

## Monitoramento de Cortina de Estacas com Ancoragens no Distrito Federal

Rafael Lima de Carvalho

Engenheiro Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, Lc.rafael98@gmail.com

Emerson Batista Silva

Engenheiro Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, emersonbs.engcivil@gmail.com

Rafael Cerqueira Silva

Professor Adjunto, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, rafael.silva@unb.br

Renato Pinto da Cunha

Professor Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, rpcunha@unb.br

Carlos Medeiros Silva

Engenheiro Civil, EMBRE Engenharia, Brasília, Brasil, carlos@embre.com.br

**RESUMO:** No Distrito Federal (DF), devido a determinações regulatórias, é comum a existência de subsolos profundos nos edifícios locais, com escavações frequentemente superiores a 10 metros. Entretanto, o solo predominante na região apresenta comportamento não saturado colapsível, que é suscetível a deformações bruscas devido às mudanças no grau de saturação e/ou no estado de tensão-deformação. Devido a essa peculiaridade geotécnica, a prática comum da engenharia de fundações no DF é a utilização de cortinas de estacas para minimizar os riscos inerentes à camada colapsível do maciço. A associação dessas estruturas com elementos ativos (ancoragens) é usual para estabilizar e minimizar as deformações. Contudo, adiciona-se uma maior complexidade ao dimensionamento geotécnico, em razão dos distintos comportamentos dos elementos estruturais. O dimensionamento tradicional é baseado em métodos de equilíbrio limite, que deixam em segundo plano a relação tensão-deformação. Consequentemente, o monitoramento dos deslocamentos durante a execução é necessário, pois possibilita a retroanálise de parâmetros e a verificação das premissas de projeto. Diante disso, apresentam-se resultados e análises do monitoramento por inclinometria e do lençol freático realizados em uma escavação no DF. Os resultados mostraram que o comportamento, nem sempre é previsível quando se associa elementos estruturais com funções distintas, estacas e ancoragens.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escavação, Monitoramento, Cortina Ancorada.

**ABSTRACT:** In the Federal District (DF), due to regulatory requirements, it is common to have deep basements in local buildings, with excavations often exceeding 10 meters. However, the predominant soil in the region exhibits collapsible unsaturated behavior, which is susceptible to abrupt deformations due to changes in saturation degree and/or stress-strain state. Because of this geotechnical peculiarity, the common practice of foundation engineering in the DF is the use of pile walls to minimize the inherent risks associated with the collapsible layer of the mass. The association of these structures with active elements (anchors) is usual to stabilize and minimize deformations. However, it adds greater complexity to geotechnical design, due to the distinct behaviors of the structural elements. Traditional design is based on limit equilibrium methods, which place less emphasis on the stress-strain relationship. Consequently, monitoring displacements during execution is necessary, as it allows for the retro-analysis of parameters and verification of design assumptions. Therefore, results and analyses of inclinometry monitoring and groundwater level measurements conducted in an excavation in the DF are presented. The results showed that behavior is not always predictable when associating structural elements with different functions, such as piles and anchors.

**KEYWORDS:** Excavation, Monitoring, Anchored Wall.

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de soluções de contenção em estacas espaçadas na região do Distrito Federal (DF) tem se tornado uma prática comum, visto que as condições não saturadas presentes no solo local proporcionam uma resistência adicional que viabiliza a implementação de um sistema descontínuo de estacas. Esse sistema combina a rigidez de várias estacas para combater os esforços de flexão gerados pelo empuxo do solo com a capacidade resistiva do tirante à tração. Ao permitir um espaçamento entre os elementos, essa solução oferece vantagens tanto econômicas quanto executivas em solos situados acima do nível da água e com certo grau de coesão (Falconi *et al.*, 2019).

Entretanto, embora a não saturação do solo ofereça um acréscimo no intercepto coesivo, proveniente das forças interpartículas, no caso a sucção, adicionando uma parcela resistiva ao cisalhamento do solo. Blanco (1995), Araki (1997) e Guimarães (2002) apontam que o solo predominante no DF é caracterizado por uma argila porosa colapsível de granulometria típica de solos arenosos com estrutura bimodal. Devido a estas propriedades, algumas condições, como a alteração no estado tensões do solo ou a perda de sucção em períodos chuvosos, podem ocasionar movimentações excessivas, acarretando danos na estrutura e nas adjacências.

