



## Aplicação do método observacional com recurso a monitoramento geotécnico de uma solução de escavação e contenção periférica

Andre Silva

Engenheiro Geotécnico, Measurand, São Paulo, Brasil, [andre.silva@measurand.com](mailto:andre.silva@measurand.com)

Carlos Martins

Engenheiro Geotécnico, JetSJ, Lisboa, Portugal, [cmartins@jetsj.com](mailto:cmartins@jetsj.com)

Christiane Levesque

Engenheira Geotécnica, Measurand, Fredericton, Canadá, [christiane.levesque@measurand.com](mailto:christiane.levesque@measurand.com)

Rui Tomásio

Engenheiro Geotécnico, JetSJ, Lisboa, Portugal, [rtomasio@jetsj.com](mailto:rtomasio@jetsj.com)

**RESUMO:** A instrumentação e monitorização geotécnica e estrutural apresentou uma evolução significativa nos últimos anos, com o surgimento de novas tecnologias, como equipamentos de transmissão wireless de médio e longo alcance, que permitem uma captura e transmissão de dados mais rápida e eficiente. O artigo propõe a análise de desempenho de uma estrutura de contenção periférica definida para uma escavação urbana em Lisboa, utilizando para tal um plano de monitorização geotécnico automatizado, e discute os benefícios e potenciais melhorias na implementação de soluções de monitorização geotécnico em projetos nacionais. O objetivo é garantir as melhores condições de segurança, eficiência e custo da solução, reduzindo as incertezas inerentes às condições geológico-geotécnicas por meio do Método Observacional. O plano de monitorização definido na obra em análise utiliza vários equipamentos, incluindo piezômetros corda vibrante, células de carga do tipo MEMS, inclinômetros automatizados ShapeArray e clinômetros biaxiais (tiltmeters), que fornecem várias leituras diárias disponibilizadas em um sistema de aquisição remoto e on-line.

**PALAVRAS-CHAVE:** método observacional, monitoramento, instrumentação, inclinômetros, monitoramento automatizado

**ABSTRACT:** Geotechnical and structural instrumentation and monitoring have developed significantly in recent years, with the emergence of new technologies, such as medium and long-range wireless transmission equipment, that allow faster and more efficient data collection and transmission. The article proposes the performance analysis of a retention wall structure defined for an urban excavation in Lisbon using an automated geotechnical monitoring plan and discusses the benefits and potential improvements in implementing geotechnical monitoring solutions in national projects. The monitoring plan defined uses different instruments, including vibrating wire piezometers, MEMS load cells, Shapearray automated inclinometers and biaxial tiltmeters, which provide several daily readings available in a remote and online acquisition system. The objective is to ensure the best conditions of safety, efficiency, and cost of the solution, reducing the uncertainties inherent to geological-geotechnical conditions through the Observational Method.

**KEYWORDS:** observational method, monitoring, instrumentation, inclinometer, automated monitoring

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



## 1 Introdução

O Método Observacional é crucial para planejar um projeto de escavação em ambiente urbano, ajustando o projeto conforme a escavação avança, considerando as condições reais do terreno. Isso é especialmente relevante devido à complexidade geológica e restrições urbanas. Combinado a um monitoramento geotécnico automatizado, o Método Observacional avalia o desempenho da escavação em tempo real, garantindo segurança e eficiência através da redução de incertezas geotécnicas, minimizando atrasos e custos extras.

O objetivo do artigo proposto foca-se na análise de desempenho da solução de contenção periférica definida para a escavação dos pisos enterrados do Edifício Phoenix em Lisboa, Portugal, realizada com recurso à comparação entre os dados resultantes do plano de instrumentação e monitorização totalmente automatizado, em particular com recurso aos inclinómetros ShapeArrays, e a performance prevista em projeto por via de análises de modelação numérica.

## 2 Descrição do projeto

O projeto em questão consiste na construção do edifício Phoenix, que será composto por uma cobertura, sete pisos elevados, um piso térreo e três pisos enterrados. Para efetuar a ligação com os diversos arruamentos, o piso térreo será dividido em três níveis. Considerando os condicionamentos existentes, foi proposta uma solução para a estrutura de contenção periférica necessária para a execução dos pisos enterrados.

