



**NOVA**  
NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS  
DA TERRA**

CATARINA DE FREITAS SANTOS  
Licenciada em Engenharia Geológica

**LINHAS ORIENTADORAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO  
DE UM PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO EM  
ESCAVAÇÕES DE EDIFÍCIOS EM MEIO URBANO**

**MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA**

Universidade NOVA de Lisboa  
novembro, 2021



# LINHAS ORIENTADORAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE UM PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO EM ESCAVAÇÕES DE EDIFÍCIOS EM MEIO URBANO

CATARINA DE FREITAS SANTOS  
Licenciada em Engenharia Geológica

**Orientador:** Vítor Jorge da Silva Santos, Geólogo Sénior,  
Geolnt

**Coorientadores:** Ana Paula F. da Silva, Professora Auxiliar,  
Universidade NOVA de Lisboa

## **Júri:**

**Presidente:** Maria da Graça Azevedo de Brito, Professora Auxiliar,  
Universidade NOVA de Lisboa

**Vogais:** João Manuel Marcelino Mateus da Silva, Investigador  
Principal com Habilitação, LNEC  
Vítor Jorge da Silva Santos, Geólogo Sénior,  
Geolnt

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA

Universidade NOVA de Lisboa

novembro, 2021

**Linhas orientadoras para a implementação de um plano de instrumentação em escavações de edifícios em meio urbano**

Copyright ©, NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA

A NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## Agradecimentos

Ao finalizar mais uma etapa quero deixar os meus sinceros agradecimentos a todos os que me ajudaram a crescer tanto a nível pessoal como académico. Não podendo referenciar todos, destaco abaixo apenas algumas das pessoas, não querendo isto dizer que as restantes tenham menos importância.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais, Odília Santos e José Santos por todo o apoio, paciência e compreensão durante todo o meu percurso académico e pelo esforço realizado para que continuasse os estudos.

Ao Doutor Vítor Santos, pela amizade, orientação, total apoio, disponibilidade, pelas críticas e opiniões e pela transmissão dos seus conhecimentos, que possibilitaram em grande parte o desenvolvimento desta dissertação. Queria agradecer também a prontidão para solucionar todas as dúvidas, assim como pela oportunidade de estágio.

À Professora Doutora Ana Paula Silva pela amizade, clareza e rigor e pela disponibilidade para solucionar diversas dúvidas, que tornaram possível a realização da presente dissertação.

À Sofia Gomes, pela amizade, compreensão e pela transmissão dos seus conhecimentos.

Queria agradecer ao meu namorado, Guilherme Rodrigues por todo o apoio nos momentos mais árduos e difíceis.

Agradeço também a todos os meus amigos e colegas que me apoiaram ao longo destes anos, em especial à Beatriz Antunes e ao André Grunninger pela paciência e pelo companheirismo.

Agradeço também aos meus avós de coração, José Loureiro e Fernanda Loureiro e à Patrícia Loureiro e ao Maurício Branco, por todo o carinho, apoio e amizade que me transmitiram aos longos destes anos.

Muito obrigada a todos os que fizeram parte desta etapa!



## Resumo

Associado ao crescimento populacional, os locais com melhor aptidão geotécnica para eventuais construções já se encontram ocupados. Em consequência, sobram nas zonas urbanas apenas alguns espaços entre estruturas já edificadas ou os terrenos de pior qualidade. Neste contexto e nas empreitadas de construção em pleno centro urbano, o risco de ocorrerem acidentes ou incidentes, quer na obra, quer nas estruturas e infraestruturas vizinhas, é acrescido.

De modo a tornar possível a minimização daqueles potenciais eventos, e garantir a segurança, é necessário implementar um plano de instrumentação adequado de forma a prever possíveis ocorrências perigosas. Presentemente, cabe ao projetista o estabelecimento do plano, tendo em consideração as características intrínsecas de cada obra.

Esta dissertação centra-se na elaboração de uma proposta de um plano de instrumentação adequado, que sirva de base a eventuais obras de escavação de edifícios em meio urbano, com o objetivo principal de integrar os vários tipos de metodologias e tecnologias existentes no mercado de forma a melhorar a instrumentação e monitorização.

Para tal, efetua-se uma breve descrição dos diferentes parâmetros a avaliar tendo em conta o tipo de terreno e os vários equipamentos, dispositivos e instrumentos utilizados na atualidade no âmbito da observação geotécnica, considerando as alternativas de registo manual e automático. Finalmente, esboça-se uma proposta de um plano de instrumentação simples que deverá depois, face às especificidades de cada escavação e das condicionantes do meio envolvente, ser adaptado para poder responder às características de cada local.

Palavras-chave: Instrumentação base, monitorização geotécnica, escavação urbana

## **Abstract**

Due to populational growth, the best areas for construction have already been occupied. As a result, in urban areas, generally, there are only poor-quality sites or some areas available between pre-existing structures. However, when the construction work takes place in city centres, there is an increased potential risk for accidents during the construction phase that may affect the adjacent structures or the utility services.

One way to minimise those accidents is increasing the construction safety, for that, it is important and essential to implement an adequate monitoring plan to anticipate any warning of a potentially hazardous situation on the worksite or in the surrounding area. Nowadays, the monitoring plan is made by the designer, considering the intrinsic characteristics of each project.

This thesis focuses on proposing a basic monitoring plan, which may serve as a guide for futures works in urbanized areas. The main objective is to integrate several types of pre-existent methodologies and technologies to improve geotechnical monitoring.

To this aim, a brief description of several parameters to be evaluated is presented, considering the type of ground as well as the several equipment, dispositive and instruments currently used in the scope of geotechnical monitoring and considering the alternatives of manual and digital recording. Finally, a proposal for a simple monitoring plan is outlined, which given the specificities of each excavation and the constraints of the surrounding environment, can be further extended to consider any specific features of each site.

Key words: Basic instrumentation, geotechnical monitoring, urban excavation

# Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo .....	vii
Abstract .....	viii
Índice .....	ix
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Organização da dissertação.....	2
2. Escavações de estruturas em meio urbano.....	5
2.1 Enquadramento .....	5
2.2 Escavações em solo.....	5
2.2.1 Generalidades .....	5
2.2.2 Fatores de instabilização.....	6
2.3 Escavações em maciços rochosos .....	7
2.3.1 Generalidades .....	7
2.3.2 Fatores de instabilização.....	8
2.4 Tipos de rotura em escavações em solos e maciços rochosos.....	9
2.5 Influência das escavações superficiais em zonas urbanas .....	10
3. Instrumentação geotécnica .....	11
3.1 Generalidades .....	11
3.2 Objetivos.....	12
3.3 Projeto geotécnico segundo EC7 .....	13
3.4 Características dos instrumentos .....	15
3.4.1 Generalidades .....	15
3.4.2 Conformidade .....	17
3.4.3 Exatidão.....	17
3.4.4 Precisão, repetibilidade e reprodutibilidade .....	18
3.4.5 Campo de medida e resolução .....	18
3.4.6 Erros .....	18
3.5 Equipamentos utilizados para a monitorização de escavações de edifícios em meio urbano 19	
3.5.1 Generalidades .....	19
3.5.2 Taqueómetros .....	20
3.5.3 <i>Tiltmeter</i> .....	22
3.5.4 Fissurómetros.....	25
3.5.5 Inclínómetros .....	26
3.5.6 Piezómetros.....	31
3.5.7 Células de carga.....	34

3.5.8	Vibrações impostas a estruturas .....	36
4.	Plano de instrumentação proposto para escavações superficiais em meio urbano .....	39
4.1	Generalidades .....	39
4.2	Redundância das medições .....	39
4.3	Instrumentação frequentemente utilizada em Lisboa: dois casos .....	40
4.3.1	Palácio Sotto Mayor: Realce de edifício centenário e escavação profunda .....	40
4.3.2	Hospital CUF Tejo: Escavação, contenção periférica e construção até ao piso 0 41	
4.3.3	Análise dos casos de estudo .....	41
4.4	Fatores e equipamentos propostos para a monitorização de escavações superficiais em centros de cidade .....	42
4.5	Características da instrumentação .....	45
4.6	Localização da instrumentação .....	45
4.7	Frequência das leituras .....	46
4.8	Critérios de alerta e alarme .....	47
4.9	Relatórios e circuito de informação .....	48
5	Considerações finais e perspetivas futuras .....	51
5.1	Considerações finais .....	51
5.2	Perspetivas futuras .....	52
	Referências bibliográficas .....	53

## Índice Figuras

<b>Figura 1</b> - Borrão de gesso aplicado a uma fratura (Habitação Viriato, 2012).....	11
<b>Figura 2</b> – Exemplos de dois equipamentos para a avaliação das características do terreno: a) Amostrador SPT de duas meias canas com amostra de solo recolhida (SINERGEO, 2021); b) Piezocone (Gouda Geo, sem data).....	16
<b>Figura 3</b> – Alguns exemplos de equipamentos para monitorização geotécnica: a) Inclínometro (Roctest, 2018); b) Extensómetro multiponto (Encardio, 2019a) ; c) Sismógrafo (Omnidots, 2021); d) Piezómetro de corda vibrante (Geokon, 2021) .....	16
<b>Figura 4</b> - Distinção entre a exatidão e precisão (adaptado de Dunncliff and Green, 1988) ....	18
<b>Figura 5</b> -Representação de um taqueómetro (MundoGEO, 2016).....	21
<b>Figura 6</b> - Alvo topográfico (Topcon, sem data) .....	22
<b>Figura 7</b> – Tiltmeters: a) digital (Geokon, 2020b); b) corda vibrante (Geokon, 2019) .....	23
<b>Figura 8</b> – Dispositivos e equipamentos do clinómetro móvel: a) placa de apoio horizontal (Duncan and Brooks-Gunn, 2006); b) Tiltmeter apoiado em placa vertical (Sisgeo, 2017) .....	24
<b>Figura 9</b> - Wireless tiltmeter (Encardio, 2020b).....	24
<b>Figura 10</b> – Fissurómetros: a) ótico (Direct Industry, 2021); b) triaxial mecânico (Geokon, 2015); c) triaxial de corda vibrante (Encardio, 2014) .....	26
<b>Figura 11</b> - Sistema de eixos A e B da calha inclinométrica (adaptado de Bassett, 2012) .....	27
<b>Figura 12</b> – Aspeto de dois tipos de calhas inclinométrica (Encardio, 2020a) .....	28
<b>Figura 13</b> – Inclínometro: a) Torpedo; b) Inserção adequada na calha (adaptada de Bassett, 2012) .....	29
<b>Figura 14</b> - Exemplo da evolução de deformações registadas por inclinómetros .....	30
<b>Figura 15</b> - Desenho simplificado de um piezómetro de tubo aberto.....	32
<b>Figura 16</b> - Sonda piezométrica (MaasEcología, sem data) .....	32
<b>Figura 17</b> - Esquema dos componentes principais de um piezómetro hidráulico de tubo duplo .....	32
<b>Figura 18</b> - Esquema dos componentes principais de piezómetros pneumáticos.....	33
<b>Figura 19</b> - Esquema dos componentes principais de um piezómetro de corda vibrante .....	33
<b>Figura 20</b> - Representação dos vários tipos de células de carga; a) Hidráulica; b) Elétrica (Geokon, 2020a); c) Corda vibrante (Encardio, 2019b).....	35
<b>Figura 21</b> - Esquemática da localização dos equipamentos, instrumentos e dispositivos ..	46

**Figura 22** - Esquematização de um circuito de informação funcional..... 49

## Índice Tabelas

<b>Tabela 1</b> – Gama de variação do coeficiente de permeabilidade consoante o tipo de solo (adaptado de Das, 2009).....	7
<b>Tabela 2</b> - Tipos de rotura em taludes (adaptado de Hungr, Leroueil and Picarelli, 2014).....	9
<b>Tabela 3</b> - Principais características dos sistemas piezométricos (adaptado de ISO 18674-4, 2020) .....	34
<b>Tabela 4</b> – <i>Características das várias células de carga (adaptada de Dunncliff and Green, 1988)</i> .....	36
<b>Tabela 5</b> - Características dos equipamentos e instrumentos ( <i>Encardio 2019; Geokon 2020; Omnidots 2021</i> ). .....	45
<b>Tabela 6</b> - <i>Frequência de leituras consoante a fase da obra</i> .....	47

## **Lista de abreviaturas (siglas)**

EC7 – Eurocódigo 7

EDM – Medições Eletrônicas de Distâncias

MEMS - Sistemas Micro eletromecânicos

MIT - Massachusetts Institute of Technology

NF – Nível freático

SI – Sistema Internacional

# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento do tema

Os acidentes geotécnicos em zonas urbanas são um problema que tem vindo a aumentar ao longo do tempo, uma vez que acional os locais de melhor qualidade já se encontram ocupados. Com isto, em zonas urbanas, restam para a expansão devido ao aumento populacional geralmente espaços entre prédios e terrenos de pior qualidade, como zonas em aterro.

Por outro lado, as novas diretrizes de planeamento urbano são no sentido da recuperação dos edifícios existentes o que, aliado à falta de estacionamento em zonas densamente urbanizadas, implica muitas vezes a realização de escavações profundas, sob edifícios antigos.

Escavações em zonas urbanas densamente habitadas vão expor as estruturas e infraestruturas envolventes a riscos, pelo que frequentemente as escavações são objeto de um projeto de contenção, que na região de Lisboa incluem paredes moldadas sempre que existam solos com nível freático identificado acima da cota de base da escavação; noutras situações geralmente recorre-se a muros de contenção. Quando são atingidas profundidades elevadas, é frequente a amarração destas estruturas de contenção para impedir a deformação.

Uma forma de verificar e acompanhar as potenciais alterações que ocorrem nas imediações durante a execução de trabalhos de escavação (em todas as fases de uma obra) é pela implementação de um plano de instrumentação e observação, que irá permitir um registo de todas as alterações impostas ao meio envolvente, proporcionando um acompanhamento constante e a previsão atempada da ocorrência de qualquer tipo de acidente, quer em obra, quer nas estruturas ou infraestruturas vizinhas. Devem ser implementados critérios de qualidade para garantir uma monitorização adequada, critérios estes que passam pela seleção dos equipamentos/instrumentos a utilizar, bem como pelo seu desempenho.

Segundo Russo, Brainerd and Vatovec (2008) a implementação de instrumentação poderá parecer dispendiosa numa fase inicial, no entanto a falta da mesma poderá originar ocorrências gravosas, que certamente irão encarecer a obra. Assim, projetistas e empreiteiros necessitam de reconhecer a importância da monitorização geotécnica.

A aplicação destes planos envolve uma relação direta entre a capacidade dos equipamentos de medição e a capacidade que os técnicos apresentam para a sua execução, bem como um balanço entre custos e benefícios. Para uma instrumentação geotécnica correta tem de existir um processo bem definido, que torne possível a identificação do objetivo a tratar bem como a sua finalidade (Dunnicliff and Green, 1988).

Com o avanço das novas tecnologias e devido às diferentes formas de implementação de instrumentos, equipamentos, dispositivos e dos parâmetros a monitorizar surgiu um grande desenvolvimento dos mesmos. Uma instrumentação correta deve responder às seguintes questões (Eberhardt and Stead, 2011):

- Quais são os objetivos da monitorização?
- Quais os parâmetros a monitorizar e intervalos de variação expectáveis (grandezas a medir)?
- Que riscos podem existir e quais as magnitudes dos movimentos?
- Qual a localização ideal para a instrumentação, de modo a obter uma amostra representativa da zona envolvente?

Atualmente existem escavações sem planos de instrumentação ou com instrumentação insuficiente. Estas falhas podem resultar por parte da falta de conhecimento do projetista neste domínio, pelo que é necessário a implementação de linhas orientadoras para os requisitos básicos de instrumentação de áreas urbanas, particularmente de zonas históricas. A observação geotécnica é essencial, uma vez que a medição pontual, por amostragem, com equipamentos ou instrumentos é complementada por inspeções visuais.

A temática a desenvolver nesta dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Geológica na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (NOVA) visa propor linhas orientadoras que sirvam de suporte à definição do plano de instrumentação a aplicar em escavações para edificações em meios urbanos, respondendo deste modo à problemática organizativa e às situações de omissão ou indefinição que existem atualmente.