Nesse sentido, uma solução adequada para conter estes deslocamentos é por meio de um sistema complementar de suporte ativo, isto é, fixa-se a estrutura ao solo por meio de ancoragens protendidas com bulbos de ancoragem abaixo da zona ativa, região próxima a superfície e propensa a variação de umidade, conseqüentemente ao colapso. Estas ancoragens funcionam como elementos que induzem cargas concentradas na contenção, a fim de mobilizar a resistência passiva do solo. A execução destes elementos sucede a instalação das estacas, onde são realizadas escavações parciais e, então, instalam-se as ancoragens, comumente inclinadas para baixo, de forma a facilitar sua inserção no solo e atingir camadas de resistência adequada para a zona de ancoragem.

A adoção desse mecanismo, contudo, gera uma complexidade adicional ao cálculo do sistema de contenção, onde as estacas e as ancoragens devem trabalhar em conjunto de forma a suportar os empuxos, que passam a apresentar uma distribuição não linear ao longo da profundidade devido aos efeitos de arqueamento e a aderência solo-estrutura existente (Paik e Salgado, 2003). Apesar destes efeitos, Santos (2016) aponta que, para pequenos espaçamentos, o sistema de contenção em estacas pode ser considerado como contínuo, podendo assim ser analisado como estado plano de deformações.

Ainda que o uso de ancoragens contribua para estabilidade da estrutura de forma substancial, Dunnicliff (1993) ressalta que o engenheiro geotécnico trabalha com materiais muito heterogêneos, cujas propriedades *in situ* não podem ser precisamente determinadas, ainda que hajam ensaios laboratoriais. Em face destas incertezas, a execução de uma obra geotécnica deve ser acompanhada e as condições *in situ* devem ser constantemente atualizadas e analisadas. Dessa forma, pode-se ter a confirmação, ou invalidação, das premissas de cálculo.

Nesse contexto, é importante conhecer o comportamento de uma estrutura de contenção, principalmente quando há associação de elementos passivos (estacas) com ativos (ancoragens), visto que ocorre uma variabilidade de deslocamentos ao longo do processo executivo. Assim, o presente artigo tem como objetivo apresentar os resultados e análises do monitoramento de uma estrutura de contenção composta por estacas e ancoragens realizadas no Distrito Federal, a fim de determinar os níveis de deslocamentos e compará-los com previsões realizadas por meio de cálculos analíticos.

