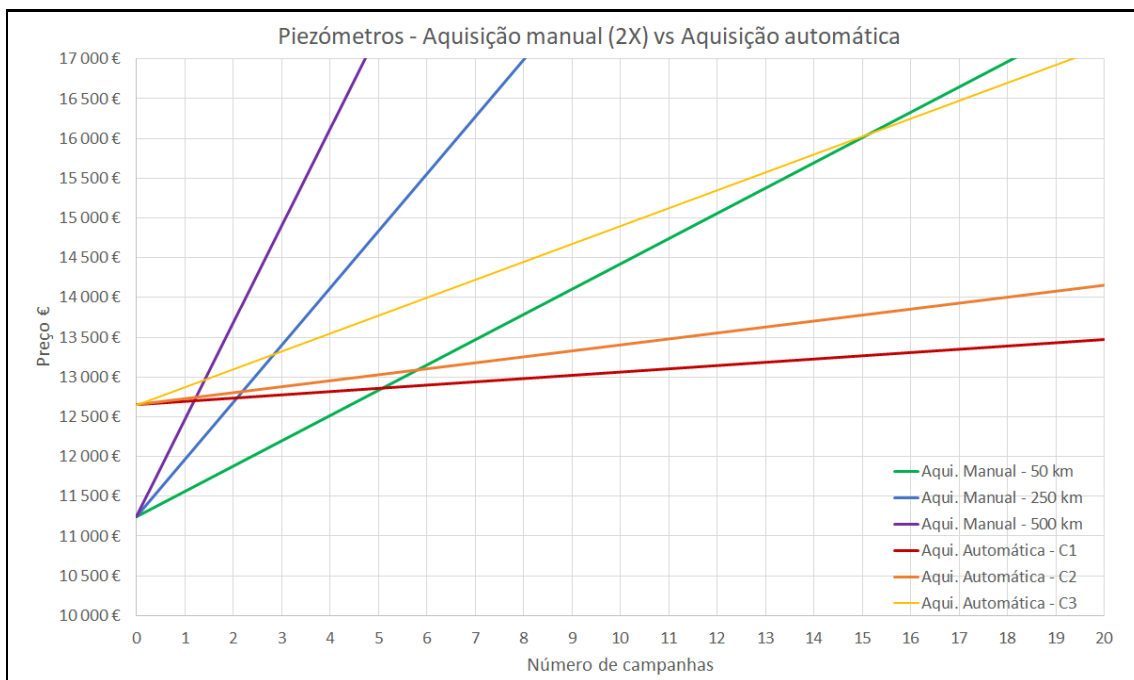
	Células de carga								
	“Aqui. Manual – 50 km”			“Aqui. Manual – 250 km”			“Aqui. Manual – 500 km”		
	“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”		
	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”
	Aquisição manual 1X								
Número de campanhas	59	77	X	25	28	53	14	16	21
Número de meses	3	7	X	2	3	14	1	2	6
Preço de Monitorização (€)	20 974	24 322	X	19 650	20 808	30 458	18 904	20 176	23 356
	Aquisição manual 2X								
Número de campanhas	0								
Número de meses	0								
Preço de Monitorização (€)	18 500								
	Aquisição manual 3X								
Número de campanhas	0								
Número de meses	0								
Preço de Monitorização (€)	18 500								



[página propositadamente em branco]