Inicialmente, foram realizados trabalhos preliminares de remodelação de terrenos, que permitiram a remoção de grande parte do solo existente acima do nível dos arruamentos envolventes e posterior execução de taludes provisórios complementares na periferia das caves a construir, a fim de otimizar a solução e definir uma plataforma de trabalho para execução das paredes de contenção. Os taludes provisórios foram definidos com inclinações compatíveis com as características geomecânicas dos materiais envolvidos.

Atendendo aos principais condicionamentos, executou-se uma solução de contenção periférica do tipo “Paredes Moldadas” para execução das caves do edifício, constituída por painéis em betão armado com espessura útil de 50cm. A execução da escavação ao abrigo de painéis de parede moldada visou cumprir os requisitos impostos pela Arquitetura no que à espessura e ao acabamento final da solução dizia respeito, bem como optar pela solução técnica mais otimizada em termos de custo, tendo ainda o seu encastramento abaixo do fundo de escavação sido definido por forma a controlar/minimizar a afluência de água ao interior do recinto de escavação e a garantir a segurança da mesma em termos de estabilidade hidráulica e de estabilidade global.

A escavação da parede moldada foi em geral realizada com recurso a “grab” hidráulico sendo que, durante estes trabalhos, o volume de terreno retirado é ocupado por fluido de estabilização no interior da vala. Contudo, devido às formações geológicas que se previam intersestar anteviu-se a eventual dificuldade de escavação unicamente com o “grab”, pelo que se definiu a execução prévia de furos verticais realizados com recurso a trado curto e vara Kelly. No que respeita ao travamento horizontal da parede de contenção durante a fase provisória, definiu-se a execução de ancoragens, pré-esforçadas, e a colocação de escoras metálicas de canto. As ancoragens foram dispostas em 2, 3 e 4 níveis sendo constituídas, na sua generalidade, por 5,

Aponte a câmara do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



6 e 7 cordões de 0,60” e seladas através do sistema IRS em formações competentes e geologicamente estáveis em relação à geometria total da escavação com comprimento de selagem variáveis entre 6m e 8m, materializado por via de furação com diâmetros não inferiores a 200mm (8”).

Em fase definitiva, a estrutura do edifício será responsável pela estabilidade da parede de contenção face aos impulsos provocados pelo terreno e pelas sobrecargas rodoviárias, sendo os sistemas de travamento provisórios, nomeadamente ancoragens e escoras, desativados após conclusão da referida estrutura.

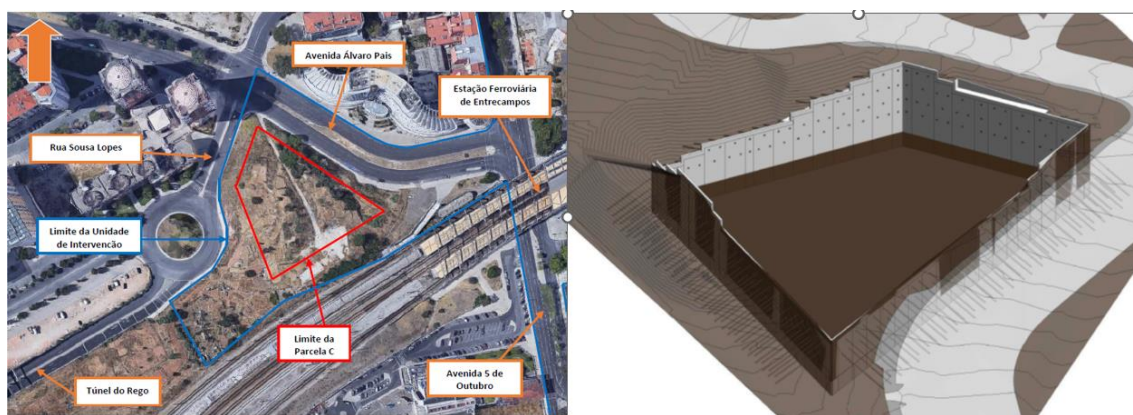


Figura 1 – Localização do projeto e condicionantes

### 3 Condicionamentos

#### 3.1 Condicionamentos geológicos-geotécnicos e hidrogeológicos

##### 3.1.1 Campanha de investigação geotécnica

Realizou-se em maio de 2019 uma campanha de prospecção geotécnica e ambiental para identificar e caracterizar as formações presentes no local de construção. Foram realizadas 12 sondagens mecânicas com amostragem contínua, 146 ensaios de penetração dinâmica - SPT, coletadas amostras de água e instalados 2 piezômetros. No lote em questão, foram feitas apenas 4 sondagens mecânicas (SPz9, S10, SPz11 e S12), com a instalação de piezômetros em duas delas. Em outubro de 2020, foi realizada uma campanha de prospecção complementar, com a realização de 6 sondagens mecânicas, ensaios de permeabilidade (LeFranc e Slug), coleta de amostras e instalação de 4 piezômetros. Foram realizados ainda ensaios laboratoriais nas amostras coletadas e análises químicas na água subterrânea.