## 2 METODOLOGIA

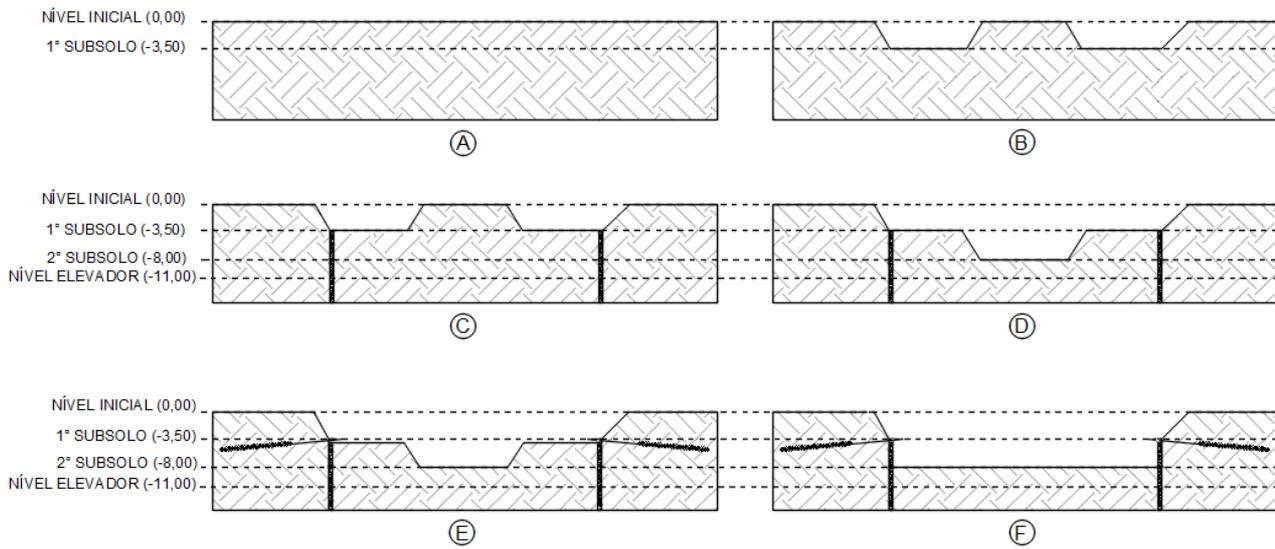
### 2.1 Descrição do local

A obra em estudo (Figura 1) se situa na Asa Sul da cidade de Brasília/DF. A obra possui uma escavação com dois níveis de subsolo para um edifício comercial, totalizando 8 m de profundidade. Entretanto, na seção escolhida para análise, há mais um nível de escavação referente à instalação do poço de elevador, totalizando 11 m de profundidade. A seção corresponde a um talude inclinado com faceamento de concreto projetado, com 3,5 m de profundidade. Subjacente a este talude, instalou-se uma cortina de estacas do tipo hélice contínua com espaçamento de 1 m entre eixos, diâmetro de 50 cm e 14 m de comprimento, sendo 7,5 m escavados e 6,5 m de ficha. Essa foi fixada ao solo com elementos ativos (ancoragens) posicionados no topo das estacas mediante uma viga de coroamento. As ancoragens foram instaladas em um ângulo de 20° com a horizontal e

com uma carga incorporada de 211,90 kN, sendo espaçadas a cada 3 m longitudinalmente. A Figura 2 ilustra o processo executivo adotado na obra.



Figura 1. Fotos da obra em execução: a) vista geral e b) vista de perfil.



- A - Condição inicial.
- B - Escavação das laterais até o nível do 1º subsolo, mantendo taludes com faceamento em concreto projetado.
- C - Instalação das estacas.
- D - Escavação da parte central até o nível do 2º subsolo, mantendo bermas de equilíbrio.
- E - Instalação das ancoragens e aplicação das cargas.
- F - Escavação completa, desconsiderando o elevador.

Figura 2. Esquema do processo executivo da escavação e estrutura de contenção.

## 2.2 Caracterização geotécnica

De forma a compreender as condições geotécnicas do local, é necessário conhecer inicialmente o perfil do solo escavado e contido pela cortina de estacas com ancoragens. Para isso, foi utilizado o resultado de sondagens à percussão (SPT) em seis furos ao longo do terreno como base para traçar o perfil geotécnico ilustrado na Figura 3. Observa-se que há presença de argila siltosa porosa com coloração vermelha, que se estende até uma profundidade média de 6 m. Em sequência há uma camada de transição de silte arenoso, de coloração vermelha-amarela até uma profundidade média de 9 m, subsequente tem-se o início de uma zona saprolítica com uma matriz siltosa de alta resistência. Nesta última camada da sondagem o  $N_{SPT}$  aumenta com a profundidade. O mesmo não é observado para as duas camadas sobrejacentes, em que a camada superior apresenta um valor médio de 6 e a de transição, um valor de 7, sendo o desvio padrão de 2 e 3, respectivamente.