Anexo XII – Análise de custo-benefício para os piezómetros

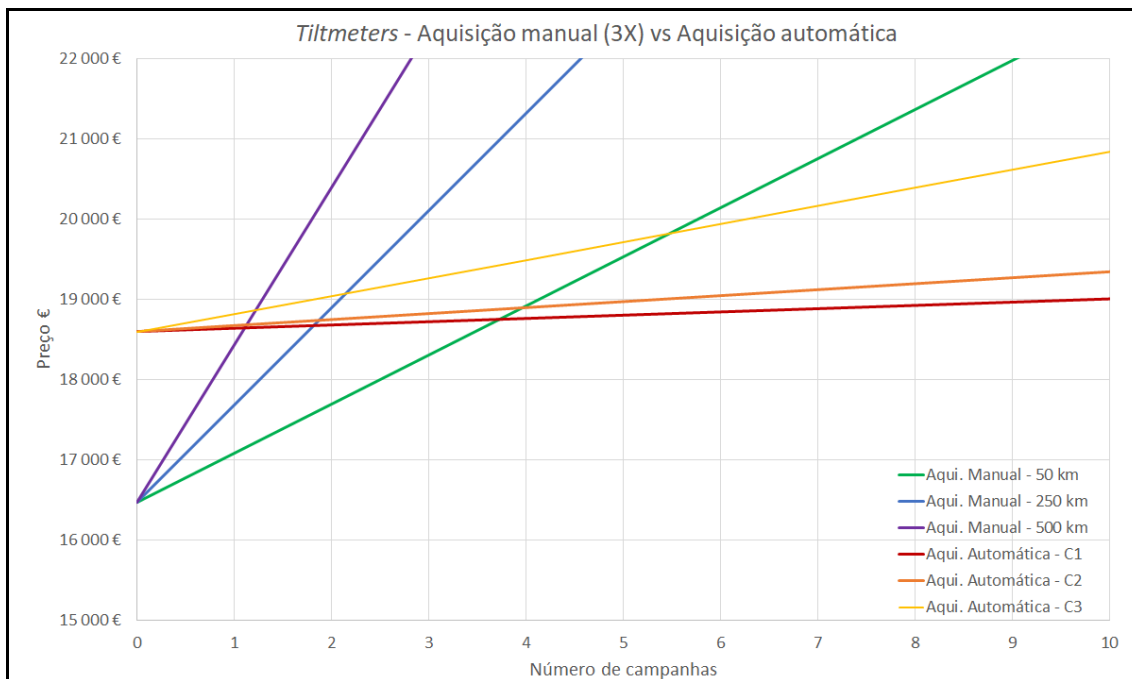
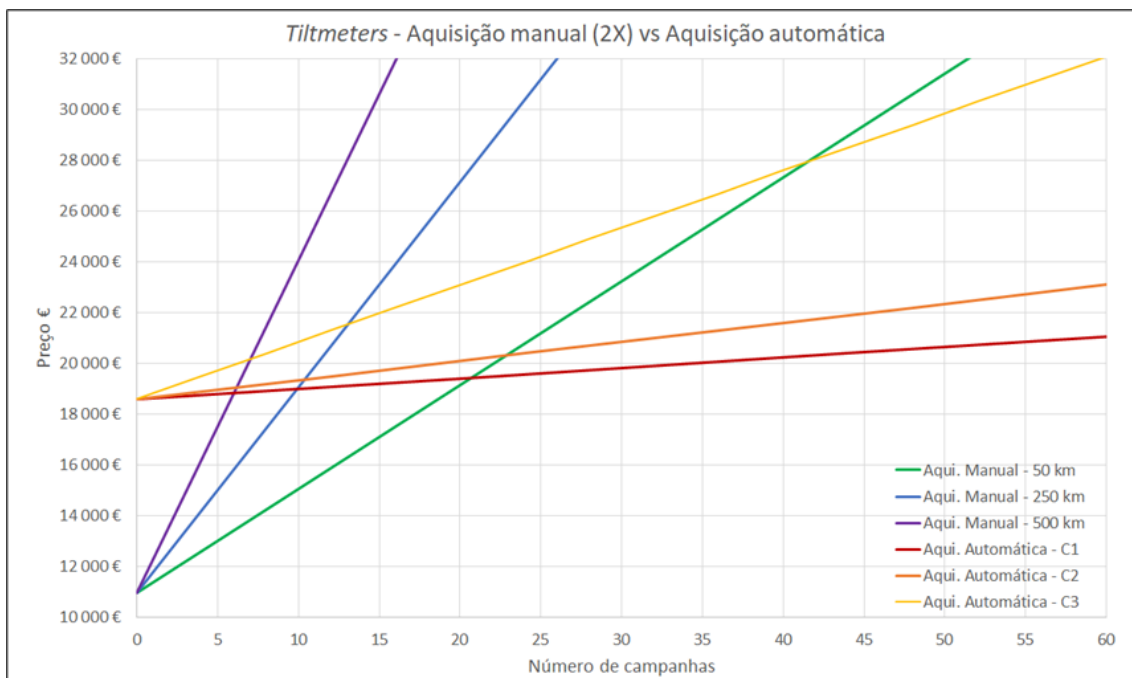
Piezómetros									
“Aqui. Manual – 50 km”			“Aqui. Manual – 250 km”			“Aqui. Manual – 500 km”			
“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			
“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	
Aquisição manual 1X									
Número de campanhas	60	85	X	22	26	52	11	13	19
Número de meses	3	8	X	1	3	13	1	2	5
Preço de Monitorização (€)	15 162	19 137	X	13 520	14 956	24 290	12 321	13 539	17 193
Aquisição manual 2X									
Número de campanhas	5	5	15	2	2	3	1	1	1
Número de meses	1	1	4	1	1	1	1	1	1
Preço de Monitorização (€)	12 834	12 834	16 014	12 680	12 680	13 398	12 662	12 662	12 662
Aquisição manual 3X									
Número de campanhas	0								
Número de meses	0								
Preço de Monitorização (€)	12 652								