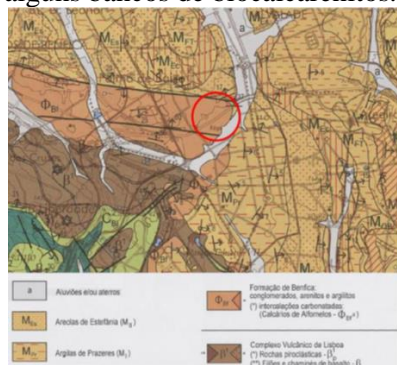
##### 3.1.2 Caracterização geomorfológica, litológica, hidrogeológica e geomecânica

A zona em estudo é composta principalmente pela Formação de Benfica, uma formação do Cenozóico que ultrapassa 400m de espessura e é composta por conglomerados e arenitos siliciclásticos com matriz areno-lutítica e elementos de quartzo, quartzito, lidito, xistos e clastos

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



feldspáticos. Também são encontradas Argilas de Prazeres, que são argilas e margas de lagunas litorais, e Areolas de Estefânia, que são representadas por areias finas, areias argilosas, argilitos e alguns bancos de biocalcarenítos.



Horizonte e Formações	Intervalos ( $N_{100}/N_{60}$ )	$\gamma$ [ $\text{kN/m}^3$ ]	$c'$ [ $\text{kPa}$ ]	$\phi$ [ $^\circ$ ]	E [MPa]	$\sigma_{adm}$ [kPa]	Escavabilidade (Meios mecânicos)
$G_1$ Aterro heterogêneo	$8 < (N_{100}) < 25$	18-19	--	32-35	30-80	--	Ligeiros a médios
$G_{2A}$ Solos arenosos médios	$8 < (N_{100}) < 25$	18-19	--	32-35	30-80	100-300	Ligeiros a médios
$G_{2B}$ Solos arenosos compactos	$25 < (N_{100}) < 42$	19-20	--	35-38	80-140	300-500	Médios a pesados
$G_{2C}$ Solos arenosos muito compactos a maciço arenítico decomposto	$42 < (N_{100}) < 60$	20-21	$< 25$	40-42	140-200	500-600	Pesados ou Ripper
$G_{3A}$ Maciço arenítico friável	$80 < N_{60} < 180$	21-22	25-50	40-45	300-500	600-700	Pesados ou Ripper
$G_{3B}$ Maciço arenítico	$N_{60} > 180$	22-23	50-100	40-45	500-800	$> 700$	Ripper ou métodos especiais de desmonte

$\gamma$  - peso volumétrico;  $c'$  - coesão não drenada;  $c''$  - coesão efetiva;  $\phi$  - ângulo de resistência ao corte; E - módulo de deformabilidade

Figura 2 – a) Excerto da folha 34-D (Lisboa) da Carta Geológica de Portugal, Cascais, 1/50.000, com o enquadramento geológico aproximado da área em estudo (assinalado a amarelo). b) Valores estimados dos parâmetros geomecânicos para cada zona geotécnica

A campanha de prospeção permitiu identificar 6 horizontes geotécnicos com base na caracterização das amostras de sondagens. Os parâmetros geotécnicos foram avaliados utilizando as correlações de Decourt para o ângulo de resistência e para o módulo de deformabilidade. A Figura 2 apresenta os valores dos parâmetros geotécnicos para as diferentes formações. Os níveis freáticos em geral ficam entre 6 e 9 metros de profundidade, o que significa que uma parte significativa da escavação será realizada abaixo do mesmo

### 3.1.3 Condicionamentos arquitetônicos

No que ao edifício diz respeito, com o objetivo de definir a ligação aos diversos arruamentos circundantes ao nível do piso 0, tornou-se necessário que este se desdobrasse em 3 níveis distintos, por forma a efetuar a ligação às diversas cotas associadas, pelo que, com o desenrolar do edifício para Poente, os 2 níveis mais baixos do piso 0 se tornam subcaves. Assim, a definição do topo da parede de contenção foi efetuada por forma a que acompanhasse, sempre que possível, o desenvolvimento variável dos pisos térreos. Outro condicionamento associado à escavação do edifício foi a dimensão da parede de contenção que, privilegiando o espaço de utilização futura das caves, se definiu como máximo ser 50cm.