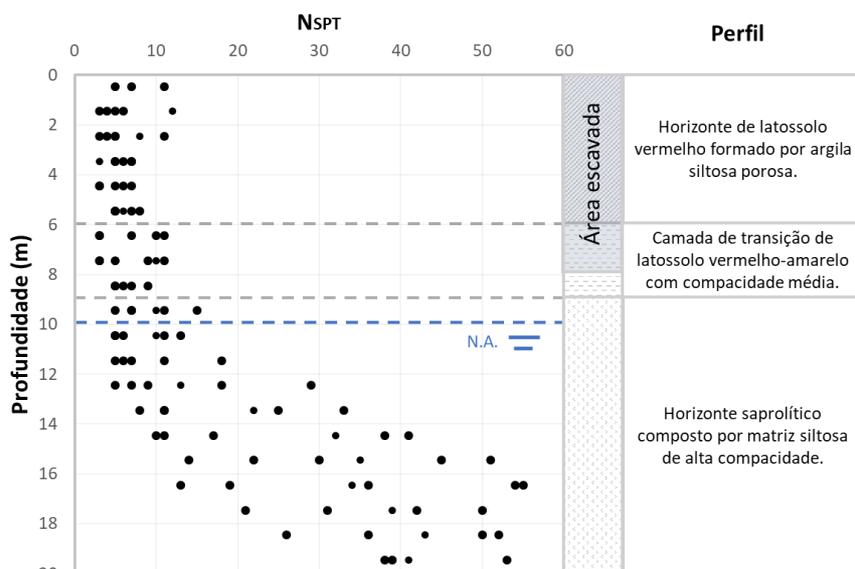


Figura 3. Perfil do solo (Carvalho, 2023).

Conhecida a extensão geológica da área em estudo, realizou-se uma investigação geotécnica mais detalhada por meio de ensaios laboratoriais. Em vista disto, foram retiradas amostras indeformadas antes do início das escavações nas cotas de 3 e 6 m de profundidade. Dessa forma, objetiva-se caracterizar o solo e observar a variabilidade dos parâmetros em diferentes profundidades. Logo, realizou-se a caracterização física do solo no intuito de determinar os índices físicos. Já para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ), foram executados ensaios do tipo Cisalhamento Direto com as amostras em condição inundada para as tensões normais de 10, 25, 50 e 100 kPa. Os índices físicos e parâmetros de resistência obtidos pelos ensaios são indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Índices físicos e parâmetros de resistência dos solos nas profundidades de 3 m e 6 m.

Profundidade da amostra (m)	3	6
w (%)	18,2	26,64
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	13,2	15,6
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	9,91	8,89
$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	11,02	11,26
$G_s$	2,82	2,75
$e$	2,07	2,04
$w_L$ (%)	43	44
$w_P$ (%)	31	37
IP (%)	12	7
$\phi$ (°)	30	27
$c$ (kPa)	15,7	22,6

w (teor de umidade);  $\gamma_{\text{sat}}$ ,  $\gamma_d$ ,  $\gamma_{\text{nat}}$  (pesos específico saturado, seco e natural);  
 $S_r$  (grau de saturação);  $G_s$  (densidade real dos grãos);  $e$  (índice de vazios);  
 $w_L$  (limite de liquidez);  $w_P$  (limite de plasticidade); IP (índice de plasticidade).

### 2.3 Monitoramento da obra

O monitoramento da obra foi realizado por meio da técnica de inclinometria, com o objetivo de acompanhar os perfis de deslocamentos horizontais provocados pelo processo construtivo e mudanças na condição do solo, no particular, variações do teor de umidade. Assim, em complemento, tendo em vista a proximidade do lençol freático da laje da garagem subterrânea, também foi realizado o monitoramento da variação do lençol freático, por meio de Medidores de Nível d'Água (MNA) e Piezômetros de Casagrande (PZc).

Na obra em estudo, a tubulação-guia do inclinômetro foi instalada dentro de uma estaca de 14 m de profundidade, cujas leituras foram programadas nas seguintes situações: (1) leitura de referência após a instalação do tubo; (2) leitura após a instalação da linha de ancoragens; (3) leitura após a etapa de escavação. Ressalta-se que como o inclinômetro foi instalado na etapa de execução das estacas, os deslocamentos decorrentes da escavação sobrejacente do talude inclinado não foram observados. Assim, as deformações monitoradas não levam em consideração àquelas acumuladas pelo alívio de tensões mobilizado pela escavação que antecedeu à instalação das estacas.

A fim de possibilitar a instalação dos tubos no interior da estaca, estes foram amarrados juntos à armadura e, então, prosseguiu-se com a concretagem normalmente. A Figura 4 ilustra o processo executivo da instalação do tubo guia e da realização da leitura por meio de torpedo dos deslocamentos em profundidade.