## **1.2 Organização da dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo que no primeiro é feita uma breve descrição da temática, da razão de ser da dissertação e da problemática associada a alguns projetos em meio urbano, que não especificam planos de instrumentação ou especificam planos inadequados, definem-se as questões orientadoras para a execução de planos adaptados a escavações de edifícios em meio urbano.

No segundo capítulo é realizado o enquadramento de escavações de edifícios urbanos, evidenciando os principais problemas e riscos associados à crescente necessidade de escavações em locais urbanizados, quer sejam novas construções em espaços ainda disponíveis, quer seja a reabilitação de edifícios antigos.

O terceiro capítulo apresenta um breve enquadramento da instrumentação, com abordagem aos equipamentos, dispositivos e instrumentos mais comuns disponíveis no mercado e é definido um plano de instrumentação segundo o Eurocódigo (EC) 7 (NP EN 1997-1:2010). É ainda realizada uma descrição dos tipos de equipamento a utilizar, da importância da redundância das medições, dos métodos de instalação, da recolha de dados e da frequência das leituras, dos circuitos de distribuição de informação e mecanismos de alarme e alerta, bem como dos planos de contingência e a garantia da sua implementação em caso de necessidade.

No Capítulo 4 apresentam-se dois casos de estudo e desenvolve-se uma proposta de um plano de instrumentação tipo, adaptado a escavações de edifícios em meio urbano, considerando não só os principais objetivos da instrumentação, mas também todos os aspetos económicos envolvidos. Esta proposta visa o preenchimento das lacunas existentes por omissão de instrumentação.

Por último, o último capítulo apresenta as considerações finais da dissertação.



## **2. Escavações de estruturas em meio urbano**

### **2.1 Enquadramento**

No decorrer de escavações em meio urbano, em particular em zonas antigas, é necessária uma atenção acrescida à estabilidade, uma vez que existem várias estruturas que podem sofrer colapsos ou roturas se a construção não for bem executada e acompanhada do ponto de vista técnico.

Como referido e quando é executada uma escavação, são exercidas alterações no campo de tensão do terreno, que podem ser traduzidas sob a forma de deformações, deslizamentos, roturas, entre outros, podendo provocar colapsos e danos, quer na obra em execução quer na zona envolvente contígua.

Um dos principais fatores para estes acidentes é o desconhecimento das características geotécnicas dos solos, essencialmente a respetiva resistência, deformabilidade, permeabilidade e granulometria. O mesmo acontece em relação à falta de conhecimento sobre as propriedades dos maciços rochosos como, o grau de alteração, o sistema de discontinuidades ou o tipo de rocha, entre outros.

Assim, é relevante realizarem-se estudos geológicos e geotécnicos de pormenor, que permitam a definição dos parâmetros característicos dos terrenos para fundamentar o projeto.

Neste capítulo abordam-se, de uma forma generalizada, os conceitos básicos referentes à problemática supra exposta.

### **2.2 Escavações em solo**

#### **2.2.1 Generalidades**

Os materiais constituintes da crosta encontram-se divididos para fins de engenharia em duas categorias: solos e maciços rochosos. Um solo é caracterizado como um material que não oferece resistência intransponível à escavação mecânica e que perde a totalidade da resistência quando em contacto prolongado com a água (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996).

Os solos são formados essencialmente por sedimentos provenientes da decomposição e degradação física e química de rochas podendo conter alguma matéria orgânica. Os espaços vazios entre as partículas denominam-se de poros ou vazios e podem estar preenchidos por ar, água ou ambos, sendo que quando se encontram completamente preenchidos por água diz-se que o solo está saturado (Fernandes, 2016).

Segundo Fiori (2015), “uma massa de solo pode ser descrita através das suas propriedades físicas como o peso volúmico, o teor em água, índices de vazios, entre outras e pelas suas propriedades mecânicas, como o ângulo de atrito interno e coesão.” A determinação das propriedades físicas pode ser realizada em laboratório e pequenas variações nos seus valores não têm influência significativa no comportamento que o solo terá. Por sua vez, qualquer que seja a variação das propriedades mecânicas pode afetar consideravelmente o equilíbrio das forças no seu seio, alterando-o e, conseqüentemente, diminuem a segurança em obra (op. cit.).

O solo é geralmente classificado de acordo com a granulometria, como cascalho, areia, silte ou argila, sendo que em solos com granulometria fina (siltos e argilas), a presença de água aumenta consideravelmente a plasticidade e diminui a coesão, tornando-os mais suscetíveis a acidentes geotécnicos (Das, 2009).

Os solos grosseiros (arenosos ou cascalhentos) distinguem-se dos argilosos essencialmente pela sua granulometria (de maiores dimensões) e pela maior quantidade de espaços vazios entre os grãos que os constituem. Estes solos são geralmente designados por não coesivos, uma vez que é formado por material grosseiro solto, enquanto a argila é considerada um solo coesivo, visto que devido às suas reduzidas dimensões os espaços vazios são praticamente inobserváveis a olho nu.

A diferença entre solos de carácter arenoso e argiloso irá influenciar o comportamento do maciço em termos da dificuldade de escavação, da estabilidade e dos mecanismos de percolação de água, que se faz através dos poros.

### **2.2.2 Fatores de instabilização**

A água é um dos principais fatores que irá condicionar o comportamento destes terrenos, pelo que é mais gravosa para terrenos de granulometria fina, uma vez que não circula com facilidade, ficando aderente às partículas (lamelas) argilosas, aumentando a plasticidade, o que irá influenciar a estabilidade, induzindo deslizamentos (Holtz, Kovacs and Sheahan, 2011).

Um material diz-se permeável quando existem espaços vazios interligados, que permitem a circulação livre da água de locais de maior para menor energia. A permeabilidade dos solos de fundação é um dos principais fatores a ter em conta durante uma obra, uma vez que pode encarecer ou originar dificuldades nas operações de construção. Para tal é necessário estimar a infiltração sob várias condições hidráulicas, de modo a averiguar problemas que poderão existir durante as várias fases da construção (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996; Das, 2009).

A condutividade hidráulica ou permeabilidade de acordo com o Sistema Internacional (SI) é expressa em m/s e depende essencialmente da porosidade, da granulometria dos materiais e do grau de saturação, variando consoante o tipo de solo (Das, 2009). A Tabela 1 apresenta alguns dos valores para os materiais mais comuns.

**Tabela 1** – Gama de variação do coeficiente de permeabilidade consoante o tipo de solo (adaptado de Das, 2009)

Tipo de solo	Permeabilidade (m/s)
Seixo	$10^{-1} - 10^{-2}$
Areia grossa	$10^{-2} - 10^{-4}$
Areia fina	$10^{-4} - 10^{-5}$
Argila siltosa	$10^{-5} - 10^{-7}$
Argila	$< 10^{-7}$

Outro fator que influencia o comportamento de um terreno, é a imposição de solicitações, uma vez que, quando impostas a solos saturados, predominantemente arenosos, a pressão existente nos poros aumenta, mas uma drenagem rápida da água, faz com que o volume do solo diminua, dando origem a assentamentos imediatos. Dado a elevada permeabilidade dos solos arenosos, esta redução irá ocorrer em simultâneo com os processos de compactação (Das, 2019). Em areias grosseiras limpas (percentagem de argila  $< 5\%$ ), os assentamentos tendem a ocorrer na fase de construção, enquanto que em areias grosseiras com um teor de argila  $> 10\%$  e em areias médias e finas, como não drenam a água com tanta facilidade, os assentamentos podem ocorrer após a fase de construção (Budhu, 2015).

No caso de solos argilosos saturados, o aumento da pressão da água nos poros quando submetidos a um carregamento irá promover um comportamento não drenado, isto advém do coeficiente de permeabilidade destes solos ser baixo, o que impossibilita uma drenagem eficiente da água, fazendo com que esta se escoe lentamente, ao longo de um determinado período de tempo. Deste modo, os processos de consolidação das argilas continuam para além do assentamento imediato (aquando da imposição do carregamento), promovendo assentamentos graduais, tornando-os mais perigosos (Das, 2019). A dissipação do acréscimo da pressão intersticial da água pode ocorrer ao longo de décadas, durante o período de vida da obra (Budhu, 2015).

## **2.3 Escavações em maciços rochosos**

### **2.3.1 Generalidades**

Segundo Terzaghi, Peck and Mesri (1996), uma definição simplista para uma rocha é “um agregado natural de minerais conectados por forças coesivas permanentes”.

Em comparação com outros materiais utilizados em obras de engenharia, as rochas, e ao contrário dos solos, apresentam uma resistência de pelo menos 2 MPa. Na maioria das obras, estas são removidas do maciço que integram e, como tal, é necessário avaliar o seu comportamento, uma vez que o estado de tensão será perturbado. Antes da realização de

qualquer trabalho, é necessário avaliar algumas propriedades do terreno, tais como a litologia, o grau de alteração, o estado de tensão, a existência de descontinuidades e das suas características, bem como as condições hidrogeológicas (Hudson and Harrison, 1997).

Perante a execução de uma obra e para uma previsão atempada de potenciais acidentes, devem ser sempre considerados os seguintes aspetos (Jaeger, Cook and Zimmerman, 2007):

- (i) Definição de todas as litologias presentes na área em estudo;
- (ii) Realização do estudo detalhado das descontinuidades envolventes, bem como das características mecânicas do maciço.

### **2.3.2 Fatores de instabilização**

O tempo de vida da maioria das infraestruturas encontra-se compreendido entre 50 e 100 anos. Para garantir a sua segurança, é necessário um conhecimento adequado das propriedades geológicas e geotécnicas dos terrenos (Price, 2009). Dependendo dos processos de formação, as rochas encontram-se divididas em três grandes grupos:

Sedimentares, resultantes da consolidação de sedimentos pré-existentes;

Magmáticas, formadas a partir do arrefecimento de magmas;

Metamórficas, que resultam da exposição prolongada de rochas pré-existentes a elevadas temperaturas e/ou pressões.

A classificação do terreno deve ser realizada antes do início dos trabalhos, uma vez que as propriedades e o comportamento variam consoante o tipo de rocha.

Os materiais constituintes das rochas são de origem natural e sofrem ao longo do tempo alterações químicas, mecânicas e termais. Durante estes processos, as descontinuidades foram formadas devido à ocorrência de eventos geológicos resultantes dos vários estados de tensão impostos aos terrenos. Estas descontinuidades condicionam o comportamento do maciço relativamente à deformabilidade, resistência e permeabilidade (op. cit.).

O grau de alteração também é um fator a ter em conta, uma vez que grande parte das obras ocorrem à superfície ou próximo desta, o que significa que o maciço se encontra exposto a agentes erosivos e meteóricos. Estes provocam degradação física e química das rochas, promovendo a diminuição da resistência, tornando-as mais suscetíveis a acidentes. Em função do tipo de rocha e dos minerais que a constituem, a meteorização pode ocorrer com maior ou menor facilidade; por exemplo no caso de calcários, deve existir uma atenção acrescida pois a percolação de água pode provocar a dissolução do carbonato de cálcio que os constituem ao longo do tempo e, como tal, formam-se cavidades, designadas de cárnicas (Price, 2009).

## 2.4 Tipos de rotura em escavações em solos e maciços rochosos

Nos taludes de escavações, podem ocorrer deslizamentos induzidos pela percolação de água e, em escavações superficiais, os comportamentos de rotura dos maciços assemelham-se aos movimentos em encostas naturais. A Tabela 2 classifica os principais comportamentos espectáveis dos materiais envolvidos em instabilizações.

No caso de solos, o respetivo deslizamento relaciona-se essencialmente com granulometria (arenoso ou argiloso), e com a presença de água e sua facilidade de circulação. Em solos com fração argilosa, geralmente a afinidade dos finos com a água induz um comportamento plástico promovendo assentamentos gravosos. Em solos predominantemente arenosos, e ao contrário dos anteriores, a sua elevada permeabilidade irá promover a circulação de água, induzindo fenómenos de piping (erosão interna em tubos).

Nos maciços rochosos, os mecanismos de rotura estão associados essencialmente à existência de famílias de diaclases e pela percolação da água ao longo delas. Dependendo da sua orientação, da persistência, do enchimento e da abertura, é possível observar diversos mecanismos de rotura.

**Tabela 2 - Tipos de rotura em taludes (adaptado de Hungr, Leroueil and Picarelli, 2014)**

<b>Movimento</b>	<b>Tipo de material envolvido no movimento</b>	
<b>Queda (Fall)</b>	rocha/gelo ( <i>rock fall</i> )	dejetos ( <i>debris fall</i> )
<b>Deslizamentos (Slide)</b>	planar de rocha ( <i>rock planar slide</i> )	rotacional de solos ( <i>clay/silt rotational slide</i> )
	em cunha de rocha ( <i>rock wedge slide</i> )	
	composto de rocha ( <i>rock compound slide</i> )	planar de solos ( <i>clay/silt planar slide</i> )
	irregular de rocha ( <i>rock irregular slide</i> )	dejetos ( <i>debris slide</i> )
<b>Tombamentos (Topple)</b>	de blocos ( <i>rock block topple</i> )	de solos ( <i>gravel/sand/silt topple</i> )
	flexura de rocha ( <i>rock flexural topple</i> )	
<b>Expansão (Spread)</b>	de taludes rochosos ( <i>rock slope spread</i> )	Liquefação de solos ( <i>sand/silt liquefaction spread</i> )
<b>Fluxo (Flow)</b>	de rocha/gelo ( <i>rock/ice avalanche</i> )	de solo ( <i>sand/silt/debris flow</i> )
<b>Deformação do talude (Slope deformation)</b>	deformação de taludes montanhosos ( <i>mountain slope deformation</i> )	deformação de taludes terrosos ( <i>soil slope deformation</i> )
	deformação de talude rochoso ( <i>rock slope deformation</i> )	deformação de solos por ação da gravidade ( <i>soil creep</i> )

Do exposto e em função do tipo de terreno em apreço, a instrumentação a adotar será diferente.

## 2.5 Influência das escavações superficiais em zonas urbanas

Com a ocorrência de eventuais deformações do terreno durante uma escavação, as estruturas vizinhas podem sofrer assentamentos diferenciais, promovendo o desenvolvimento de fraturas ou, no limite, o desabamento do edifício, ou parte deste.

A capacidade que a estrutura tem para conter os deslocamentos encontra-se relacionada com o tipo de fundação para a qual foi construída e com o tipo de material de construção (Duncan and Brooks-Gunn, 2006).

Antes da execução de qualquer trabalho deve ser realizada uma análise cuidada de todos os fatores mencionados anteriormente, de modo prever quais os valores de assentamento admitidos às estruturas (*op. cit.*).

As escavações a executar assim como as contenções devem ser definidas tendo em conta a forma, a área e a altura do local, bem como as condições geológicas existentes, os níveis freáticos e o estado de degradação e alteração das edificações circundantes (*op. cit.*).

Apesar dos assentamentos em estruturas ocorrerem principalmente como resultado da escavação, estas podem já encontrar-se danificadas por outras razões, pelo que devem ser inicialmente realizadas inspeções com o principal objetivo de registar de todas as eventuais irregularidades, antes de se proceder à empreitada de construção, evitando assim futuras situações de litígio.

## 3. Instrumentação geotécnica

### 3.1 Generalidades

Todas as construções necessitam de uma monitorização em tempo real, pois quando as condições naturais do terreno são alteradas podem ocorrer problemas inesperados. Para tal, recorre-se essencialmente à implementação de planos de instrumentação, tornando-os uma ferramenta base aplicada a qualquer projeto de engenharia para a deteção do perigo de deformações excessivas e, no limite, até à sua falha. Estes planos devem ser implementados por engenheiros responsáveis que apresentem um bom conhecimento dos métodos, dispositivos, equipamentos e instrumentos existentes (Segalini, Carri and Savi, 2017).

Os primeiros relatos de instrumentação geotécnica como auxílio às inspeções visuais no campo tiveram origem entre 1930/40. Um dos primeiros dispositivos de monitorização implementado foram os testemunhos de gesso, utilizados para o controlo da abertura de fendas, sobre as quais eram aplicados; posteriormente eram seguidos através de inspeções visuais periódicas para averiguar se o movimento persistia - Figura 1. Em relação aos instrumentos/equipamentos, os primeiros a surgir foram os mecânicos e hidráulicos, seguidos dos elétricos e pneumáticos, tornando a instrumentação progressivamente mais segura e complexa (Dunnicliff and Green, 1988).