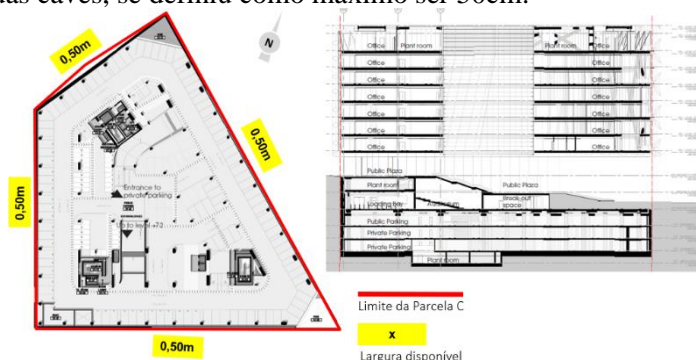


Figura 3 – Planta de Arquitetura de pisos enterrados (à esquerda) e corte transversal (à direita)

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



#### 4 Plano de instrumentação e observação

O Plano de Instrumentação e Observação tem como objetivo garantir a segurança e economia na escavação e contenção periférica dos pisos enterrados, bem como analisar o comportamento de estruturas e infraestruturas durante a execução. O plano inclui a medição de deslocamentos horizontais da parede de contenção, rotações da parede, nível de água, carga nas ancoragens e deslocamentos verticais das vias circundantes, utilizando dispositivos como inclinômetros automatizados (ShapeArrays), tiltmeters, piezômetros, células de carga e marcas topográficas. O plano foi desenvolvido a partir da análise dos principais riscos associados à execução dos trabalhos.

Quadro 1 – Tabela resumo dos instrumentos utilizados

Quantidade (un)	Instrumento	Grandeza a medir
4	Inclinômetros automatizados (ShapeArrays)	Deslocamentos horizontais da parede de contenção
30	Tiltmeters	Rotações da parede de contenção
4	Piezômetros de Corda Vibrante	Nível de água no interior do maciço
16	Células de carga	Carga nas ancoragens
9	Marcas Topográficas	Assentamentos das vias circundantes

Os instrumentos foram distribuídos pelos quatro alçados de projeto de tal como ilustrado na figura abaixo onde é demonstrada a instrumentação do alçado e em perspectiva 3D. As células de carga foram colocadas em alinhamentos de referência, para os quais foi realizado modelo de cálculo, secções estas que dispõem igualmente de inclinómetro. Já as marcas topográficas foram colocadas 9 no total, 3 ao longo da Rua Sousa Lopes, 3 ao longo do Av. Álvaro Pais e 3 ao longo das linhas ferroviárias da IP.

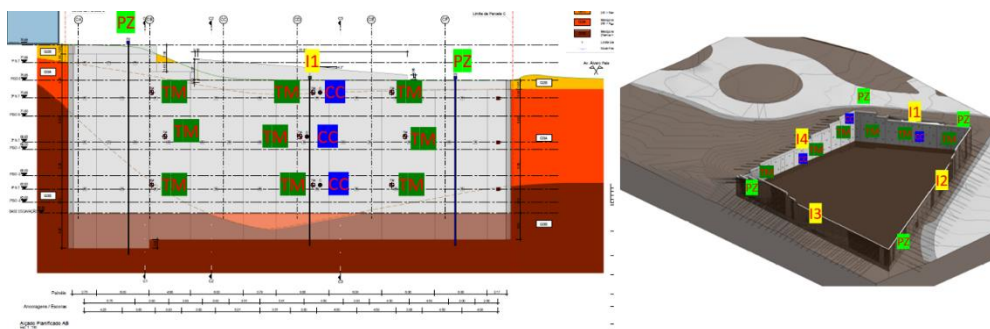


Figura 4 – Localização da instrumentação em alçado e projeção 3D. I-inclinómetro (ShapeArray); TM- Tiltmeter, CC-Célula de carga, PZ-Piezómetro

#### 4.1 Frequência de leituras

Dadas as características da obra, recomendou-se que os aparelhos instalados fossem lidos diariamente (a cada 6 horas) durante a execução dos trabalhos de escavação, contenção periférica e da super-estrutura (podendo ser ajustadas caso necessário). A periodicidade de leitura das marcas topográficas foi mensal, sendo estes os únicos instrumentos não automatizados. Os

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



resultados foram apresentados de forma numérica e gráfica, em plataforma on-line e interpretados pelos técnicos projetistas das estruturas de contenção instrumentadas, em colaboração com os técnicos da obra e da fiscalização.