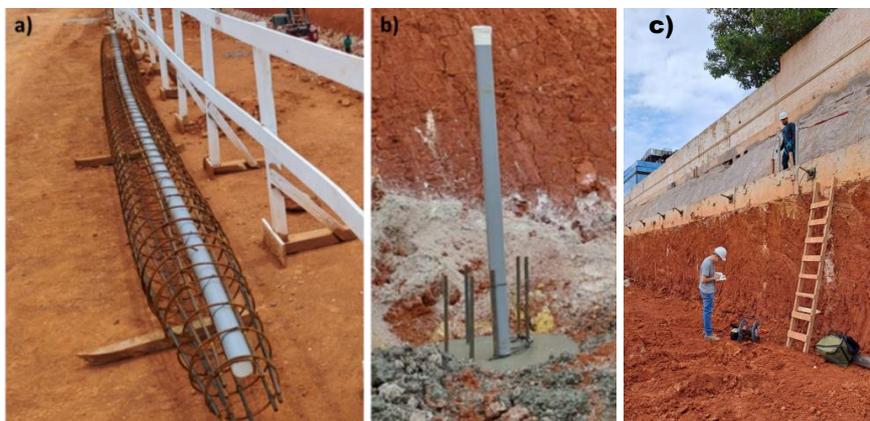


Figura 4. Inclinometria: a) Tubo-guia junto à armação, b) Estaca instrumentada e c) Execução das leituras.

Objetivando verificar variações dos níveis d'água e piezométrico foram implantadas ilhas de monitoramento do lençol freático, sendo cada uma composta por Medidor de Nível d'Água (MNA) e Piezômetros de Casagrande (PZc). Visando avaliar o fluxo da água subterrâneas, por ilha de monitoramento, os instrumentos foram instalados a 1 m de distância entre si (Figura 5). Por meio da comparação entre os níveis de água registrados no MNA e PZc, é possível verificar a ocorrência de subpressão. Foram implantadas 7 ilhas de monitoramento do lençol freático. Entretanto, para o presente artigo são apresentados e analisados somente os resultados encontrados na seção objeto das discussões.



Figura 5 – Ilha 03 de monitoramento do lençol freático, composta por MNA e PZc.

## 2.4 Análises Computacionais

As análises foram realizadas por meio do módulo Cortinas do *software* comercial Cypecad. O *software* utiliza uma análise não linear com comportamento elastoplástico, viabilizando o cálculo, verificação e dimensionamento de estruturas de contenções, com suporte à adição de elementos ativos e passivos. O cálculo dos empuxos é realizado mediante ao método de equilíbrio limite, utilizando a teoria de Coulomb. Já para calcular os deslocamentos da contenção, utiliza-se um modelo de molas discretas de Winkler. Conforme Clayton *et al.* (2013), os cálculos baseados nesse tipo de modelo são adequados quando se deseja conhecer deslocamentos, momentos ou cortantes apenas na face da parede de contenção, situação compatível com o

presente estudo. Caso necessário conhecer recalques superficiais ou outros movimentos do solo, deve-se utilizar recursos mais avançados, como método de elementos finitos.

Como a obra se encontra em execução, foi considerada a etapa da escavação referente à última leitura inclinométrica realizada, em que a profundidade da cortina se encontrava em 4,08 m. Tendo como base o perfil do solo, simplificou-se a geometria do problema em dois estratos: uma camada superior de latossolo vermelho e uma camada de saprólito abaixo da escavação. Os parâmetros geotécnicos foram inseridos conforme os dados dos ensaios supracitados, considerando para a camada superior os resultados da amostragem de 3 m e para a camada inferior os resultados da amostragem de 6 m. A Figura 6 ilustra a geometria obtida. Quanto ao módulo de reação horizontal, considerou-se os valores recomendados pelo próprio *software* com base nos tipos de solo, adotando-se uma constante de 10000 kN/m<sup>3</sup> para a camada superior e de 15000 kN/m<sup>3</sup> para a camada inferior.