Atualmente já existem instrumentos de fibra ótica, mais precisos e fiáveis por serem insensíveis a campos elétricos ou magnéticos e permitirem uma monitorização quase continua (a cada metro) e com elevada frequência de registos, da variação de tensão ao longo de um alinhamento do cabo de fibra.



**Figura 1** - Borrão de gesso aplicado a uma fratura (Habitação Viriato, 2012)

Embora exista uma grande diversidade de instrumentos/equipamentos disponíveis, é necessária uma análise adequada para aferir quais são os mais indicados para os vários tipos de estrutura ou infraestrutura a monitorizar e qual deverá ser a sua localização para a obtenção de resultados representativos das situações mais adversas. Assim, uma instrumentação adequada não está apenas dependente da escolha apropriada dos equipamentos/instrumentos, mas também de todo o procedimento de conhecimento das estruturas por parte do engenheiro, para que sejam otimizados, em termos de quantidades, a utilizar e para que a localização abranja áreas representativas (Dunnicliff and Green, 1988).

No que diz respeito às quantidades a instalar, é necessário realizar uma análise detalhada da área para evitar a colocação de dispositivos em excesso, dificultando o acesso e, conseqüentemente, a recolha dos dados. Por outro lado, se for colocada uma quantidade inferior à necessária, quer por razões económicas, quer por análise deficiente da área, os dados registados poderão não ser suficientemente representativos, o que irá dificultar a análise e a interpretação (Segalini, Carri and Savi, 2017).

Numa definição atualizada e objetiva, a instrumentação geotécnica acompanhada de inspeções visuais, isto é a monitorização, devem ser parte integrante da gestão dos riscos de qualquer projeto de escavação.

## **3.2 Objetivos**

O principal objetivo inerente à realização de instrumentação é promover a segurança na intervenção realizada, o que se alcança através da comparação das tensões e deformações estimadas na fase de projeto, com as realmente verificadas durante a fase de execução e ao longo do período de exploração (Oliveira, Brandt and Leão, 2016).

Simultaneamente e com o objetivo principal de garantir a segurança de estruturas ou infraestruturas, de modo a evitar eventuais deformações excessivas ou acidentes, é possível verificar a adequabilidade do projeto idealizado face às condições geológicas e geotécnicas reais observadas.

Um terceiro objetivo ambicioso da monitorização geotécnica é a otimização de projetos, adequando-os às condições reais do terreno, através da análise de uma base de dados das deformações observadas. Este propósito é normalmente concretizado em obras lineares subterrâneas extensas, como é o caso de túneis, onde a análise das deformações registadas permite validar ou, se necessário redimensionar, o revestimento primário, e por vezes o definitivo. Em escavações de edifícios tal só seria possível se a referida base de dados fosse disponibilizada a todos, visto que se trata de espaços de pequenas dimensões e restritos, onde não há a possibilidade de otimização dos projetos dentro da própria área.

De modo geral e segundo Duncan and Brooks-Gunn (2006), a monitorização de escavações em zonas urbanas tem por finalidade:

- Garantir a segurança em obra através da implementação de um sistema de alerta que permita a adoção de medidas para evitar acidentes, uma vez que serão promovidas várias alterações no terreno original durante os trabalhos de construção;
- Preservar a segurança das estruturas e infraestruturas envolventes;
- Confirmar as características geológicas existentes e o seu comportamento face à escavação;
- Garantir a segurança a longo prazo, pois em alguns casos é necessária uma monitorização contínua, mesmo após a conclusão da empreitada;
- Garantir uma avaliação do estado de preservação e as condições estruturais das edificações envolventes antes da empreitada para evitar potenciais disputas em tribunal.

Tendo em atenção todos os aspetos acima analisados e considerando todas as particularidades das escavações e os fatores económicos implícitos, existem vários instrumentos, dispositivos e métodos de observação a aplicar a cada projeto (op. cit.).

### **3.3 Projeto geotécnico segundo EC7**

O Eurocódigo 7 - EC7, surge com o principal objetivo de integrar e sintetizar todos os procedimentos base para a execução de dado um projeto geotécnico.

O projeto geotécnico deve apresentar, de forma clara, as condições de estabilidade dos terrenos, a natureza e as dimensões das estruturas a construir, bem como o tempo de vida útil, as condições da zona envolvente, os níveis de freáticos e a sismicidade. Deve ser também incluída a caracterização geotécnica e ser feita uma distinção entre os vários tipos de estruturas e os respetivos requisitos de estudo (NP EN 1997-1:2010).

Antes da realização de qualquer tipo de trabalho é importante definir as várias categorias de estruturas segundo o EC7 (op. cit.):

- Categoria Geotécnica 1: estruturas simples e de pequenas dimensões;
- Categoria Geotécnica 2: estruturas e fundações que não apresentem riscos para além do normal, nem condições de terreno ou carregamento difíceis, como por exemplo fundações superficiais, por estacas, escavações, ancoragens, entre outras;
- Categoria Geotécnica 3: abrange estruturas ou partes destas que não se encontrem nas duas categorias anteriores descritas (1 e 2).

A observação e supervisão deverão ser aspetos fundamentais a incluir no relatório de projeto e especificar o objetivo de cada conjunto de medições, os locais onde serão efetuadas, a frequência das leituras e o melhor método a utilizar, assim como as entidades responsáveis. Por fim, é essencial definir ainda o período para a qual é necessário manter as observações após a conclusão dos trabalhos (*op. cit.*).

Segundo o EC7, os estudos de caracterização geotécnica devem ser realizados de modo a avaliar a qualidade do local para a construção, comparando com zonas alternativas e devem identificar, de modo fidedigno, as propriedades do terreno; para tal é necessário recorrer a inspeções visuais periódicas.

No que diz respeito à segurança, deve ser realizada a:

- Supervisão e análise da qualidade da execução dos trabalhos;
- Observação do comportamento da estrutura durante e após a construção;
- Trabalhos de manutenção adequados.

Para as três categorias geotécnicas e segundo o EC7, as diferenças no método de supervisão são as seguintes:

- Categoria geotécnica 1: a supervisão pode decorrer apenas através de inspeções visuais, controlo de qualidade simplificado e avaliações qualitativas do comportamento das estruturas;
- Categoria geotécnica 2: tem de englobar medições das propriedades do terreno ou do comportamento das estruturas;
- Categoria geotécnica 3: requer medições durante cada etapa da construção.

Após a conclusão de uma obra, as observações devem ser mantidas de modo a comprovar a validade dos valores estimados no projeto, assegurando o bom comportamento da estrutura. Dependendo da categoria a que a obra pertença, estas avaliações podem ser realizadas com base em inspeções visuais e/ou por medições de movimentos ou deformações do terreno (*op. cit.*).

De uma forma geral e de acordo com o EC7, a supervisão de uma construção deve atuar nos seguintes aspetos:

- Verificação das condições do local, bem como da localização da estrutura;
- Na análise do regime da pressão da água nos poros;
- Nos movimentos, cedência, estabilidade das contenções e efeitos nas edificações vizinhas;
- Na segurança dos trabalhadores.

Por sua vez, a observação deverá englobar os seguintes aspetos (*ib.*):

- Assentamentos de edifícios;
- Deslocamentos laterais;

- Níveis piezométricos;
- Deslocamento de estruturas;
- Medição de vibrações.

Perante as necessidades de monitorização, um Plano de Instrumentação, deve de conter os seguintes itens gerais:

- Objetivo e grandezas a medir;
- Tipo de equipamentos/instrumentos a adotar (incluindo as respetivas características e quantidades, tendo em atenção o princípio de redundância para parâmetros críticos);
- Tipo de aquisição de dados - pode ser manual, semiautomática ou automática;
- Localização dos equipamentos a instalar;
- Frequência de leituras;
- Níveis de alerta e alarme;
- Medidas a implementar, caso sejam ultrapassados aqueles níveis;
- Tratamento e interpretação da informação registada.

### **3.4 Características dos instrumentos**

#### **3.4.1 Generalidades**

São vários os parâmetros a monitorizar, conforme consta no EC7, referidos na secção anterior e para a sua medição existem métodos geodésicos e geotécnicos.

Os métodos geodésicos são normalmente utilizados para realização de leituras de deformações superficiais do terreno ou estruturas e englobam teodolitos (em desuso nos dias de hoje tendo sido substituídos pelos níveis eletrónicos), taqueómetros, e sistemas de GPS (Chrzanowski, 1994; Ding et al. 1995, 1998 *apud* Ding et al., 2000). Relativamente aos geotécnicos, compreendem instrumentos e equipamentos utilizados para a medição de parâmetros geométricos e físicos, quer no interior quer na superfície de uma estrutura ou do terreno. Estes instrumentos podem ser células de pressão, inclinómetros, *tiltmeters*, entre outros.

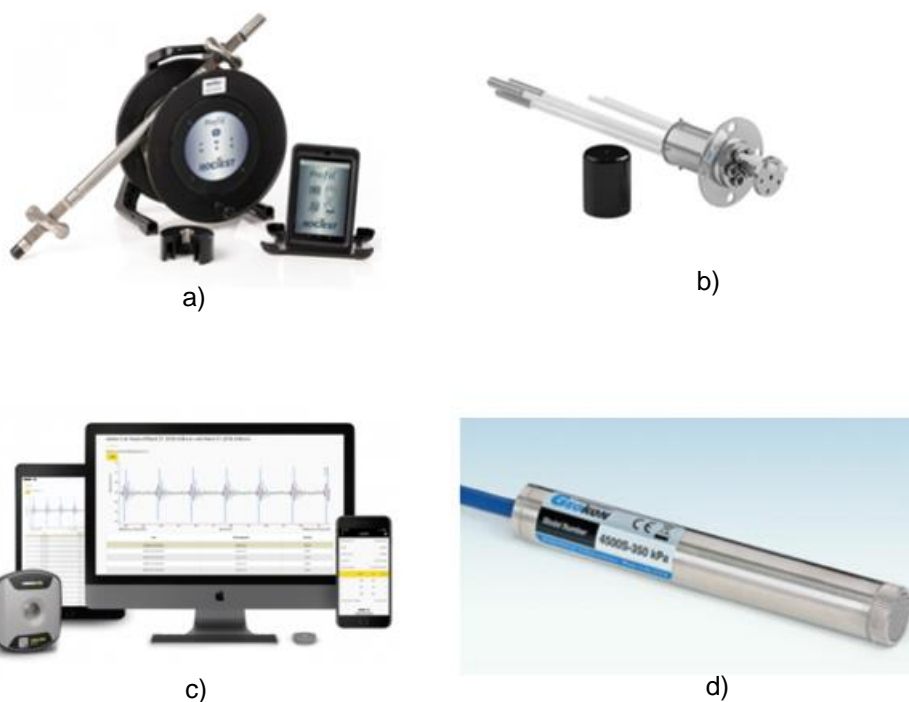
Os sistemas geodésicos utilizam-se essencialmente para a monitorização de deformações, enquanto os geotécnicos, para além das deformações, também são utilizados para avaliar outros parâmetros, como cargas impostas nas contenções ou níveis freáticos, entre outros. No entanto, estes dois métodos complementam-se, pelo que são frequentemente utilizados em simultâneo (*op. cit.*)

Segundo Dunnicliff and Green (1988), os instrumentos de medida podem ser divididos em duas categorias:

- i. Para a determinação das características *in situ* do terreno, tais como o estado de tensão, a permeabilidade e a compressibilidade, sendo que estes parâmetros são definidos normalmente na fase de projeto. É possível observar alguns desses instrumentos para solos na Figura 2;
- ii. Para a realização de monitorização (medição de deformações, níveis freáticos, tensões, etc.) geralmente durante a fase de construção e exploração da obra. Na Figura 3 apresentam-se alguns desses instrumentos.



**Figura 2** – Exemplos de dois equipamentos para a avaliação das características do terreno: a) Amostrador SPT de duas meias canas com amostra de solo recolhida (SINERGEO, 2021); b) Piezocone (Gouda Geo, sem data)



**Figura 3** – Alguns exemplos de equipamentos para monitorização geotécnica: a) Inclínómetro (Roctest, 2018); b) Extensómetro multiponto (Encardio, 2019a) ; c) Sismógrafo (Omnidots, 2021); d) Piezómetro de corda vibrante (Geokon, 2021)

Para que a instrumentação seja bem executada, os equipamentos/instrumentos devem apresentar características que promovam a confiabilidade e a máxima simplicidade. Consoante o avanço da tecnologia, eles tornam-se cada vez mais precisos e exatos (Dunnicliff and Green, 1988). Na escolha do equipamento o preço não deverá ser o fator preponderante, devendo a seleção resultar de uma ponderação das grandezas a medir, da envolvente do projeto e da sua dimensão. Significa isto que, por absurdo, o valor da instrumentação não poderá ser superior ao da própria obra, no entanto não se pode deixar de monitorizar as grandezas essenciais à segurança do projeto e da envolvente.

Com a constante evolução tecnológica, foram desenvolvidos sistemas que promovem a aquisição automática de dados, possibilitando a não intervenção por parte do operador no processo de leitura, eliminando o erro inerente a este nos resultados. No entanto, deve ser tido em consideração que mesmo com a recolha automática as análises de dados devem sempre contar com um operador e as inspeções visuais continuam a ser imprescindíveis (*ib.*).

### **3.4.2 Conformidade**

Regra geral, a existência de um instrumento de medição não deve induzir alterações nas propriedades a medir, se isto acontecer diz-se que o equipamento tem uma baixa conformidade. Têm-se como exemplo os extensómetros fixos, que devem ser fabricados com um certo grau de deformabilidade, de modo que a deformação do terreno não sofra a influência do equipamento. Por outro lado existem instrumentos, como as células de carga, que devem exibir a mesma deformabilidade que o local onde serão colocadas (Dunnicliff and Green, 1988). A conformidade é uma das principais características a ter em conta para uma obter a precisão adequada.

### **3.4.3 Exatidão**

É definida como o grau de conformidade que o valor medido apresenta relativamente ao valor real, a sua verificação é realizada durante a calibração, de modo a verificar se o valor da exatidão corresponde ao valor predefinido em fábrica. É expressa geralmente neste formato “ $\pm$  número”, tal como  $\pm 1$  mm ou  $\pm 1$  %; no primeiro caso, significa que o valor medido apresenta uma variação de 1 mm, e no outro representa 1 % de variação em relação ao valor real. Para a escolha do instrumento deve ser tido em consideração a exatidão de cada componente, bem como cada fonte de possíveis erros (*ib.*).

### 3.4.4 Precisão, repetibilidade e reprodutibilidade

A precisão corresponde ao valor mais próximo que as medições exibem entre si, em relação a uma média aritmética e é frequentemente expressa sob a forma de “ $\pm$  número”. Um valor correspondente a  $\pm 1,00$ , apresenta uma precisão mais elevada que  $\pm 1,0$  (Dunnicliff and Green, 1988). Geralmente este parâmetro tem uma maior importância que a exatidão, pois é mais significativa uma variação do que um valor absoluto.

Na Figura 4 encontram-se representadas as diferenças entre a precisão e exatidão.



**Figura 4** - Distinção entre a exatidão e precisão (adaptado de Dunnicliff and Green, 1988)

A repetibilidade é geralmente definida como a variação de valores registados com as mesmas condições de medição, operador e equipamento/instrumento durante um curto período.

A reprodutibilidade é também caracterizada como uma variação de valores, mas para tal são utilizados os mesmos processos de medição, embora com operadores e equipamento/instrumento diferentes durante longos períodos.

### 3.4.5 Campo de medida e resolução

O campo de medida corresponde ao intervalo compreendido entre o valor mais alto e mais baixo que um equipamento/instrumento regista, sem que ocorra alteração da precisão e da exatidão (Dunnicliff and Green, 1988).