#### 4.2 Critérios de alerta e de alarme

Tendo por base o tipo e solução propostos para a contenção executada, assim como a geologia do local da intervenção, foi possível estimar, os seguintes critérios para a estrutura de contenção:

- Crítério de alerta: deslocamentos máximos da ordem de 25mm, no sentido horizontal, e de cerca de 10mm, no sentido vertical;
- Crítério de alarme: deslocamentos máximos da ordem de 35mm, no sentido horizontal, e de cerca de 15mm, no sentido vertical.

#### 4.3 Automatização de sistema de monitorização e visualização

A automatização de instrumentação geotécnica com o uso de dataloggers e gateways é uma técnica cada vez mais utilizada em projetos de construção e manutenção de estruturas geotécnicas. Essa técnica permite que dados de instrumentação sejam recolhidos automaticamente pelos dataloggers e transmitidos para um gateway, que por sua vez envia os dados para uma plataforma de visualização online.

A plataforma online (Level-GAM) de visualização de instrumentação é uma ferramenta digital que permite a leitura e interpretação de dados coletados por sensores instalados em estruturas geotécnicas em tempo real. A plataforma pode ser acessada de qualquer lugar, armazenando dados de forma segura e organizada, tendo sido uma ferramenta valiosa para análise de longo prazo do comportamento das estruturas.

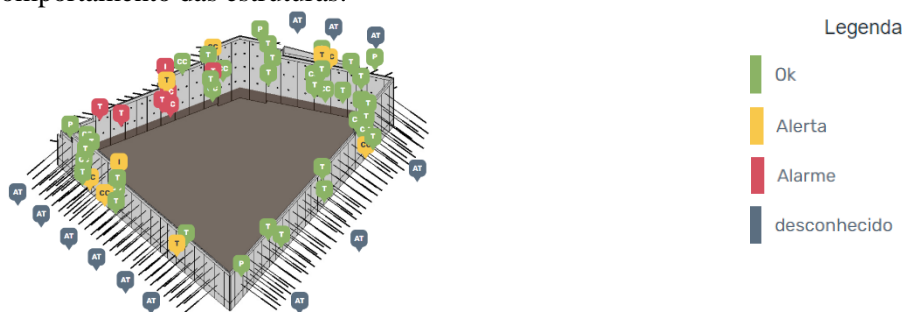


Figura 5 – Plataforma online Level GAM: Perspetiva da obra, instrumentos instalados e respetivo estado à data

### 5 Análise e interpretação dos resultados da monitorização

#### 5.1 Inclínómetros automatizados (ShapeArrays)

De seguida serão apresentados e analisados os resultados dos inclínómetros automatizados instalados dentro das paredes moldadas e feita uma comparação entre o comportamento esperado previsto pela modelação numérica e o realmente verificado em campo.

Aponte a câmara do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



Esses dispositivos são importantes para monitorizar a estabilidade da parede moldada praticamente em tempo real através da monitorização automatizada, tal como a correlação com outros instrumentos como as células de carga, tiltmeters e piezómetros.

Os modelos numéricos, baseados das diversas seções-tipo do projeto, foram utilizados para prever os deslocamentos esperados na estrutura, tendo por base as informações geológicas e hidrogeológicas, bem como as características das ancoragens (comprimento, inclinação e carga), e da própria parede moldada (espessura e ficha). Esses modelos são baseados em cálculos matemáticos complexos que levam em conta as condições geotécnicas do local e a sua interação com o elemento estrutural.

Na análise comparativa entre os resultados numéricos e os reais, é importante considerar uma série de fatores, como as variações nos perfis geológicos e hidrogeológicos, a quantidade e a carga das ancoragens, bem como o faseamento construtivo associado. Além disso, é importante lembrar que os modelos numéricos são apenas previsões e que as condições reais do local podem ser diferentes e a monitorização a única ferramenta que o pode comprovar.