[página propositadamente em branco]

Anexo XIII – Análise de custo-benefício para os *tiltmeters*

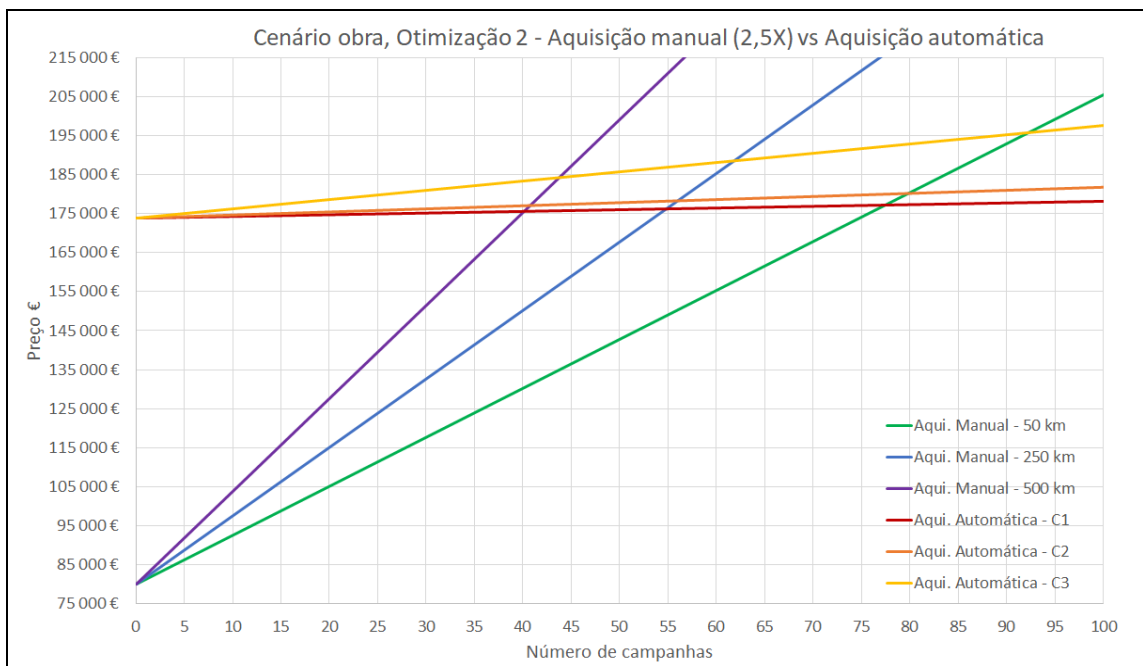
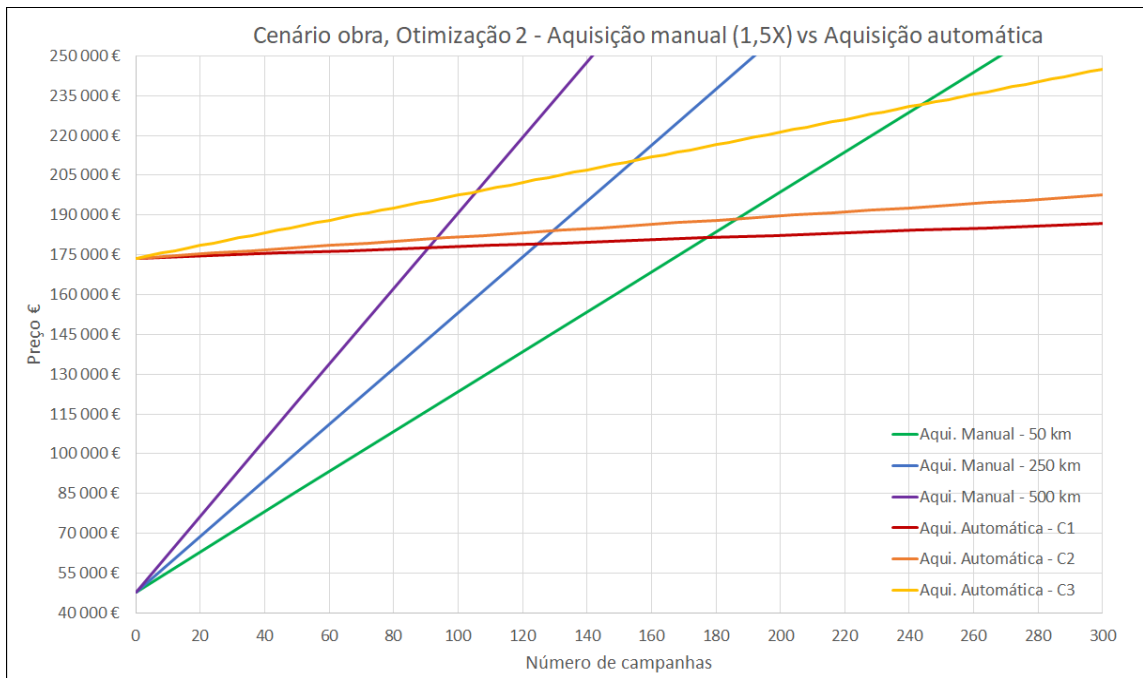
Tiltmeters									
“Aqui. Manual – 50 km”			“Aqui. Manual – 250 km”			“Aqui. Manual – 500 km”			
“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			
“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	
Aquisição manual 1X									
Número de campanhas	80	102	X	36	40	74	21	23	31
Número de meses	4	9	X	2	4	19	1	2	8
Preço de Monitorização (€)	21 810	26 298	X	20 034	21 650	35 386	19 224	20 532	25 764
Aquisição manual 2X									
Número de campanhas	21	23	42	10	10	13	6	6	7
Número de meses	1	2	11	1	1	4	1	1	2
Preço de Monitorização (€)	19 548	20 364	28 116	19 060	19 060	21 484	18 828	18 828	20 136
Aquisição manual 3X									
Número de campanhas	4	4	5	2	2	2	1	1	1
Número de meses	1	1	2	1	1	1	1	1	1
Preço de Monitorização (€)	18 918	18 918	19 530	18 894	18 894	18 894	18 432	18 432	18 432