A resolução é definida como o valor mais pequeno existente no equipamento para a realização de uma leitura. Esta é inversamente proporcional ao campo de medida, ou seja, quanto maior o campo de medida, menor será a resolução (*op. cit.*)

### 3.4.6 Erros

Os erros são representados pela diferença entre o valor medido e o valor real. Segundo Dunnicliff and Green (1988), podem derivar de vários fatores dando origem a sete tipos de erros:

- i. Erros grosseiros: pode derivar da inexperiência, cansaço ou falta de atenção do operador e podem ser minimizados através da duplicação de leituras ou comparação dos resultados obtidos, entre outros.

ii. Erros sistemáticos: resultam de erros na calibração do equipamento, que podem ser minimizados através de verificações periódicas dos valores padrão e de calibrações frequentes.

iii. Erros de conformidade: derivam da instalação inadequada do equipamento ou de anomalias no seu projeto; podem ser minimizados através da utilização de procedimentos corretos para a sua instalação, bem como da certificação do projeto.

iv. Erros ambientais: dependem das características do meio envolvente, como o teor em humidade, a temperatura, as vibrações, exposição a agentes atmosféricos, entre outros.

v. Erros observacionais: surgem geralmente quando existem vários operadores que utilizam técnicas diferentes para a recolha de dados, podendo assim ser minimizados com a instalação de equipamentos/instrumentos de medição automática ou através da realização de formações técnicas.

vi. Erros de amostra: são frequentes quando existe diversidade de formações geológicas, que dificultam as medições. A solução é a instalação de diversos instrumentos em locais representativos.

vii. Erros aleatórios: podem manifestar-se devido ao ruído, ao atrito interno, a fatores ambientais, entre outros.

## **3.5 Equipamentos utilizados para a monitorização de escavações de edifícios em meio urbano**

### **3.5.1 Generalidades**

A monitorização visa a medição, recolha e análise das propriedades e das alterações impostas no terreno, e segundo Duncan and Brooks-Gunn (2006) são as seguintes:

- Os movimentos do terreno, onde são incluídas as deformações, assentamentos e deslocamentos do solo e dos edifícios envolventes;
- As cargas exercidas nas estruturas e contenções;
- Pressão e/ou posição do nível freático, obtidos geralmente nas zonas envolventes à escavação, podendo também ser calculada junto aos taludes onde serão executadas as contenções.

Os equipamentos utilizados devem ser dotados de uma exatidão elevada, uma vez que o erro deverá ser mínimo para tornar as leituras o mais próximo possível da realidade. Estes podem ser elétricos ou mecânicos e, dentro destas duas categorias, ainda podem ser classificados como manuais, semiautomáticos ou automáticos (*op. cit.*).

Os sistemas manuais (elétricos ou mecânicos) implicam que a realização das leituras e recolha dos dados seja feita por um operador, enquanto que nos automáticos esta é efetuada através de sensores elétricos ou via wireless que estão conectados a um sistema de computador central, possibilitando a recolha simultânea dos dados provenientes de todos os equipamentos instalados no terreno (Duncan and Brooks-Gunn, 2006).

Os sistemas automáticos promovem uma monitorização contínua, uma vez que os dados são recolhidos e transferidos no decorrer dos trabalhos de construção, em períodos pré-definidos, permitindo uma previsão atempada de possíveis acidentes. Este tipo de monitorização em tempo real é o mais adequado para a realização de escavações subterrâneas e superficiais em centros de cidade; no entanto, como é um método mais dispendioso, são apenas utilizados em casos particulares e perante condições envolventes sensíveis (*op. cit.*).

Comparando estes dois sistemas, habitualmente os manuais são menos dispendiosos, contudo não proporcionam medições contínuas e em tempo real. Uma forma de conjugar estes dois aspetos é a implementação de sistemas de medição semiautomáticos, com sensores de recolha e transmissão automática de dados, via cabo ou wireless, e leituras manuais (*op. cit.*).

Em função das condições geológicas, geográficas e topográficas do local em estudo utilizam-se diferentes equipamentos. Até há poucos anos atrás, os instrumentos de corda vibrante eram os mais avançados tecnologicamente em termos de precisão e sensibilidade, no entanto apresentavam custos elevados e, como tal, eram utilizados apenas em obras de grande porte que exigissem uma monitorização constante e, portanto, automatizada (Oliveira, Brandt and Leão, 2016). Atualmente, os instrumentos de fibra ótica estão na vanguarda da tecnologia, contudo o seu preço é ainda mais elevado do que os de corda vibrante.

### **3.5.2 Taqueómetros**

Foi no final do século XVII e início do século XVIII que surgiram os primeiros relatos da utilização da geodesia. Na época era frequente a utilização de triangulação, mas com o avanço da tecnologia surgiu a Medição Eletrónica de Distâncias - EDM (Dzurisin, 2007). Contudo, ainda longe da sua aplicação à monitorização. Os sistemas EDM de infravermelhos surgiram em meados de 1960 e foram incorporados nos teodolitos convencionais. Estes sistemas fazem a recolha automática das coordenadas através da emissão de um feixe de luz monocromática contra um dispositivo de referência (alvo refletor), após a incidência é medida a velocidade eletromagnética da radiação entre o instrumento e o alvo, permitindo a recolha dos pontos coordenados (Dunncliff and Green, 1988; Dzurisin, 2007; Bassett, 2012).

As deformações são determinadas através da verificação das alterações na forma ou nas dimensões de uma estrutura, como resultado da imposição de forças ou deslocamentos. Em função dessas mesmas alterações e para a sua determinação, recorrem-se a relações trigonométricas correlacionando ângulos e distâncias para obter um sistema de nivelamento (z)

ou de coordenadas (x, y, z) visando a determinação da deformação em função do tempo (*op. cit.*).

A determinação dos deslocamentos pode ser efetuada através de dois métodos distintos: a trilateração e a triangulação (*op. cit.*).

A trilateração define a deformação através da medição de três lados de um conjunto de triângulos sobrepostos, ou que se tocam entre si. Para tal, são utilizados geralmente teodolitos eletrônicos com um sistema EDM incorporado (taqueómetros – *total stations*), como é possível observar na Figura 5. Para o cálculo das coordenadas de cada ponto da rede é necessária a existência de uma marca de referência (*bench mark*) colocada num local onde não sejam esperadas deformações. Após a recolha dos dados, estes são comparados com as medições efetuadas anteriormente para verificar se ocorreu ou não evolução das deformações (*op. cit.*).

Ao contrário da trilateração, que utiliza distâncias, a triangulação baseia-se na medição de ângulos. Para tal, devem ser utilizados pelo menos dois pontos fixos e com coordenadas conhecidas para além dos pontos a determinar, de modo à obtenção de uma rede de triângulos. Os pontos de referência utilizados (tal como na trilateração) devem ser colocados num local onde não sejam esperados deslocamentos, como em edifícios vizinhos e de preferência fora da zona de potencial deformação. Após a determinação dos ângulos, estes são transformados em coordenadas através de correlações trigonométricas (*op. cit.*). Este método também utiliza taqueómetros.

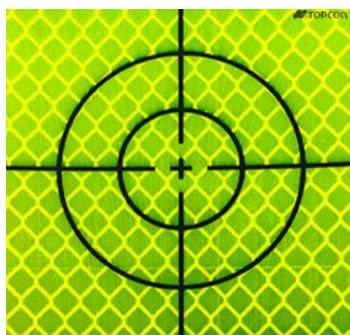
As medições através destes dois métodos não devem ser executadas de noite ou em dias nublados ou muito quentes, uma vez que as condições atmosféricas e as variações de temperatura são fatores que limitam a exatidão das leituras com EDM (*op. cit.*).



**Figura 5** -Representação de um taqueómetro (MundoGEO, 2016)

As marcas de referência devem ser colocadas em estruturas pré-existentes à obra permitindo a comparação dos valores obtidos durante a fase de construção com os valores iniciais antes da existência de qualquer perturbação. Os locais onde são implantadas devem ser selecionados de forma cuidada garantindo que não ocorre nenhum tipo de deformação que possa induzir o operador em erro na realização das leituras (Dunnicliff and Green, 1988).

Na monitorização podem ser utilizados equipamentos de leitura fixos, que de modo automático, localizam os alvos topográficos - Figura 6, colocados previamente nas estruturas a monitorizar, fazendo a respetiva leitura e emissão de dados para plataformas na Internet para serem interpretados por um operador.



**Figura 6** - Alvo topográfico (Topcon, sem data)

### **3.5.3 Tiltmeter**

Os *tiltmeters*, também conhecidos como clinómetros fixos, utilizam-se essencialmente para monitorizar a variação da inclinação de estruturas sujeitas a movimentos rotacionais impostos pela alteração das condições no terreno. Estes instrumentos têm diversas aplicações, tais como monitorização de contenções, de barragens, deslizamentos de terra, entre outras. Em zonas urbanas também se utilizam, pois há cada vez mais construções e reabilitações estruturais nos centros das cidades ou em zonas de densidade populacional elevada, pelo que é necessária uma monitorização cuidada da inclinação das estruturas na imediação das obras (Dunnicliff and Green, 1988).

Em função das respetivas características, os *tiltmeters* podem ser (Dunnicliff and Green, 1988; GEOKON, 2020; 2019):

- Mecânicos, utilizando uma bolha de nível para fazer as medições;
- Digitais, com um transdutor MEMS que realiza medições tanto na horizontal como na vertical (biaxiais), apresentando exatidão elevada, baixo custo e a possibilidade de transmissão de dados, via wireless ou Bluetooth; podem ser portáteis ou fixos. Estes dispositivos encontram-se representados na Figura 7a).

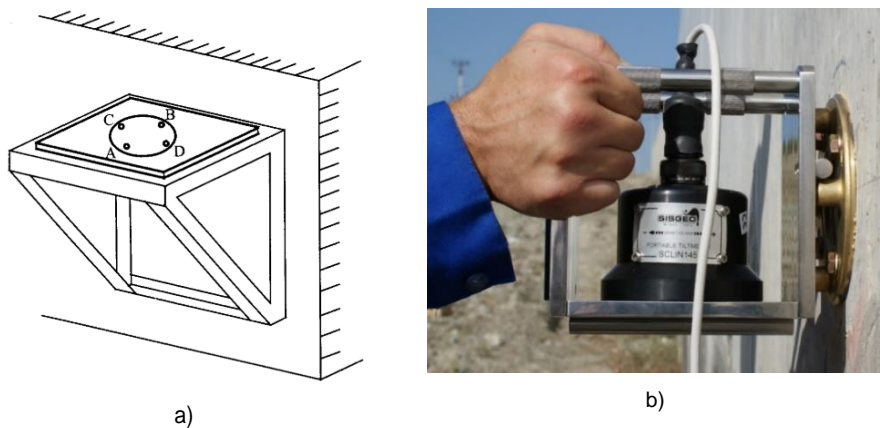
- Corda vibrante, sendo compostos por um pendulo fixo à parte superior do *tiltmeter* - Figura 7b). Este pendulo encontra-se conectado a fios de corda vibrante que efetuam medições biaxiais (verticais ou horizontais), relativamente a movimentos impostos pela rotação do centro de gravidade provocados pelas deformações.

No registo das medições, para além dos *tiltmeters* são necessárias placas de referência e um indicador, estes componentes podem ser observados na Figura 8a). A placa de referência é fixa a um determinado ponto da parede e é utilizado o clinómetro para medir a variação da sua inclinação, que por sua vez é igual à da estrutura. O processo de leitura assemelha-se ao de um inclinómetro (Duncan and Brooks-Gunn, 2006).



**Figura 7** – Tiltmeters: a) digital (Geokon, 2020b); b) corda vibrante (Geokon, 2019)

Dependendo da direção em que se pretende obter as medições, a placa pode ser colocada tanto na horizontal como na vertical, como apresentado na Figura 8a) e 8b). Na Figura 8a) observa-se que a placa é dividida em quatro partes iguais, formando dois eixos perpendiculares entre si - um paralelo à parede (CD) e outro perpendicular (AB). Os dados são recolhidos duas vezes em cada um dos eixos para minimizar os erros de medição; primeiramente são realizadas as medições segundo AB, depois roda-se a sonda 180° repete-se o procedimento para CD. O valor final a registar é a média das duas leituras efetuadas em cada eixo (*op. cit.*).



**Figura 8** – Dispositivos e equipamentos do clinómetro móvel: a) placa de apoio horizontal (Duncan and Brooks-Gunn, 2006); b) Tiltmeter apoiado em placa vertical (Sisgeo, 2017)

O valor da inclinação é dado por duas componentes, uma de distorção angular e outra de rotação. Como a medida é feita por cima da placa, esta deve ser colocada nos pontos de fraqueza da estrutura, ou seja, onde é esperada uma alteração do comportamento; os locais escolhidos são geralmente as paredes ou o teto. O valor do ângulo de inclinação é posteriormente calculado através da diferença entre a primeira e a última medições realizadas (*op. cit.*).

Para além dos três tipos de *tiltmeters* referidos anteriormente, existe ainda um quarto, que apresenta um sistema de recolha e transmissão completamente automatizado, designado de *wireless tiltmeter*.

Este tipo de equipamento combina um sistema MEMS com um sistema de recolha automática dos dados promovendo precisão e resolução elevadas, tornando-o um dos instrumentos frequentemente utilizados quando é necessária a monitorização da inclinação de estruturas em tempo real (Encardio, 2020b).

Estes instrumentos - Figura 9, encontram-se envoltos por uma cápsula impermeável promovendo a sua utilização em ambientes húmidos e na presença de água. Apresentam ainda sensores de transmissão e leitura de longo alcance (*op. cit.*).



**Figura 9** - Wireless tiltmeter (Encardio, 2020b)

### 3.5.4 Fissurómetros

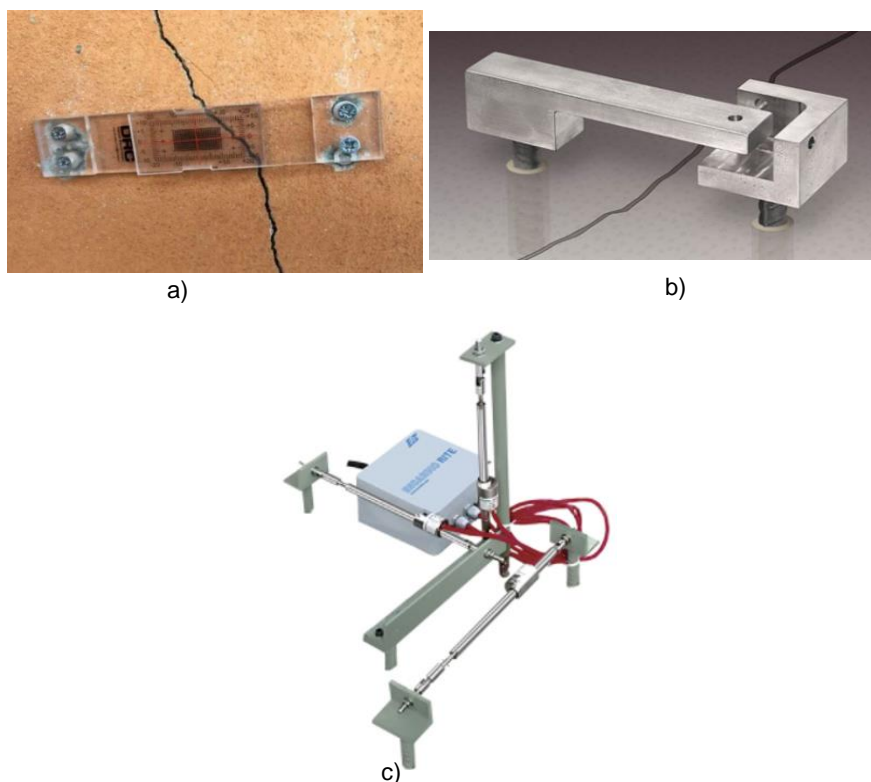
O aparecimento de fissuras em estruturas deve-se essencialmente à resposta do material quando submetido a tensões de compressão ou de tração. Existem materiais como tijolos, betão ou materiais de alvenaria que são mais suscetíveis à propagação de fendas. É importante salientar que a maior parte dos edifícios residenciais e históricos encontram-se englobados nesta categoria de suscetibilidade elevada (Bassett, 2012).

Há formação de fissuras quando ocorre a acumulação de tensões em zonas de fraqueza da estrutura e é ultrapassada a capacidade limite do material. Estas concentrações de tensão podem surgir como resultado do projeto inadequado das fundações, mas na maior parte dos casos ocorrem associadas a assentamentos diferenciais resultantes de escavações na zona envolvente. Locais como centros de cidade ou zonas muito urbanizadas costumam ser mais problemáticos (*op. cit.*).

Para a monitorização de fissuras em estruturas geralmente usam-se fissurómetros, que podem ser óticos, mecânicos e elétricos. Os dois primeiros são equipamentos manuais, enquanto que os elétricos apresentam um sistema automatizado, composto por transdutores de corda vibrante (Segalini, Carri and Savi, 2017).