Inclinometro				
I1	Nivel Ancoragem	1º	2º	3º
	Data Ensaio	14/jan	10/fev	24/fev
I2	Nivel Ancoragem	1º	2º	3º
	Data Ensaio	04/fev	14/fev	05/mar
I3	Nivel Ancoragem	1º	2º	-
	Data Ensaio	17/fev	12/mar	-
I4	Nivel Ancoragem	1º	2º	-
	Data Ensaio	07/fev	24/fev	-

Figura 6 – Resumo das datas de ensaios das ancoragens em cada nível de escavação

Um aspeto crucial na análise diz respeito à velocidade de escavação e tensionamento das ancoragens, para isso nas figuras seguintes serão apresentados os deslocamentos máximos acumulados fase de escavação em cada instrumento, tal como destacadas as datas de testagem das ancoragens mais próximas (N1, N2 e N3), o final de escavação (maio 2022), período de transição entre final de escavação e início da estrutura, tal como um destaque pertinente de um período de chuvas particularmente intensas entre Novembro e Dezembro de 2022.



Figura 7 – a) Deslocamentos acumulados no inclinómetro I1. Curva de deslocamentos acumulados máximos com destaque para as instalações das ancoragens (N1, N2 e N3), final de escavação (F.E), período de chuvas intensas (nov/dez 22) e última leitura(jan/23) antes do início da estrutura.

Aponte a câmara do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





Figura 8 - a) Deslocamentos acumulados no inclinômetro I2. Curva de deslocamentos acumulados máximos com destaque para as instalações das ancoragens (N2 e N3), final de escavação (F.E), período de chuvas intensas (nov/dez 22) e última leitura (jan/23) antes do início da estrutura.



Figura 9 - a) Deslocamentos acumulados no inclinômetro I3. Curva de deslocamentos acumulados máximos com destaque para as instalações das ancoragens (N1, N2), final de escavação (F.E), período de chuvas intensas (nov/dez 22) e última leitura (jan/23) antes do início da estrutura.



Figura 10 - a) Deslocamentos acumulados no inclinômetro I4. b) Curva de deslocamentos acumulados máximos com destaque para as instalações das ancoragens (N1, N2), final de escavação (F.E), período de chuvas intensas (nov/dez 22) e última leitura (jan/23) antes do início da estrutura.

Quadro 2 – Quadro comparativo entre os deslocamentos horizontais previstos e reais

ShapeArray	Deslocamento estimado (mm)	Deslocamento real em Maio/2022 (mm)	Deslocamento real em Janeiro/2023 (mm)	Critério Alerta (mm)	Critério Alarme (mm)
I1	11,25	8,5	13,9	25,0	35,0
I2	11,25	5,4	8,5	25,0	35,0
I3	6,5	16,3	29,1	25,0	35,0
I4	6,5	15	38,5	25,0	35,0

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





## 5.2 Discussão de resultados em aberto

Conforme resumido no Quadro 2, os inclinômetros I1 e I2 apresentaram um comportamento dentro do estimado por via dos modelos numéricos. Sobre estes, refere-se também que apresentam uma coerência visível entre as fases de escavação e tensionamento de ancoragens. Por sua vez, os inclinômetros I3 e I4 extrapolaram os valores previstos por via dos modelos numéricos, tendo respectivamente, atingido o critério de alerta e alarme. Sobre estes, refere-se também que apresentam um certo desfasamento, entre as fases de escavação e tensionamento de ancoragens, o que se poderá justificar por estes inclinômetros se localizarem em zona de transição entre 2 e 3 níveis de ancoragens. Refere-se ainda que, no que ao I3 diz respeito, de todos é o que revela um pior comportamento em termos de fixação da ficha da parede, talvez motivada por variação do cenário geológico e geotécnico.

Tendo em vista justificar o comportamento dos inclinômetros refere-se que a obra atingiu o fundo de escavação em Maio de 2022, tendo estado parada desde então. Neste período, verificou-se uma tendência de crescimento dos deslocamentos quando seria esperado a sua estabilização. Em complemento, refere-se que esta tendência apresentou uma aceleração entre Novembro e Dezembro.