[página propositadamente em branco]

Anexo XIV – Análise de custo-benefício para o cenário de obra

	Cenário de obra								
	“Aqui. Manual – 50 km”			“Aqui. Manual – 250 km”			“Aqui. Manual – 500 km”		
	“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”			“Aqui. Automática”		
	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”	“C1”	“C2”	“C3”
	Otimização 2								
Número de campanhas	309	335	536	214	227	305	156	162	198
Número de meses	14	27	134	9	18	76	7	13	49
Preço de Monitorização (€)	187 100	200 152	301 054	182 210	191 336	246 092	180 494	186 206	220 478
	Otimização 2 – Aquisição manual 1,5X								
Número de campanhas	177	188	244	124	131	154	91	93	106
Número de meses	9	16	61	6	11	39	5	8	28
Preço de Monitorização (€)	181 254	189 537	231 705	178 545	185 916	210 135	177 921	180 777	199 341
	Otimização 2 – Aquisição manual 2X								
Número de campanhas	115	119	143	81	83	94	59	61	66
Número de meses	6	10	36	4	7	24	3	6	17
Preço de Monitorização (€)	179 424	183 440	207 536	177 688	180 496	195 940	176 300	180 108	189 628
	Otimização 2 – Aquisição manual 2,5X								
Número de campanhas	77	80	92	55	57	62	40	41	44
Número de meses	4	7	23	3	5	16	2	4	11
Preço de Monitorização (€)	176 590	180 355	195 415	176 480	179 990	188 765	175 155	177 535	184 675
	Otimização 2 – Aquisição manual 3X								
Número de campanhas	53	55	61	38	38	42	27	27	30
Número de meses	3	5	16	2	4	11	2	3	8
Preço de Monitorização (€)	175 764	178 776	187 812	175 974	175 974	184 398	173 058	173 058	181 626



DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Eu, **João Rafael Martins da Costa Marques**, Nº CC: 14913191,

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

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

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

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

ISEP, Porto, 22 de setembro de 2025

João Rafael Martins da Costa Marques