Os três tipos de fissurómetros apresentam as seguintes características (*op. cit.*):

- Fissurómetro ótico: composto por dois elementos plásticos interligados e paralelos entre si, que são colocados sobre a fenda de modo a medir o deslocamento segundo duas direções perpendiculares, como é possível observar na Figura 10a).
- Fissurómetro mecânico: que pode ser mono ou triaxial. Se for monoaxial, é composto por uma roda de aço colocada ortogonalmente segundo a direção da fenda. No caso de ser triaxial, apresenta uma secção quadrangular e uma estrutura externa com três comparadores utilizados para medir deformação nos três eixos ortogonais, como se observa na Figura 10b).
- Fissurómetro elétrico: apresenta um transdutor de corda vibrante com duas ancoras de cada lado para ajudar na sua fixação, como mostrado na Figura 10c).



**Figura 10** – Fissurómetros: a) ótico (Direct Industry, 2021); b) triaxial mecânico (Geokon, 2015); c) triaxial de corda vibrante (Encardio, 2014)

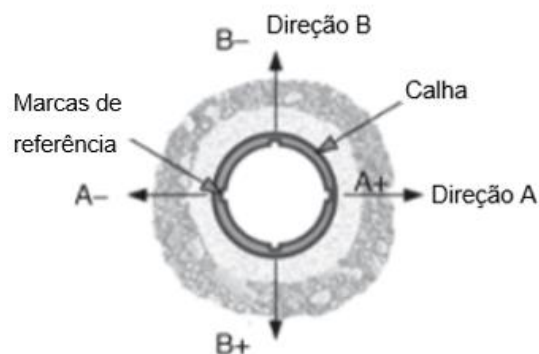
### 3.5.5 Inclínómetros

Como foi referido anteriormente, as escavações podem originar deformações quer nas estruturas envolventes quer no terreno e, para a sua avaliação, é fundamental medir os deslocamentos do terreno em relação a um ponto de referência (fixo). Quando este ponto se encontra à superfície são utilizados normalmente taqueómetros. Uma forma de medir as possíveis deformações em profundidade, também designadas de internas, é da instalação de inclinómetros, que promovem o registo das deformações ao longo de um alinhamento, horizontal ou vertical (Duncan and Brooks-Gunn, 1997; Bassett, 2012).

O sistema de inclinómetro é constituído por três componentes essenciais (Dunnicliff and Green, 1988):

- Calha por onde irá passar o corpo do inclinómetro;
- Sonda portátil, com um transdutor sensível à gravidade, destinada à medição da inclinação presente nos terrenos que deformam as calhas nele instaladas;
- Uma unidade portátil de leitura.

Os inclinómetros podem ser utilizados para a medições segundo duas direções ortogonais (A e B), representadas na Figura 11.



**Figura 11** - Sistema de eixos A e B da calha inclinométrica (adaptado de Bassett, 2012)

No caso de escavações urbanas, são habitualmente utilizados para a monitorização de deformações horizontais, para tal é executado no terreno um furo vertical onde é instalada uma calha, geralmente composta por um polímero. Segundo Duncan and Brooks-Gunn (2006) os materiais mais comuns para o fabrico de calhas são os seguintes:

- Estireno butadieno acrilato (*Acrylonitrile-Butadiene-Styrene* - ABS) – polímero que apresenta boa flexibilidade e fineza considerável entre as juntas, sendo o tipo de calha mais utilizado em Portugal quando se trata da monitorização durante a fase de construção.
- Alumínio – apesar do seu baixo custo, a sua utilização não é muito comum, uma vez que são fortemente influenciados pelas condições do meio envolvente, principalmente se se encontrarem próximo de zonas costeiras, acrescendo os problemas ambientais da utilização de alumínio.
- PVC – São ligeiramente mais pesadas que as de ABS. Em relação a custos, são calhas mais económicas que as ABS e têm uma resistência aos fatores ambientais considerável quando comparadas com as de alumínio; foram muito utilizadas no passado, mas devido à fraca flexibilidade caíram em desuso.

A Figura 12 ilustra as calhas compostas por PVC e ABS.



PVC



ABS

**Figura 12** – Aspeto de dois tipos de calhas inclinométrica (Encardio, 2020a)

Segundo Bassett (2012), para uma instalação correta da calha, devem-se considerar os seguintes aspetos:

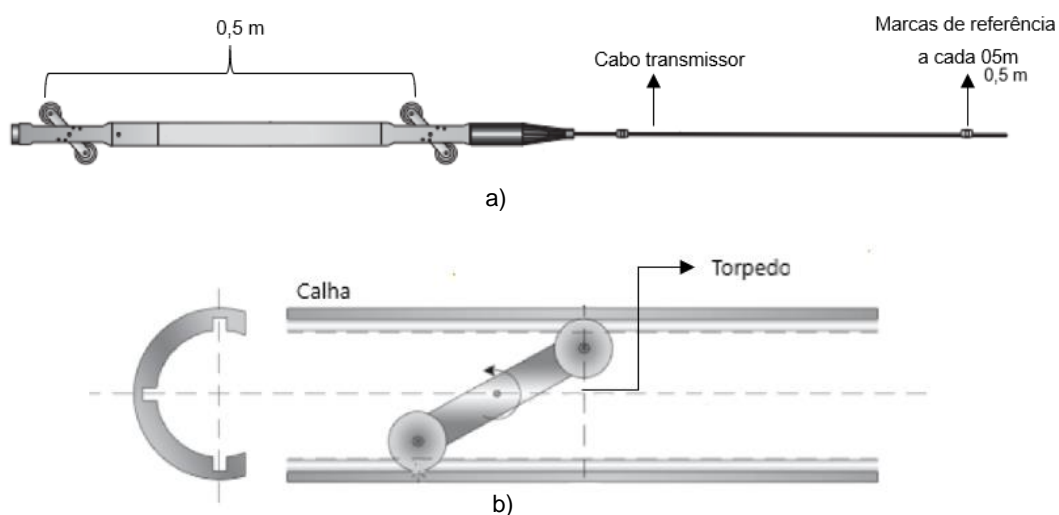
- O tipo de calha a utilizar;
- A execução do furo deve ser realizada de modo cuidadoso, permitindo uma fácil introdução e instalação da calha;
- A instalação da calha deve ser feita por pessoal especializado, assegurando uma orientação correta (um dos chanfros da calha – A, deve ficar alinhado com a direção onde é esperada a maior deformação);
- Após a colocação da calha no furo, esta deve ser envolta por uma calda de cimento, bentonite e/ou areia, evitando potenciais espaços vazios;
- E, por fim, a calda envolvente do furo deve apresentar grande proximidade de plasticidade com as características das formações envolventes.
- A extremidade inferior da calha deve ser fixa com uma calda de cimento ao fundo do furo e o espaço existente entre o terreno e a calha deverá ser preenchido com areia, de modo a evitar espaços vazios e assim assegurar que a calha se deforme com o terreno (Dunnicliff and Green, 1988; Oliveira, Brandt and Leão, 2016).
- A calha deverá ser encastrada pelo menos cerca de 5 m, preferencialmente, num maciço rochoso, abaixo da zona onde se estime que possa existir qualquer tipo de deformação.

Como procedimento de leitura, após a instalação da calha e antes da inserção da sonda para a primeira leitura, deve ser inserida uma sonda de teste para que o operador possa perceber se a instalação foi bem executada e se o furo está obstruído, ou não, evitando-se assim que a verdadeira sonda fique presa aquando da sua futura utilização. Após a instalação da calha e após estas verificações, realiza-se uma medição inicial que será utilizada como valor de referência (“zero”) para verificar eventuais deslocamentos. A partir desta medição, todas as leituras efetuadas são sempre realizadas em relação a esta mesma situação inicial, de referência, originando um registo cumulativo (Dunnicliff and Green, 1988; Oliveira, Brandt and Leão, 2016).

O corpo da sonda é composto por uma barra de aço (sonda) fixa a um sistema de molas com rodas, designado de torpedo. Este sistema possibilita o encaixe do inclinómetro nas ranhuras da calha, auxiliando a sua descida. As rodas dos torpedos distam uma da outra aproximadamente 500 mm e fazem um ângulo de  $60^\circ$  com o corpo central (Bassett, 2012), como é possível observar na Figura 13a) e 13b).

A sonda, pode ser composta por dois tipos de sensores: MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) ou servo-acelerómetros. Estes últimos apresentam maior sensibilidade ( $\pm 0,02$  mm por 500 mm), precisão (6 mm por 25 m de calha) e exatidão; no entanto, são mais dispendiosos e menos resistentes (Ding *et al.*, 2000; Segalini, Carri and Savi, 2017).

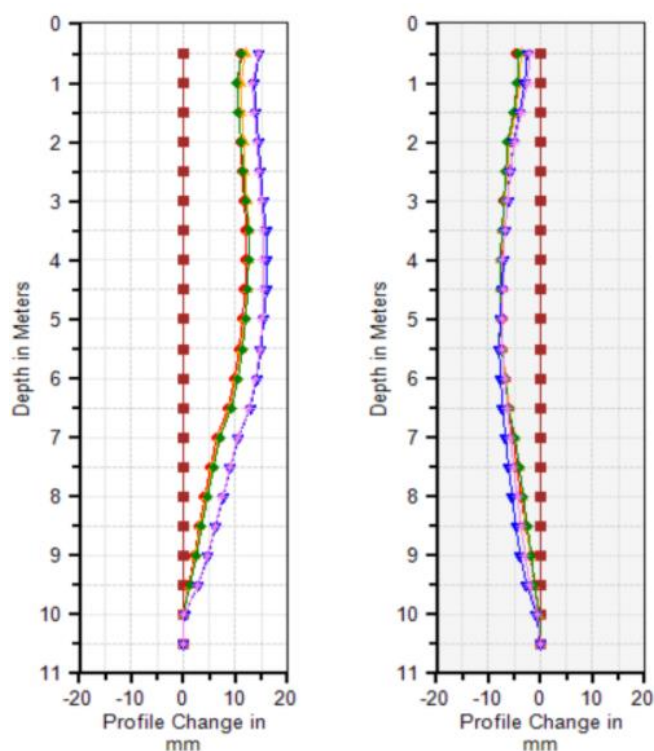
À parte inicial da sonda encontra-se conectado um cabo impermeável transmissor de sinais elétricos, que irá permitir a elevação e recolha de dados a cada 500 mm, transmitindo a informação ao equipamento de registo da leitura.



**Figura 13** – Inclinómetro: a) Torpedo; b) Inserção adequada na calha (adaptada de Bassett, 2012)

Os torpedos habitualmente são biaxiais, com leitura simultânea em duas direções ortogonais - segundo a direção principal (A<sup>+</sup>) no sentido do deslocamento máximo expectável e, simultaneamente, na direção (B<sup>+</sup>), a 90 ° da primeira. Como procedimento de leitura e para evitar erros de operador, é feita uma segunda leitura a um ângulo de 180 ° em relação à primeira (A<sup>-</sup> e B<sup>-</sup>), sendo a leitura final, a média das duas (Ding *et al.*, 2000; Bassett, 2012).

A interpretação dos dados é posteriormente efetuada através da comparação dos perfis de deslocamento obtidos em leituras consecutivas comparativamente à primeira leitura realizada ("zero". A Figura 14 apresenta um gráfico típico dos resultados de leituras realizadas com inclinómetros.



**Figura 14** - Exemplo da evolução de deformações registadas por inclinómetros

Para além dos inclinómetros tradicionais, amovíveis, existem inclinómetros fixos, mais conhecidos como *in-place inclinometers*. Estes são utilizados em situações onde a monitorização deve ser de qualidade elevada e em tempo real, com intervalos de leitura reduzidos, minimizando-se os erros de repetibilidade (Bassett, 2012).

Os sistemas automáticos são compostos por sensores com espaçamento entre 0,5 m e 3 m que se encontram conectados, sequencialmente, a uma unidade de leitura. Isto permite a realização de leituras contínuas e instantâneas da inclinação, em todo o comprimento da calha inclinométrica. Após a recolha dos dados, estes são transmitidos, via cabo ou *wireless*, para um *datalogger*, que os regista. Posteriormente são recolhidos no local ou enviados para plataformas na Internet, onde serão analisados pelos técnicos, consistindo num sistema completamente automatizado (*op. cit.*).

Devido ao seu grau de autonomia elevado, estes sistemas têm um custo mais elevado, pelo que geralmente são aplicados em grandes obras, como túneis subterrâneos e taludes em ferrovias; contudo, também já se começam a utilizar em escavações de edifícios e muros de contenção, em particular nas mais profundas e com a envolvente ocupada.

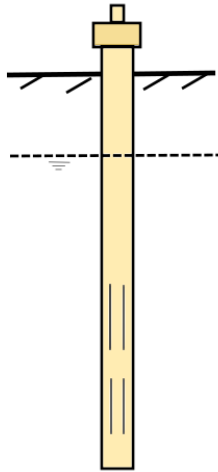
### **3.5.6 Piezómetros**

A presença de água no terreno é um dos principais problemas durante a execução de uma obra, uma vez que esta modifica as tensões efetivas existentes no solo, podendo desencadear deformações e instabilizações. Os equipamentos designados para medir a pressão de água nos poros são designados de piezómetros e são escolhidos consoante o local a instalar, bem como a composição da fração granulométrica predominante no local (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996; Segalini, Carri and Savi, 2017).

Os piezómetros são dispositivos ou instrumentos colocados dentro do terreno, geralmente em furos de sondagem revestidos com uma calha de PVC, de modo a impedir a interação com outros aquíferos, registando apenas a variação da pressão da água em níveis pré-definidos. Podem ser divididos em dois grupos: os que apresentam um sistema piezométrico aberto, onde a água se encontra em contacto direto com o equipamento de leitura, e aqueles que apresentam um sistema fechado, onde não se verifica esse contacto. No primeiro grupo estão englobados os piezómetros de tubo aberto, já no segundo encontram-se os piezómetros hidráulicos de duplo tubo, os elétricos e os pneumáticos (ISO 18674-4:2020).

Segundo a norma ISO 18674-4:2020, os piezómetros mencionados apresentam as seguintes características:

- O piezómetro de tubo aberto é composto geralmente por um tubo de PVC instalado no terreno, que apresenta uma extremidade superior aberta para a atmosfera. A zona de admissão (zona confinada por onde a água pode escoar até ao dispositivo de medição) apresenta uma secção crepinada ou ranhurada, como representado na Figura 15. Este tipo de dispositivos são os mais utilizados. Usam-se geralmente sondas piezométricas, de apito ou luminosas para a medição do nível freático, como mostrado na Figura 16.

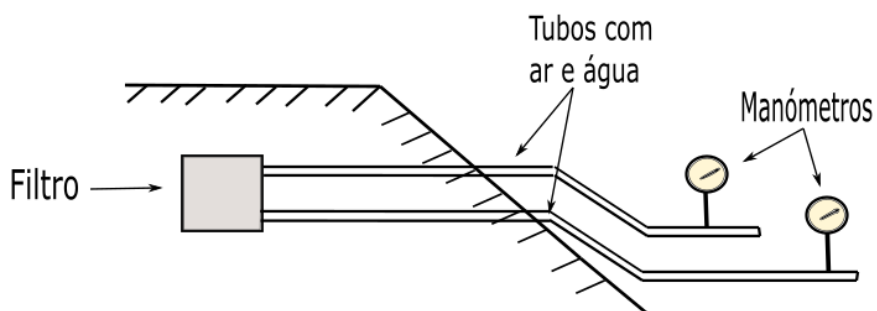


**Figura 15** - Esquema simplificado de um piezômetro de tubo aberto



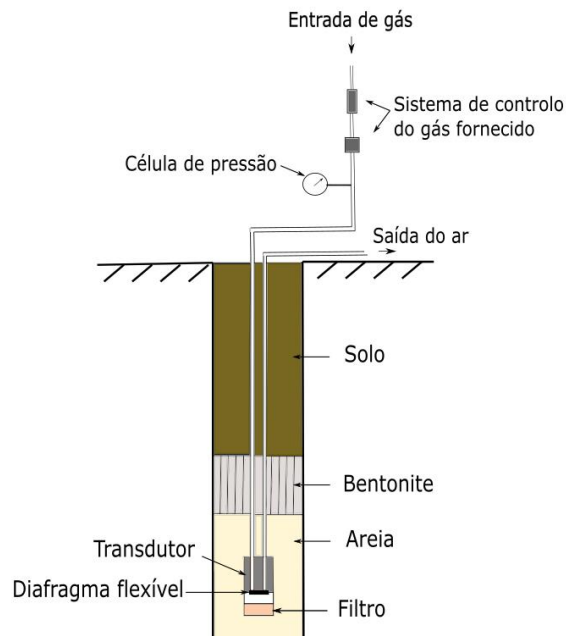
**Figura 16** - Sonda piezométrica (MaasEcología, sem data)

- O piezômetro hidráulico de duplo tubo foi desenvolvido, essencialmente, para a medição de níveis freáticos em fundações ou em barragens de aterro durante a fase de construção. Apresenta uma ponteira filtrante no interior da zona de admissão, que está conectada a um determinado local por dois tubos, um preenchido por ar e outro por água, como representado na Figura 17.