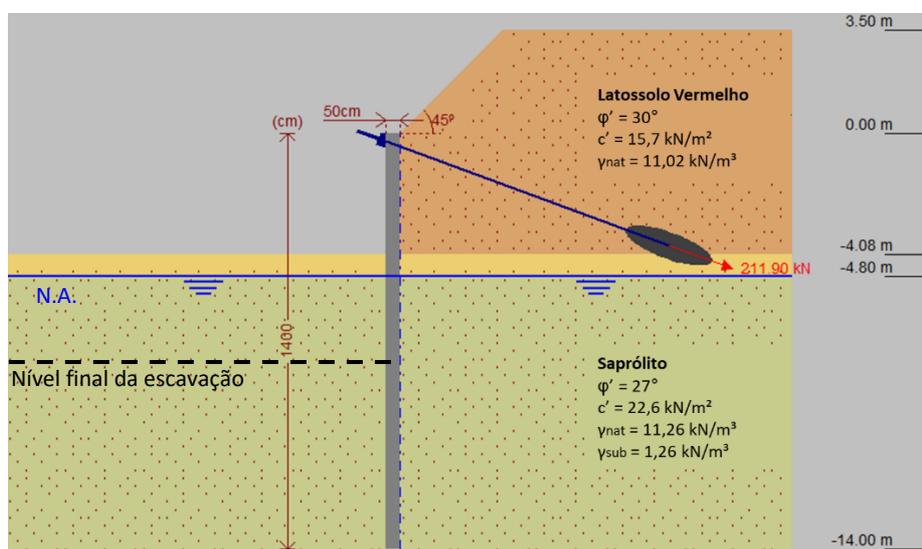


Figura 6. Geometria da seção considerada.

### 3 RESULTADOS

A Figura 7 mostra os resultados dos deslocamentos horizontais em profundidade de uma estaca, obtidos pelo monitoramento inclinométrico e cálculos das deformações pelo modelo de molas discretas de Winkler. Por sua vez, a Figura 8 ilustra as variações dos níveis d'água e piezométricos registrados na mesma seção do monitoramento inclinométrico.