No decorrer deste período, em particular com o atingir dos critérios de alerta e alarme definidos, foram tomadas diligências em obra com o objetivo de aferir a origem do comportamento incoerente dos inclinômetros I3 e I4 face ao esperado. Verificou-se que a origem deste comportamento era o funcionamento deficiente das cunhas de diversas ancoragens que não estariam a travar adequadamente os cordões tensionados e, por conseguinte, o travamento das paredes, o que se traduziu na deformação das mesmas. A situação evidenciava-se em vários alçados tendo sido corrigida em finais de Dezembro. Embora com maiores impactos nos inclinômetros I3 e I4, verifica-se a conseqüente estabilização do comportamento geral da contenção após a correção referida ( ver Figura 11). Uma observação complementar relevante é de que no caso do I3 e I4 as secções apenas dispõem de 2 ancoragens, pelo que, num eventual problema com as mesmas, a capacidade de redistribuição é inferior.



Figura 11. Curva de deslocamentos acumulados máximos com destaque para as instalações das ancoragens (N1, N2), final de escavação (F.E), período de chuvas intensas (nov/dez 22) e última leitura disponibilizada (mai/23) após reforço do painel com ancoragens complementares

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Por fim, relativamente à aceleração de deformação ocorrida entre Novembro e Dezembro, atribui-se a sua origem às fortes chuvadas ocorridas no período em questão. Refere-se que, apesar de ter sido considerado no modelo de cálculo, os inclinómetros I3 e I4 instrumentam painéis que dispõem de um talude de escavação no seu tardo. As chuvas intensas aliada à impermeabilidade revelada pelos terrenos, poderá ter resultado em sobrecargas provenientes no tardo da contenção por saturação dos terrenos em talude, o que poderá ter contribuído para as deformações ocorridas.

## 6 Conclusões

O enquadramento da obra descrita determinou a necessidade de desenvolver soluções seguras e económicas, devidamente compatibilizadas com os vários condicionamentos existentes, em particular os de natureza geológico-geotécnica e hidrogeológica, arquitetónicos e de preservação de estruturas e infraestruturas vizinhas.

Neste âmbito sublinhou-se a importância do Plano de Instrumentação e Observação na gestão do comportamento da estrutura de contenção periférica e infraestruturas vizinhas, confirmando-se ser uma ferramenta indispensável numa obra em meio urbano com características da presente. Em complemento, destacou-se a relevância de utilizar um sistema de instrumentação automatizado, o qual permitiu, durante um período em que a obra esteve mais ausente das entidades executantes e fiscalizadoras, detetar um comportamento não conforme com o previsto, bem como no seu acompanhamento após a tomada de medidas corretivas.

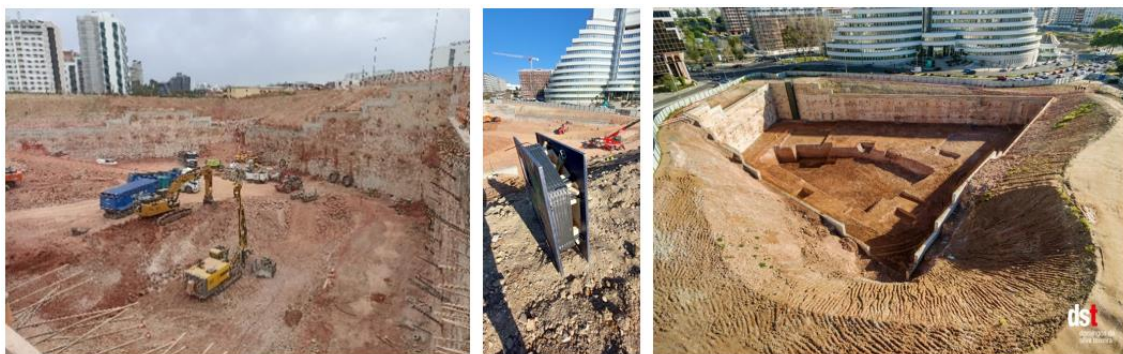


Figura 12 – a) Vista da obra em fase final dos trabalhos de escavação. b) inclinómetro automatizado ShapeArray em bobine antes da sua instalação. c) escavação finalizada

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos demais, a autorização para a redação e publicação do presente artigo. Consideram importante sublinhar que as soluções implementadas resultaram de um trabalho de equipa, no âmbito do qual se destaca o papel importante das empresas: Rockbuilding-Soluções Imobiliárias SA, gestor de projeto, DST, empreiteiro geral, Teixeira Trigo Lda, fiscalização, LEVEL pelo fornecimento da plataforma on-line de monitorização e a Geoint pelos serviços de instalação de instrumentação

Aponte a câmara do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.