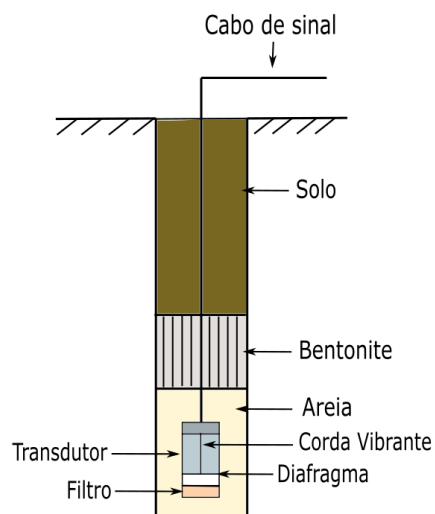
**Figura 17** - Esquema dos componentes principais de um piezômetro hidráulico de tubo duplo

- O piezômetro pneumático apresenta um dispositivo de medição de pressão em que num dos tubos é colocado um gás a uma determinada pressão, enquanto no outro atua apenas a pressão da água. Após ser atingido o equilíbrio entre estas duas pressões, o valor é lido manualmente, ou através de um sistema automatizado, como esquematizado na Figura 18.



**Figura 18** - Esquema dos componentes principais de piezômetros pneumáticos

- Os piezômetros elétricos apresentam um medidor de pressão composto por um diafragma cuja deflexão é medida através de um sensor ótico que tem por finalidade separar o fluido existente no sistema do fluido presente no solo. A representação deste tipo de piezômetro encontra-se na Figura 19.



**Figura 19** - Esquema dos componentes principais de um piezômetro de corda vibrante

Na Tabela 4 sintetizam-se as principais características dos dois sistemas de piezômetros.

**Tabela 3** - Principais características dos sistemas piezométricos (adaptado de ISO 18674-4:2020)

Sistema	Características
<b>Piezométrico aberto</b>	<p>Apresentam um filtro e um reservatório, instalados no terreno e abertos para a atmosfera.</p> <p>O dispositivo de medição é recuperável.</p> <p>As leituras podem ser manuais ou automáticas.</p> <p>Possibilidade de verificar as medições automáticas através de medições manuais.</p> <p>Em solos de baixa permeabilidade, o tempo de resposta dos piezômetros abertos poderá não ser adequado.</p>
<b>Piezométrico fechado</b>	<p>Apresentam um reservatório e um transdutor de pressão, que são instalados no terreno e são vedados à atmosfera.</p> <p>A utilização de transdutores de pressão recuperáveis é possível usando sistemas especiais.</p> <p>Os sistemas fechados habitualmente têm um atraso hidrodinâmico menor do que os sistemas abertos.</p>

### 3.5.7 Células de carga

O carregamento que as estruturas exercem no terreno deve ser monitorizado regularmente durante uma escavação, para evitar que o valor de cedência seja atingido por aquelas cargas. Os equipamentos destinados a este tipo de medições são as células de carga e células de tensão total, que através de transdutores medem as variações de extensão e compressão (Duncan and Brooks-Gunn, 1997; Dunnycliff and Green, 1988).

A principal diferença entre estes dois tipos de célula é o modo de aplicação, uma vez que as células de carga são colocadas no terreno de forma a que as forças estruturais as consigam atravessar, já as células de tensão total podem ser divididas em células de pressão de contacto entre dois meios de comportamento distintos e células de tensão enterradas (Dunnycliff and Green, 1988).

As células de carga inserem-se geralmente em sistemas de ancoragens, uma vez que é necessário medir as tensões aplicadas no interior das paredes de contenção. Este tipo de célula, assim como as células de tensão total, podem ser utilizadas para monitorização temporária ou permanente (Dunnycliff and Green, 1988; Duncan and Brooks-Gunn, 2006). Existem vários tipos

de células de carga, sendo que as mais utilizadas são as de resistência elétrica e corda vibrante (op. cit.).

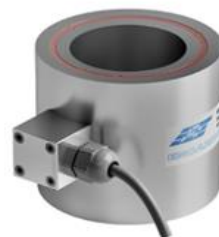
- Células mecânicas: são raramente utilizadas e geralmente apresentam um sistema de torção, ou uma mola elástica, que sofre deformação quando é aplicada uma carga.
- Células hidráulicas: são compostas por uma câmara com líquido no seu interior, que se encontra conectada a um transdutor de pressão. Este mecanismo regista as variações da pressão do fluido quando são impostas cargas. As margens da célula são seladas com um material metálico ou de borracha, como se observa na Figura 20a).
- Células elétricas de resistência: apresenta um formato cilíndrico e pode ser constituída por aço ou uma liga de alumínio. No seu interior encontram-se vários transdutores de resistência elétrica, como se mostra na Figura 20b). Quando se recorre a este instrumento, deve-se usar uma capa de aço como proteção, uma vez que não é impermeável.
- Células elétricas de corda vibrante: apresentam o mesmo princípio do que as anteriormente descritas, no entanto utilizam sensores de corda vibrante. Geralmente vêm equipadas com três sensores, recolhendo cada um deles os valores separadamente. Na Figura 20c) observa-se este tipo de célula.



a)



b)



c)

**Figura 20** - Representação dos vários tipos de células de carga; a) hidráulica; b) elétrica (Geokon, 2020a); c) corda vibrante (Encardio, 2019b)

A exatidão destes equipamentos relaciona-se com o método de instalação, pelo que se a colocação no terreno não for adequada podem ser registadas variações significativas nas leituras. O carregamento deve ser efetuado de forma axial e concêntrica para a minimizar o erro e a capacidade de trabalho da célula deve ser semelhante à da estrutura (Dunnicliff and Green, 1988). A Tabela 4 apresenta algumas vantagens e desvantagens da utilização das várias células de carga.

**Tabela 4 – Características das várias células de carga (adaptado de Dunnicliff and Green, 1988)**

<b>Tipo de célula</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Exatidão aproximada</b>
<b>Mecânica</b>	Robusta Fiável	É necessário aceder à célula para realizar as leituras.	± 2 a 10%
<b>Hidráulica</b>	Possibilita leituras remotas.	Necessita de uma área extensa para a sua colocação.	± 2 a 10%
<b>Resistência elétrica</b>	Leituras remotas e automáticas.	Sinal de saída elétrico fraco.  Leituras podem apresentar erros devido à deficiente conexão entre os componentes elétricos	± 2 a 5%
<b>Corda vibrante</b>	Leituras remotas e automáticas.	Requer técnicas especiais de fabrico para a minimização dos erros	± 2 a 5%

Para uma instalação correta, as células devem ser inseridas nos locais onde a estrutura e paredes de contenção irão suportar os maiores carregamentos (Duncan and Brooks-Gunn, 2006).

### **3.5.8 Vibrações impostas a estruturas**

Quando são realizadas construções em zonas populosas, principalmente em centros de cidade ou nas proximidades de edifícios históricos, há um risco acrescido de acidentes, se não forem monitorizadas as vibrações no terreno, podendo-se originar fendas ou mesmo o colapso das estruturas. Assim, deve-se realizar um registo cuidadoso das vibrações induzidas durante toda a fase construtiva (Rybak and Schabowicz, 2010).

A monitorização de vibrações é enquadrada em Portugal pela NP 2074:2015, aplicada sempre que se utilize uma fonte de vibração - explosivos ou equipamentos mecânicos.

Do ponto de vista físico, a vibração é função da frequência, da velocidade e da aceleração, assim como do tempo que a onda acústica se demora a propagar. Quando maior a proximidade das estruturas a monitorizar à vibração imposta, maior será a amplitude das ondas, induzindo problemas de estabilidade. Para evitar ou controlar estas situações, por vezes é necessário mudar o método de desmonte, mas para tal é necessário existirem equipamentos, como sismógrafos ou acelerómetros, capazes de detetar as vibrações que, na maioria das vezes, são impercetíveis ao Homem (Rybak and Schabowicz, 2010).

Uma das principais fontes de vibração é a execução de paredes de estacas cravadas, pelo que nestes locais devem ser realizadas campanhas de monitorização adequadas, de modo a ajustar o método de execução, caso os valores registados sejam muito superiores aos valores de referência (Baca and Brzakala, 2017).

Para a realização da monitorização, utilizam-se geralmente acelerómetros - Figura 21, pois apresentam campo de medida elevado, devido à integração de MEMS (Maiti and Bidinger, 1981; Hejun and Bogue, 2007).



**Figura 21** - Representação de um acelerómetro (Baca and Brzakala, 2017)

Os MEMS são microdispositivos que integram componentes elétricos e mecânicos, capazes de operar individualmente, a escalas pequenas, ou em matrizes, para escalas grandes. Após o seu desenvolvimento introduziram-se no mercado acelerómetros uniaxiais, biaxiais e triaxiais (Hejun and Bogue, 2007; Mishra *et al.*, 2019).

Os acelerómetros podem ser instalados diretamente na superfície a monitorizar, em pequenos blocos rígidos e posteriormente colocados na superfície, ou então podem já estar embutidos nesta. Após a instalação, cada transdutor localizado na parte central deve fornecer medições precisas e se necessário devem ser calibrados (ASTM D 4945 – 08:2008).

Atualmente, existem equipamentos capazes de realizar uma monitorização em contínuo, de todas as atividades ao longo do período de intervenção, com apresentação de dados nas diversas plataformas disponíveis, e em tempo real.



## **4. Plano de instrumentação proposto para escavações superficiais em meio urbano**

### **4.1 Generalidades**

Como foi referido anteriormente, a problemática existente é a falta ou insuficiência de uma instrumentação adequada em escavações em centros urbanos. As escavações superficiais em centros de cidade antigos, como é o caso de Lisboa, ou Porto necessitam de monitorização acrescida, visto que o espaço de trabalho é limitado e as edificações encontram-se perto umas das outras. No entanto, em muitos dos casos a monitorização é insuficiente ou não apresenta sistemas de leitura relativamente rápidos. Ou seja, a mesma filosofia que é utilizada e já se encontra há anos implementada na construção de barragens e túneis, também deveria nortear a monitorização dentro das grandes cidades.

O plano de instrumentação e observação a adotar deve ser viável, simples e adaptado ao tipo de obra, uma vez que a principal preocupação deve recair sobre o controlo do comportamento do terreno e das estruturas, promovendo uma previsão atempada de potenciais acidentes, permitindo a adoção de medidas de mitigação adequadas. A instrumentação deve ser complementada por inspeções visuais periódicas.

A instalação de um sistema de instrumentação automatizado permite evitar erros de reprodutibilidade, porém esta é uma solução que habitualmente encarece a obra.

Destaca-se ainda como fator relevante os técnicos que realizam a recolha e o tratamento de dados, os quais devem ser qualificados de forma a minimizar erros na aquisição dos mesmos e desenvolver a sua interpretação célere e assertiva.

Assim, neste capítulo apresenta-se uma proposta de um plano de instrumentação genérico adequado a escavações superficiais em meio urbano. Para garantir a deteção atempada de eventuais deformações, minimização de erros de aquisição de dados e tendo em atenção os valores envolvidos, é apresentada uma opção composta por um sistema de monitorização designado de semiautomático, que engloba equipamentos convencionais manuais e instrumentos de leituras automatizadas, promovendo uma solução mais viável e menos dispendiosa.

### **4.2 Redundância das medições**

Durante a execução das leituras, é necessário ter em consideração que os equipamentos, quer por funcionamento deficiente, manuseamento inadequado por parte dos operadores (no caso dos manuais), ou por outros fatores externos, podem recolher dados incorretos, que não correspondem completamente à realidade, no que diz respeito à representação das deformações do terreno ou das estruturas em monitorização.

Uma forma de evitar esta problemática é a instalação de equipamentos que sejam complementares entre si e que, em conjunto, adquiram a informação necessária, fidedigna e objetiva. Destaca-se, o caso dos alvos topográficos *tiltmeters* e inclinómetros. Quando utilizados em simultâneo, se por alguma razão algum destes dispositivos ou equipamentos falhar, a confirmação dos dados pode ser feita por um dos outros equipamentos descritos. Por outro lado, a confirmação de um movimento detetado por todos os dispositivos/equipamentos mencionados acrescenta confiança e uma análise mais assertiva e fundamentada.

### **4.3 Instrumentação frequentemente utilizada em Lisboa: dois casos**

De modo a tornar possível uma melhor perceção da instrumentação em Portugal em escavações importantes em áreas urbanas, descrevem-se sucintamente e analisam-se em seguida dois casos em Lisboa.

#### **4.3.1 Palácio Sotto Mayor: Realce de edifício centenário e escavação profunda**

Esta empreitada realizou-se no centro de Lisboa junto à Avenida Fontes Pereira de Melo, e teve como objetivo a escavação em torno de um edifício histórico, o Palácio Sotto Mayor, para a construção de 8 pisos destinados à criação de uma zona comercial. A área escavada foi de aproximadamente 7.600 m<sup>2</sup> e envolveu uma altura de escavação na ordem de 27 m (Pinto et al., 2003).

No local existiam materiais de aterro, argilo-arenosos, sobre formações de resistência média a rija. Inferiormente, nas camadas sedimentares miocénicas, observou-se a influência de uma componente margosa, bem como a existência de calcarenitos (*op. cit.*).

Segundo Pinto et al. (2003) uma vez que o recinto da escavação se encontrava confinado por edificações e a uma distância de 10 m do metropolitano de Lisboa, foi aplicada a seguinte instrumentação, com periodicidade mínima de leitura semanal:

- Alvos topográficos;
- Piezómetros;
- Inclinómetros;
- Células de carga elétricas;
- Secções de convergência;
- *Tiltmeters*.

### 4.3.2 Hospital CUF Tejo: Escavação, contenção periférica e construção até ao piso 0

Este Hospital localiza-se na marginal de Lisboa, a menos de 300 m do Rio Tejo, em Alcântara. A área a escavar correspondeu, aproximadamente, a 10.000 m<sup>2</sup> e envolveu a contenção e escavação de quatro caves, com uma profundidade de 17 m (Cardoso and Moreira, 2019).

Em termos geológicos, o terreno é composto, a partir da superfície, por materiais de aterro, seguidos de formações aluvionares, constituídas por areias lodosas e siltes. A nível mais profundo detetou-se o Complexo Vulcânico de Lisboa, constituída no local por camadas de basaltos alterados a muito alterados. O nível freático encontrava-se entre 2,5 m e 3 m de profundidade (*op. cit.*).

Face à dimensão, à profundidade e ao facto da escavação se encontrar inserida em meio urbano, e para garantir a segurança durante a construção, a empreitada foi acompanhada por um plano de instrumentação adequado, com leituras semanais. Para tal foram instalados os dispositivos geodésicos, bem como usaram-se os seguintes equipamentos e instrumentos geotécnicos (Cardoso and Moreira, 2019):

- Marcas de referência;
- Alvos topográficos;
- Piezómetros de tubo aberto;
- Inclínómetros;
- *Tiltmeters* uniaxiais;
- Células de tensão;
- Células de carga.

### 4.3.3 Análise dos casos de estudo

Tendo como base os casos de estudo mencionados e considerando outras empreitadas mais pequenas em Lisboa acompanhadas durante o Estágio da autora na Geolnt, a maior parte das obras utilizam equipamentos/instrumentos em que é necessário um operador para a realização das leituras, minimizando os custos do investimento inicial e diluindo o investimento em campanhas de leituras ao longo da execução e exploração.