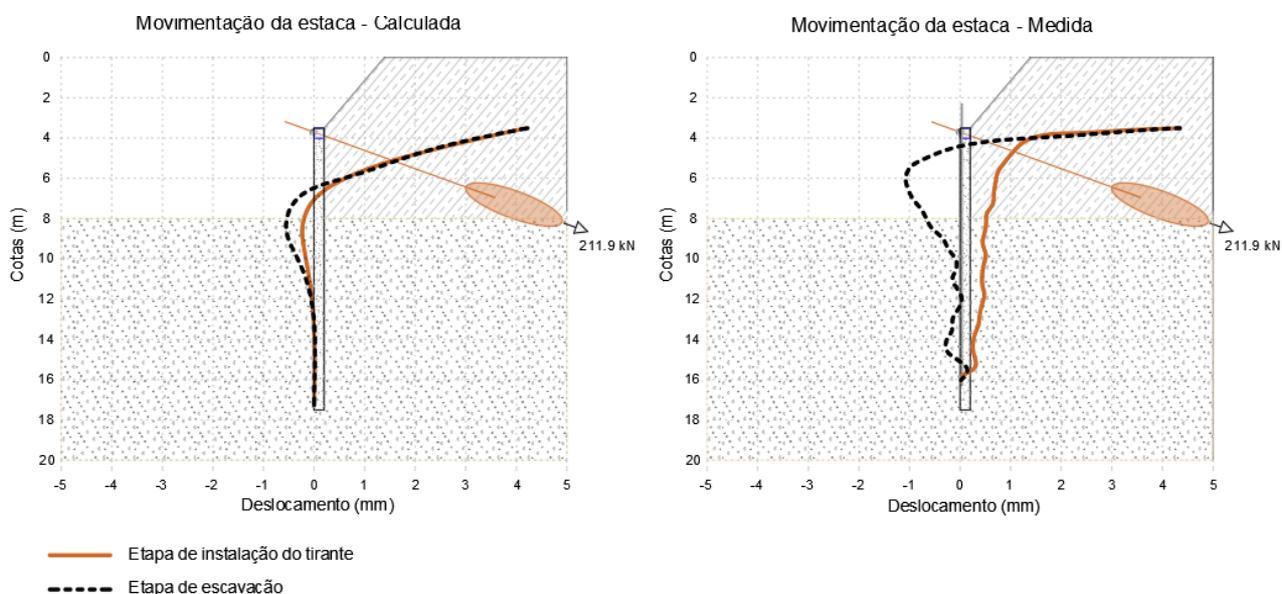


Figura 7. Resultados das movimentações calculadas e medidas.

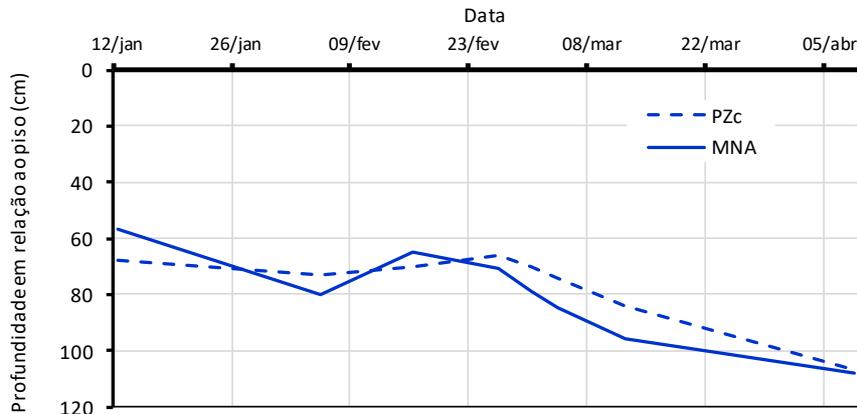


Figura 8 – Monitoramento dos níveis d'água e piezométrico.

O nível d'água observado sofreu elevação durante a execução da obra, variando entre 60 cm e 110 cm de profundidade em relação ao piso acabado da garagem. Assim, nas fichas das estacas o solo encontra-se saturado, com fluxo de água em direção paralela ao lado de maior dimensão da obra. Ainda que de magnitude baixa, observa-se a existência de subpressão, mas em profundidade afastada do piso.

O monitoramento dos deslocamentos horizontais em profundidade indica que o solo apresenta um comportamento complexo, dependente da geometria e processo construtivo adotados para a execução da estrutura de contenção. Como a carga nas ancoragens são aplicadas antes da escavação do terreno, no monitoramento observou-se inicialmente a compressão do terreno, mobilizando o estado tensões na condição passiva na interface estaca/solo. Salienta-se que, apesar de não ser comum, se a escavação fosse realizada antes do atirantamento, ocorreria a mobilização de um estado ativo, resultante dos deslocamentos na direção da descompressão do solo. Em análises por métodos de equilíbrio limite envolvendo escavação, em função do alívio de tensão, considera-se a condição de um estado ativo no solo, que consiste na configuração final da obra.

Como a viga de coroamento se localiza no topo das estacas, o confinamento no solo é mínimo. Consequentemente, há um deslocamento nesse ponto para o interior do maciço, havendo uma redução expressiva do deslocamento a uma curta profundidade da estaca, coincidente com a altura da viga de coroamento. Com o avanço da escavação, a tensão confinante abaixo da viga de coroamento é anulada, favorecendo um movimento de rotação no maciço impedido pela ficha da estaca, que causa uma flexão na estaca na direção da frente de escavação.