Verifica-se que as deformações são geralmente determinadas por inclínómetros, alvos topográficos, por vezes *tiltmeters* - instalados nos edifícios vizinhos ou nas paredes de contenção da escavação.

As cargas impostas nas estruturas de contenção são habitualmente monitorizadas em células de carga em ancoragens e, relativamente ao controlo e monitorização dos níveis de água no terreno, em piezómetros de tubo aberto.

As vibrações geradas pelos equipamentos na execução da construção, por vezes são registadas por acelerómetros; no entanto, na maioria das vezes, não são implementados o que constitui uma falha grave ao estipulado pela norma NP 2074:2015 (*dBwave*, 2017).

Na maior parte das escavações superficiais em centros de cidade utilizam-se equipamentos de medição manual, pelo que as leituras se realizam quando o operador se desloca à obra, o que implica que durante um certo período não há registo de dados. Durante os intervalos entre leituras, podem ocorrer variações significativas dos parâmetros que só serão registadas algum tempo após a sua ocorrência. Neste aspeto é ainda muito comum a opção por frequências de leituras semanais, quinzenais, ou ainda, em alguns casos extremos, em que não existe frequência definida, sendo apenas realizadas leituras no início e no fim das escavações.

É ainda comum o recurso a apenas um tipo de equipamentos/instrumentos para monitorização de uma dada grandeza, perdendo-se o princípio de redundância na obtenção de dados.

Neste contexto, os planos de instrumentação devem respeitar os códigos e normas em vigor, garantindo que o tempo de reação perante uma situação de perigo potencial é adequado, não só à segurança em obra, mas também da zona envolvente, minimizando potenciais acidentes.

#### **4.4 Fatores e equipamentos propostos para a monitorização de escavações superficiais em centros de cidade**

No plano proposto foi considerada uma aplicação potencial essencialmente a rochas brandas, solos, aterros e a estruturas geológicas sub-horizontais, como é o caso da cidade de Lisboa. Para além disso, estipula-se que existem edificações antigas na envolvente, como é típico de um centro urbano importante.

O tempo de monitorização considerado para a proposta deverá ser maior ou igual a seis meses e a empreitada poderá, ou não, interetar o nível freático, admitindo-se que existirão contenções com níveis de ancoragens.

A solução proposta recai sobre a implementação de um plano de instrumentação semiautomático (composto por equipamentos/instrumentos de leituras manuais e automáticas), padronizado, fiável e simples, a adaptar ao projeto, e que será complementado por inspeções visuais periódicas.

A interpretação e controlo das deformações, deslocamentos, níveis de água, entre outros, em qualquer tipo de escavação através da utilização de equipamentos/instrumentos capazes de detetar a sua ocorrência, possibilitando uma previsão do comportamento do terreno, e a implementação de planos de mitigação, quer em obra, quer nas estruturas/infraestruturas vizinhas. É importante salientar que, dependendo do tipo de terreno (solo ou rocha), o plano de instrumentação será diferente, uma vez que o comportamento estrutural também será distinto. As quantidades a instalar dependem, essencialmente, da altura e do perímetro da escavação.

Neste cenário, é fundamental implementar um sistema mais vasto, com uma frequência de leitura mais apertada, que em fase construtiva nunca deve exceder a semanal e com maior número de pontos de observação de leituras manuais.

Perante o acima exposto, considera-se como mínimo fundamental o recurso a alvos topográficos e a inclinómetros de leituras manuais. Os alvos deverão ser colocados nas paredes das edificações envolventes, bem como dentro da própria obra. Por sua vez, as calhas inclinométricas devem ser instaladas no perímetro dos trabalhos de escavação, ou seja, nos trechos onde se espera que ocorram movimentos no terreno.

A este sistema manual e para garantir a redundância e frequências de leituras mais apertadas (três a quatro vezes por dia), é importante adicionar um sistema automático de aquisição de dados. Neste contexto, considera-se como adequado usar *tiltmeters* automáticos (*wireless tiltmeters*), a instalar na parte superficial dos edifícios vizinhos, bem como nas paredes de contenção ou em fachadas. Os *tiltmeters* irão complementar as leituras manuais, uma vez que têm como principal objetivo registar as inclinações/rotações que possam ocorrer nas estruturas, em tempo real, alertando para a possível evolução de deformações no terreno durante os intervalos de leitura dos equipamentos/instrumentos manuais. Devem também ser contemplados fissurómetros de leituras manuais, para o controlo de eventuais fendas.

Com a implementação destes sistemas combinados (manuais e automáticos), os futuros dados a analisar serão mais fidedignos e confiáveis, diminuindo o tempo de deteção de eventuais situações perigosas.

Outro aspeto relevante a monitorizar em centros urbanos, são as vibrações induzidas pelos vários trabalhos a realizar, uma vez que, geralmente, na envolvente imediata às escavações encontram-se estruturas antigas e infraestruturas. Se os limites de vibração tolerados forem ultrapassados, podem surgir fendas em edifícios, ou até levar ao colapso de partes deles. Assim, deverá ser instalado um sistema de acelerómetros triaxiais com recolha automática e continua de dados, possibilitando medições remotas, e em tempo real. Estes instrumentos devem ser instalados no local de escavação / nas estruturas vizinhas, tornando possível a recolha dos dados necessários.

Em relação ao controlo das cargas impostas nas paredes de contenção, é da máxima importância a instalação de células de carga, sejam elas manométrica, de resistência elétrica ou de corda vibrante; sendo que estas últimas apresentam maior precisão e exatidão, em comparação com as primeiras. Na opção elétrica ou de corda vibrante, a recolha de dados também poderá ser automatizada, permitindo a monitorização em tempo real da carga imposta nas ancoragens, permitindo um controlo das cargas exercidas nas paredes de contenção, levando à implementação de medidas de segurança em caso de variações significativas.

Por fim, a monitorização do nível de água é um fator importante, uma vez que ela está na origem da maioria dos problemas que surgem durante a fase construtiva. Posto isto, devem ser instalados piezómetros para medir o nível de água durante a construção.

Como referido, os piezómetros do tipo tubo aberto revelam-se adequados à generalidade das situações em terrenos permeáveis, pelo que é fundamental continuar com a sua implementação. No entanto, se o local apresentar valores de permeabilidade baixos, os piezómetros elétricos serão os mais indicados.

Concretizando, o plano de instrumentação adequado para intervenções em meio urbano, tem de obedecer aos seguintes requisitos:

- Definição das grandezas a medir;
- Localização ponderada e representativa;
- Frequência de leitura elevada para garantir a segurança e intervenções atempadas em caso de necessidade;
- Redundância da aquisição de dados para uma maior confiança nos resultados e análises fidedignas;
- Economicamente viável para o projeto em questão.

Nos pontos seguintes listam-se, de uma forma resumida e simplificada, os dispositivos, equipamentos e instrumentos de observação propostos para monitorizar escavações superficiais em centros de cidade e que são comumente utilizados nos dias de hoje:

- Alvos topográficos com sistema de leitura manual;
- Tiltmeters com sistema de leitura automatizado (wireless tiltmeters);
- Fissurómetros de leituras manuais;
- Inclínómetros com um sistema de leitura manual;
- Acelerómetros triaxiais com leituras automatizadas;
- Células de carga de resistência elétrica ou corda vibrante, com leituras automatizadas;
- Piezómetros de tubo aberto, ou elétrico (este último em caso de terrenos com fraca permeabilidade).

A complementar esta informação por amostragem, deve ainda fazer-se, regularmente, inspeções visuais de toda a escavação e perímetro envolvente, potencialmente afetado pela empreitada de construção. Aliás, esta inspeção deve logo ser efetuada antes do início de qualquer trabalho do projeto no terreno, a fim de se poder identificar a potencial existência de fissuras/fendas nas estruturas/infraestruturas vizinhas. Durante a realização da escavação e para melhorar a visibilidade do técnico e obviar qualquer interferência com os trabalhos em curso, poderá recorrer-se à utilização de um VANT (vulgarmente designados por drone), mesmo de pequeno porte, para facilitar a inspeção da contenção periférica e, simultaneamente, ficar na posse de um registo fotográfico datado e georreferenciado.

## 4.5 Características da instrumentação

Na Tabela 5 identificam-se as principais características que os equipamentos e instrumentos devem apresentar para uma instrumentação adequada.

**Tabela 5** - Características dos equipamentos e instrumentos (*Encardio 2019; Geokon 2020; Omnidots 2021*).

Equipamentos e instrumentos	Nível de precisão	Campo de medida
Taqueómetro	Ângulos	0,5"
	Distância	(0,8/0,5) +1 ppm
Clinómetro	± 0,01 %	± 30 °
Fissurómetro	0,2 %	15 – 50 mm
Inclinómetro	± 0,01%	± 30 °
Células de carga	± 0,5%	150 %
Piezómetro	0,5 mm	50 m
Acelerómetro	0,01 g	0,5 - 250 Hz

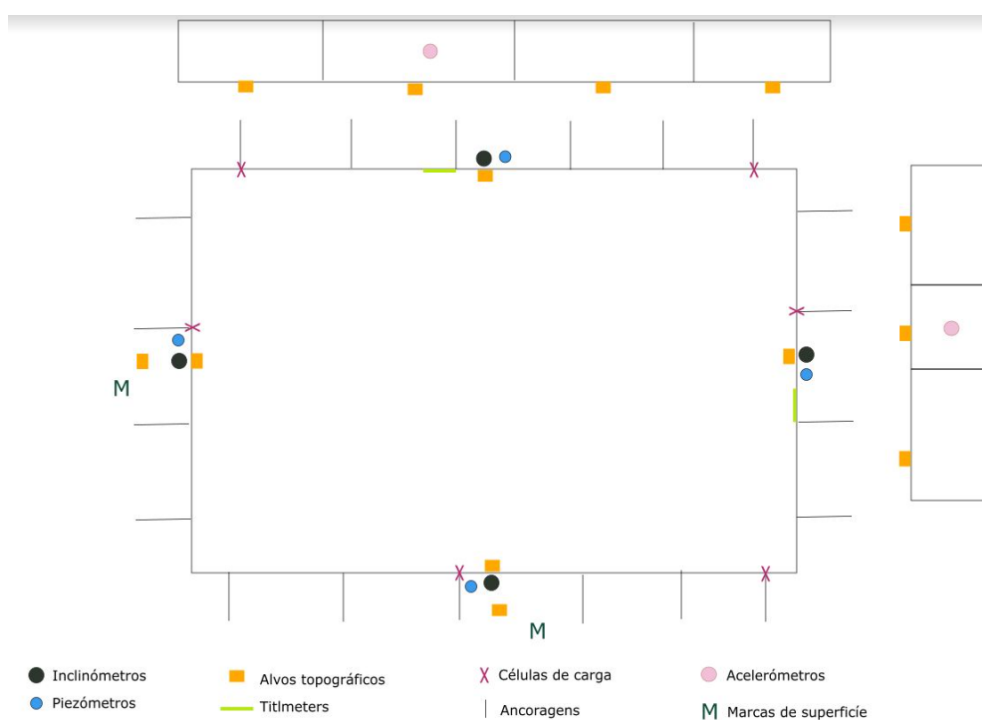
## 4.6 Localização da instrumentação

Os dispositivos, equipamentos e instrumentos definidos devem ser instalados em locais representativos da escavação ou dos elementos da vizinhança, preferencialmente onde é esperada a maior deformação. Para tal os alvos topográficos e tiltmeters devem ser distribuídos ao longo das superfícies de escavação; os inclinómetros e piezómetros devem ser colocados na periferia da escavação, a meia distância dos vértices das paredes ou muros, onde a deformação tende a ser maior e segundo perfis; as células de carga devem ser colocadas nas ancoragens existentes nas paredes de contenção e perto dos perfis/alvos; os acelerómetros devem ser distribuídos pela zona envolvente da escavação; e os fissurómetros devem ser dispostos nas edificações onde se identifique algum tipo de fenda.

Na Figura 22 apresenta-se um esquema de uma escavação com dimensões de 20 m x 12 m e a localização proposta para os dispositivos, equipamentos e instrumentos.

Os fissurômetros não se encontram representados, uma vez que só serão utilizados em casos pontuais.

Os dispositivos, equipamentos e instrumentos serão implantados nas proximidades uns dos outros, de modo a tornar possível a realização de perfis, permitindo a compilação de toda a informação registada para uma possível análise integrada e, posteriormente, para a realização dos relatórios.



**Figura 21** - Esquemática da localização dos dispositivos, equipamentos e instrumentos

## 4.7 Frequência das leituras

Para uma execução adequada das leituras é necessário garantir o acesso aos dispositivos de leitura. A frequência da sua realização depende, essencialmente, do sistema de instrumentação (manual ou automatizada) e da fase em que a obra se encontra. Geralmente as leituras são realizadas durante toda a construção e, em muitos casos, após a conclusão.

Numa primeira fase, após instalação da instrumentação é necessário a realização de uma leitura de “zeragem” que servirá de referência. Após esta leitura inicial de referência, as seguintes são comparadas e assumem particular relevância quando se inicia a construção e, depois, a operação.

Durante a fase de escavação, que é o momento mais crítico, as leituras devem ser efetuadas com uma maior frequência. Nas restantes fases, de construção ou operação, podem ser mais espaçadas.

No que diz respeito a equipamentos automatizados, as leituras deveram ser realizadas várias vezes ao dia, durante as diversas fases da construção, diminuindo à medida que a obra avança, ou seja, fica patente a mais-valia da instrumentação automática, que permite um acompanhamento mais pormenorizado e a deteção de eventuais problemas numa fase mais precoce quando comparada com a de leitura manual.

Na Tabela 6 definem-se as frequências de leitura habitualmente implementadas durante as diferentes fases da obra.

**Tabela 6** - Frequência de leituras consoante a fase da obra

Fase da obra	Frequência das leituras	
	Equipamentos manuais	Equipamentos automáticos
Início dos trabalhos	Semanal	Diárias
Escavação	Diárias	Hora a hora
Construção	Bissemanal	Duas em duas horas
Até a conclusão	Quinzenais / mensais	Diárias
Após conclusão	Mensais / bimensais	Semanais

## 4.8 Critérios de alerta e alarme

Um dos principais objetivos da monitorização geotécnica é permitir uma comparação entre os valores estimados nos estudos do projeto (em modelos desenvolvidos antes da execução de quaisquer trabalhos) e os valores reais obtidos durante a construção.

Esta comparação só é possível se no projeto tiver sido contemplado um sistema de alerta específico, para cada tipo de obra, que define quais os valores máximos que podem ser observados durante as leituras. Este sistema habitualmente é caracterizado por três cores distintas, verde, amarelo e vermelho. A cor verde indica que os valores recolhidos estão dentro do intervalo de valores estimados, que neste caso corresponde a 50% do valor máximo previsto para uma certa grandeza, a cor amarela diz respeito às medições que não podem ultrapassar 80% daquele valor limite; por exemplo se for estimado um valor de 2,5 cm para a deformação máxima, o nível amarelo é atingido para deformações registadas de 2 cm. Nesta situação, devem ser realizadas leituras mais frequentes, para averiguar se há evolução; por fim, a cor vermelha corresponde aos valores que atingem 90% da deformação máxima esperada e, nestes casos, a obra têm de parar imediatamente e devem ser revistos e alterados os planos inicialmente propostos para uma resolução eficaz do problema que está na origem do comportamento anómalo (Duncan and Brooks-Gunn, 1997; Oliveira, Brandt and Leão, 2016).

O sistema de alerta explicado no parágrafo anterior representa, essencialmente, a teoria; na prática é comum a utilização de níveis de alerta em vez de um sistema de cor. Posto isto, os projetos geralmente apresentam a indicação de Nível de Alerta I e Nível de Alerta II; ou Nível de Alerta e Nível de Alarme. Esta designação irá recair sobre o projetista.

Em relação aos critérios de percentagem de valores atribuídos nos projetos geotécnicos a cada nível, é comum que o Nível de Alerta II seja definido quando é atingida 25% da deformação prevista e o Nível de Alarme 50% dessa deformação.