Mesmo com a limitação do modelo considerado para a análise, verifica-se uma consistência de comportamento. Em termos estruturais pode-se fazer uma analogia a uma viga em balanço com rigidez ponderada entre o concreto da estaca e solo, este último representado pelo modelo de molas discretas de Winkler. Verifica-se a deformação no sentido do carregamento, para o interior do maciço. Após a escavação, na cota do piso, por meio do confinamento do solo envolvendo a estaca, tem-se uma viga biapoiada, com apoios com diferentes condições de liberdade e rigidez. A pressão horizontal do solo contido e a sobrecarga do talude produzem empuxo na direção contrária à carga da ancoragem, gerando a deformada observada, tanto nos resultados do monitoramento, quanto da modelagem. A diferença entre os resultados do monitoramento e dos cálculos pode ser oriunda das constantes de mola consideradas, que podem ser ajustadas para se aproximar da medida de campo. Entretanto, a forma do perfil de deslocamentos horizontais em profundidade é coerente com o observado. Ademais, a definição do perfil de deformação da estaca pode permitir determinar o momento fletor e conseqüentemente a armação adequada para a estaca.

Em relação aos resultados, o perfil inclinométrico mostra que a profundidade em que o deslocamento se anula é praticamente a mesma verificada nos cálculos. A posição do deslocamento nulo indica que a ficha é suficiente para ser considerada um apoio fixo, no nível de escavação em que a obra se encontra. Entretanto, como a profundidade da escavação será maior, o ponto de rotação da estaca descenderá e o tipo de apoio da ficha pode mudar.

## 4 CONCLUSÕES

A correta previsão das movimentações que ocorrem durante uma obra de escavação é fundamental para minimizar riscos, aumentar a compreensão sobre o comportamento da obra e também para dimensionar corretamente a estrutura, onde as deformadas podem permitir encontrar os momentos fletores e, conseqüentemente, a armação adequada. Os resultados mostraram que o comportamento não é totalmente previsível quando se associa elementos estruturais com funções distintas, estacas e ancoragens. O estado de tensão-deformação pode variar conforme o processo executivo, até para uma mesma solução. Nos cálculos tradicionais de cortina de estacas considera-se a condição de estado ativo no solo. Entretanto, como observado, a depender da geometria e do processo executivo da cortina de estacas com ancoragens, tal condição pode não ser mobilizada. Para o caso apresentado, ainda que a elaboração de modelagens pelo método de elemento finitos seja o ideal, a aplicação do modelo de molas discretas de Winkler apresentou resultados razoáveis, quando comparados com aqueles observados no monitoramento, considerando-se que não foi realizada calibração dos parâmetros. Mesmo sem ajuste nas constantes de molas sugeridas na literatura para o tipo de solo, a deformada da estaca e ordem de grandeza dos deslocamentos foram próximos. Naturalmente levando-se em consideração à particularidade do solo, onde parte da estrutura foi implantada em um horizonte de solo com arranjo estrutural bimodal e colapsível, é importante que as análises e os parâmetros do solo, bem como, modelo constitutivo, no caso de modelagens numéricas, estejam adequados com o perfil do solo em questão.

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), EMBRE Empresa Brasileira de Engenharia e Fundações Ltda e Supera Engenharia Ltda.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araki, M.S. (1997) *Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121 p.
- Blanco, S.B. (1995) *Aspectos de geologia de engenharia da escavação do metrô de Brasília*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92 p.
- Clayton, C.R.I., Woods, R.I., Bond, A.J., Milititsky, J. (2013) *Earth Pressure and Earth-Retaining Structures*, 3rd. ed., CRC Press, 588 p.
- Carvalho, R.L. (2023) *Análise da Estabilidade de Escavação em Solo Poroso do Distrito Federal*. Seminário de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, 16 p.
- Dunnicliff, J. (1993) *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 608 p.
- Falconi, F.; Corrêa, C.N.; ORLANDO, C.; Schimdt, C.; Antunes, W. R.; Albuquerque, P. J.; Hachich, W.; Niyama, S. (2019) *Fundações: teoria e prática*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 804 p.
- Gerscovich, D; Danziger, B.D; Saramago, R. (2016) *Contenções: Teoria e Aplicação em Obras*. São Paulo: Oficina de Textos, 320 p.
- Guimarães, R.C. (2002) *Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.
- Paik, K.H., Salgado, R. (2003) Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects. *Géotechnique*, 53(7), p. 643–653.
- Santos, K.R.M. (2016) *Contenções em Cortinas com Ficha Descontínua - Um Caso de Obra Contemplando Instrumentação, Modelagem Numérica e Métodos Usuais de Projeto*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 216 p.