Quando a deformação atingida é igual ou superior a 25% e inferior a 50% deve ser realizada uma revisão do projeto; por sua vez se a deformação for de pelo menos 50% da deformação máxima prevista, a obra deverá parar e devem ser implementadas medidas de contingência adequadas adaptadas a cada caso, no entanto é frequente a aplicação de:

- Reforço do travamento horizontal das estruturas de contenção;
- Tratamento dos terrenos a conter;
- Melhoria das condições de drenagem.

Em certos casos poderá ser necessária a reposição de todo o material escavado.

## **4.9 Relatórios e circuito de informação**

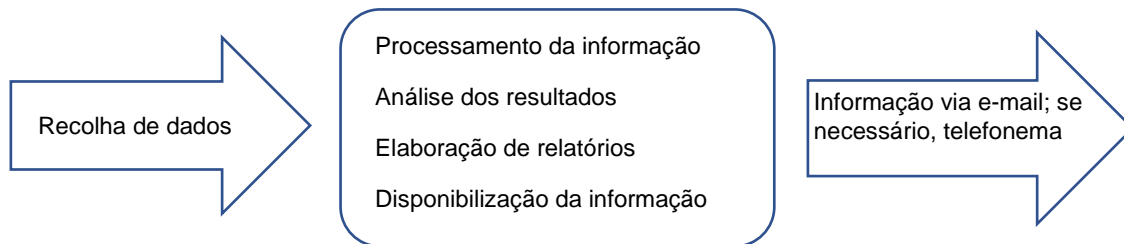
A elaboração dos relatórios deve ser executada efetuada por técnicos especialistas com base nas informações registadas no terreno, pela instrumentação e complementada pelas observações diretas realizadas.

A informação tratada deve ser englobada apenas num relatório, que deve ser redigido de forma simples e sequencial, facilitando a sua leitura e interpretação. Para tal, deve conter gráficos e tabelas de leitura rápida e fidedigna, que englobem as leituras realizadas ao longo do tempo, tornando possível a sua comparação.

Um ponto relevante na monitorização é a definição de um circuito de informação, ou seja, após a recolha e tratamento da informação, a mesma deverá ser transmitida aos responsáveis pelas decisões e a quem irá implementar eventuais medidas.

Para um circuito de informação funcional é fundamental que a recolha dos dados seja executada por técnicos especializados, possibilitando que todos os intervenientes na obra tenham conhecimento do estado de estabilidade da obra e sua envolvente. Para tal, é relevante a implementação de um sistema de gestão que permita, não só uma disponibilização contínua da informação, como também uma troca rápida de informação, em caso de necessidade. A Figura 22 esquematiza o funcionamento do circuito de informação.

Concretizando, os relatórios devem ser enviados no próprio dia das leituras, pois quanto maior a rapidez da análise, menor o tempo para reagir e mitigar potenciais acidentes. Estes serão geralmente enviados via e-mail; no entanto, quando se trata de situações próximas dos níveis de alerta/alarme, ou outras situações relevantes, a informação deverá também ser transmitida telefonicamente, possibilitando uma confirmação de recepção imediata e uma ação mais célere, se necessária.



**Figura 22** - Esquematização de um circuito de informação funcional



## **5 Considerações finais e perspectivas futuras**

### **5.1 Considerações finais**

O crescimento populacional tem aumentado a concentração de habitantes em cidades, onde os locais com melhor aptidão geotécnica para eventuais construções já se encontram ocupados. Em consequência, sobram nestas zonas apenas alguns espaços entre estruturas já edificadas ou os terrenos de pior qualidade, exigindo-se ainda frequentemente a reabilitação de zonas anteriormente ocupadas. Neste contexto, as escavações em pleno centro urbano, têm presentemente o risco acrescido de despoletarem potenciais acidentes ou incidentes, quer na própria escavação, quer nas estruturas e infraestruturas vizinhas. Urge, assim, prevenir esses eventos através da observação geotécnica daquelas intervenções, em particular em plenos centros históricos, onde a idade das construções e as suas condições de potencial precaridade poderá acarretar um perigo acrescido para uma escavação.

A presente dissertação teve como principal objetivo a integração de instrumentação com leituras manuais e automatizadas visando a possibilitar a definição de um plano de instrumentação básico a adotar e aplicar a escavações superficiais em centros urbanos.

As escavações podem ser executadas em vários tipos de terreno, pelo que no segundo capítulo desta dissertação é realizada uma breve descrição das principais propriedades que irão controlar o comportamento do maciço conduzindo aos potenciais tipos de rotura, definindo as grandezas a monitorizar pelos planos da instrumentação e observação geotécnicas.

Nos dias de hoje, com o avanço da tecnologia, há cada vez mais equipamentos e instrumentos disponíveis no mercado, sendo os principais tipos mais utilizados nas intervenções em referência brevemente caracterizados no Capítulo 3. Contudo, quanto maior for a sensibilidade, precisão e exatidão da instrumentação a utilizar, mais elevado será o seu preço. Assim e apesar da diversidade de escolha proporcionada pelo mercado, os sistemas manuais são os mais utilizados, o que por vezes torna a monitorização insuficiente e, em particular, não permite adquirir leituras de determinadas grandezas críticas em tempo real.

A integração da monitorização com de equipamentos/instrumentos manuais com outros automáticos, evidencia as vantagens da elevada frequência de leituras, possibilitando um acompanhamento de maior pormenor e diminuindo os erros de operação.

Sendo na prática o preço dos equipamentos / instrumentos um fator importante para os Donos de Obra, torna-se necessário encontrar soluções de compromisso que permitam obter resultados fidedignos e atempados, mas simultaneamente conter os gastos. Assim, no plano proposto no Capítulo 4, a implementar em solos e rochas brandas com contactos sub-horizontais, conclui-se como adequado o recurso a um mínimo de equipamentos de aquisição de dados automáticos, complementados com equipamentos de leitura tradicional, obtendo-se desta forma a redundância de resultados fundamental requerida na observação geotécnica.

Destaca-se ainda a importância do plano de instrumentação “básico” apresentado que poderá ser adaptado a outro tipo de escavações para edifícios em centros urbanos, de modo a promover não só segurança, como também a utilização da instrumentação em qualquer tipo de intervenção, assegurando a diminuição de situações potencialmente danosas do edificado e que, em situações extremas podem conduzir a disputas em tribunal.

Este plano inclui igualmente a proposta de: (i) uso de VANT (drone) para auxiliar o especialista nas inspeções visuais e complementar a amostragem pontual obtida pela instrumentação; (ii) metodologia para circulação da informação relativa à observação geotécnica.

Conclui-se que as campanhas de instrumentação não devem ser desprezadas, uma vez que são uma mais-valia, quer na antevisão de acidentes, quer para garantir o funcionamento adequado da obra. A presente investigação permite colmatar os perigos potenciais associados a estas escavações urbanas, de projetos às vezes apelidados de “menor dimensão”, onde a instrumentação está omissa ou é insuficiente, mas que face à grande pressão de reabilitação urbana a que atualmente se assiste nas grandes urbes portuguesas, nomeadamente em Lisboa e Braga, pode contribuir para garantir a qualidade e segurança destas futuras construções.

A investigação realizada é um ponto de partida para a combinação de instrumentação manual e automática; quer isto dizer que, com o constante avanço da tecnologia e do conhecimento, ela está longe de concluída, pelo que é relevante prosseguir com o desenvolvimento desta temática.

## **5.2 Perspetivas futuras**

Para possibilitar e auxiliar este desenvolvimento são deixadas em aberto algumas sugestões:

- Ampliar a metodologia utilizada a escavações:
  - (i) profundas em solos e rochas brandas;
  - (ii) superficiais que não envolvam solos e rochas brandas com estrutura geológica sub-horizontal;
- Potencial combinação de vários tipos de instrumentação tendo em conta o constante desenvolvimento tecnológico.

## Referências bibliográficas

ASTM D 4945 – 08: 2008. *Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.*

Baca, M. and Brzakala, W. (2017) The Measurement and Control of Vibrations in Course of Sheet Pile Wall and Franki Pile Driving, in SGEM (ed.) *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*, República Checa, SGEM. Pilsen, pp. 929–936.

Bassett, R. (2012) *A Guide to Field Instrumentation in Geotechnics: Principles, installation and reading, A Guide to Field Instrumentation in Geotechnics*, CCR Press, Boca Roca, Florida.

Budhu, M. (2015) *Soil Mechanics Fundamentals*, 1st edn. West Sussex, Wiley Blackwell, Reino Unido.

Cardoso, A. and Moreira, B. (2019) Hospital CUF Tejo – Escavação , Contenção Periférica e Construção da Estrutura Até Ao Piso 0, in *9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia*, SEFE 9, São Paulo, p. 10.

Das, B. M. (2009) *Principles of Geotechnical Engineering*, 7th edn. Cengage Learning, Stamford.

Das, B. M. (2019) *Advanced Soil Mechanics*. 5th edn, *Advanced Soil Mechanics*, 5th ed. CRC Press, Boca Roca, Florida. doi: 10.1201/9781351215183.

dBwave (2017). Available at: <https://www.dbwave.pt/np-2074-obricacao-legal/> (Accessed: 30 November 2021).

Ding, X. & Ren, D. & Montgomery, B. & Swindells, C., (2000) Automatic Monitoring of Slope Deformations Using Geotechnical Instruments, *Journal of Surveying Engineering*, 126(2), pp. 57–68.

Direct Industry (2021). Available at: <https://www.directindustry.com/prod/drc-srl/product-161117-1926409.html> (Accessed: 25 November 2021).

Duncan, G. J. and Brooks-Gunn, J (2006) *Deep Excavation, TayRussell Sage Foundationlor & Francis*, Taylor & Francis, Londres.

Dunncliff, J. and Green, G. E. (1988) *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance, Engineering Geology*. Canadá, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

Dzurisin, D. (2007) *Volcano Deformation Geodetic Monitoring Techniques*, 1st edn. Edited by D. P. Blondel, Springer, Chichester, doi: 10.1007/978-3-540-49302-0.

Eberhardt, E. and Stead, D. (2011) Geotechnical instrumentation, in Darling, P. (ed.) *SME Mining Engineering Handbook*, 3rd ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Canada, pp. 551–571.

Encardio (2014). Available at: <https://www.encardio.com/geotechnical-instruments/triaxial-crack->

joint-meter (Accessed: 25 November 2021).

Encardio (2019a). Available at: <https://www.encardio.com/geotechnical-instruments/mechanical-mpbx> (Accessed: 25 November 2021).

Encardio (2019b). Available at: <https://www.encardio.com/geotechnical-instruments/vw-center-hole-load-cell> (Accessed: 25 November 2021).

Encardio (2020a). Available at: <https://www.encardio.com/geotechnical-instruments/abs-inclinometer-casing> (Accessed: 25 November 2021).

Encardio (2020b) Wireless Tilt meter, Encardio Rite, Lucknow, pp. 1–3.

Fernandes, M. D. M. (2016) *Mecânica dos solos - conceitos e princípios fundamentais*, 1st edn. Edited by A. P. Chaves, Oficina de Textos, São Paulo, Available at: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFBgkAF/mecanica-dos-solos-cefet-rs?part=5>.

Fiori, A. P. (2015) *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*, 3rd edn. Edited by C. G. da Silva, Oficina de Textos, São Paulo, Available at: <http://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/Fundamentos-de-mecanica-dos-solos-e-das-rochas-3ed-DEG.pdf>.

Geokon (2015). Available at: <https://www.geokon.com/4415> (Accessed: 25 November 2021).

Geokon (2019) Instalation Manual Model 6350 Vibrating Wire Tiltmeter, Geokon, Nova Hampshire, pp. 1–26.

Geokon (2020a). Available at: <https://www.geokon.com/3000> (Accessed: 25 November 2021).

Geokon (2020b) Instruction Manual Model 6101D MEMS Portable Tiltmeter, Geokon, Nova Hampshire, pp. 1–35.

Geokon (2021). Available at: <https://www.geokon.com/4500-Series> (Accessed: 25 November 2021).

Gouda Geo (no date). Available at: <https://gouda-geo.com/product/piezocones-and-electric-cpt-cones> (Accessed: 25 November 2021).

Habitação Viriato (2012). Available at: <https://viriatohabitacao.wordpress.com/2012/07/27/estrutura-vi/> (Accessed: 24 November 2021).

Holtz, R. D., Kovacs, W. D. and Sheahan, T. C. (2011) *An Introduction to Geotechnical Engineering*. 2nd edn. Edited by K. Rand. Pearson, Londres.

Hudson, J. A. and Harrison, J. P. (1997) *Engineering Rock Mechanics - An introduction to the Principles*. 1st edn. Edited by Pergamon. Elsevier Science, Oxford.

Hungr, O., Leroueil, S. and Picarelli, L. (2013) The Varnes classification of landslide types, an update, *Landslides*, 11(2), pp. 167–194. doi: 10.1007/s10346-013-0436-y.

ISO 18674-4:2020. Geotechnical investigation and testing — Geotechnical monitoring by field

instrumentation — Part 4: Measurement of pore water pressure: Piezometers.

Jaeger, J. C., Cook, N. G. W. and Zimmerman, R. W. (2007) *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4th edn, *Journal of Chemical Information and Modeling*, Blackwell Publishing, Boston.

MaasEcología (no date). Available at: <https://www.maasecologia.com/product/pozometro-50-mts-ec-1-060/> (Accessed: 25 November 2021).

Mandal, S. and Mondal, S. (2019) *Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction*. 1st edn, *Statistical Approaches for Landslide Susceptibility Assessment and Prediction*. Springer, Cham, Suíça, doi: 10.1007/978-3-319-93897-4.

Mishra, M. K. et al. (2019) MEMS Technology: A Review, *Journal of Engineering Research and Reports*, 4(1), pp. 1–24. doi: 10.9734/jerr/2019/v4i116891.

MundoGEO (2016). Available at: <https://mundogeo.com/2016/08/26/lancamento-nova-estacao-total-robotica-serie-gt-da-topcon/> (Accessed: 25 November 2021).

NP EN 1997-1:2010. Eurocódigo 7, Projeto geotécnico, Parte 1. Caparica: IPQ.

NP 2074:2015- Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas. Caparica: IPQ.

Oliveira, D. G. de, Brandt, J. R. T. and Leão, M. F. (2016) Instrumentação geotécnica em obras subterrâneas, *Revista Fundações e Obras Geotécnicas*, May, pp. 1–9.

Omnidots (2021). Available at: <https://www.omnidots.com/en/products> (Accessed: 25 November 2021).

Pinto, A. & Lopes, P & Dias, J & Costa, R & Almeida, F., (2003) *Palácio Sotto Mayor: Recalçamento de edifício centenário e escavação de grande altura em meio urbano*, Lisboa.

Price, D. G. (2009) *Engineering Geology, principles and practice*. 1st edn. Edited by M. . de Freitas, Springer, London.

Roctest (2018). Available at: <https://roctest.com/en/product/profil-digital-inclinometer-probe/> (Accessed: 25 November 2021).

Russo, C. J., Brainerd, M. L. and 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. doi: <https://doi.org/10.1051/mateccconf/201814602012>.

Rybak, J. and Schabowicz, K. (2010) Survey of Vibrations Generated in Course, in NDE (ed.) *40th international conference and NDT exhibition*. Pilsom, Republica Checa, pp. 237–238.

Segalini, A., Carri, A. and Savi, R. (2017) Role of Geotechnical Monitoring: State of the Art and New Perspectives, in *GEO-EXPO 2017*, Springer, Saravejo, pp. 1–11. doi: 10.35123/geo-

expo\_2017\_3.

*Sinergeo* (2021). Available at: <http://www.sinergeo.pt/spt-standard-penetration-test/> (Accessed: 25 November 2021).

*Sisgeo* (2017). Available at: <https://www.sisgeo.com/products/inclinometers-and-tiltmeters/item/tilli-portable-tilmeter.html> (Accessed: 25 November 2021).

Terzaghi, K., Peck, R. B. and Mesri, G. (1996) *Terzaghi, K. Peck R. - Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd edn. John Wiley & Sons, Canadá.

*Topcon* (no date). Available at: <https://topconpositioning.es/tienda/accesorios-y-consumibles/consumibles/dianas-reflectantes-adhesivas-para-topografia-amarillas/> (Accessed: 19 February 2022).



2022

CATARINA DE  
FREITAS SANTOS

LINHAS ORIENTADORAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE UM PLANO DE  
INSTRUMENTAÇÃO EM ESCAVAÇÕES DE EDIFÍCIOS EM MEIO URBANO