



Monitoramento e Modelagem de Estabilização de Escavação em Solo Colapsível por meio de Estacas Espaçadas

Luis David Agudelo Torres

Mestrando, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, davidaguto98@gmail.com

Rafael Cerqueira Silva

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

Emerson Batista Silva

Doutorando, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, emersonbs.engcivil@gmail.com

Renato Salles Cortopassi

Engenheiro, Kali Engenharia, Brasília, Brasil, renato@kaliengenharia.com.br

Carlos Medeiros Silva

Engenheiro, Embre Engenharia, Brasília, Brasil, carlos@embre.com.br

RESUMO: Escavações profundas estabilizadas por estacas espaçadas comumente requerem ancoragens para limitar deslocamentos, especialmente em áreas urbanas com edificações próximas. Este trabalho apresenta uma solução alternativa, sem o uso de ancoragens, com estacas dispostas em dois alinhamentos e níveis distintos, aplicada em solo colapsível da região do Distrito Federal (DF), o que a torna ainda mais relevante. Elaboraram-se análises de dados de monitoramento e modelagens numéricas utilizando o modelo constitutivo *Hardening Soil* (HS), com parâmetros definidos a partir de um banco de dados representativo de ensaios laboratoriais na argila porosa local. O desempenho da estrutura foi avaliado por meio de inclinometria realizada durante a escavação. A modelagem numérica foi refinada com base nos perfis de deslocamentos horizontais obtidos em campo, permitindo representar com boa aproximação o comportamento observado. A abordagem adotada demonstrou-se eficaz para simular o desempenho da obra, validando o modelo constitutivo e os parâmetros empregados.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas espaçadas, Escavações, Solo colapsível, Monitoramento, Modelagem numérica.

ABSTRACT: Deep excavations stabilized by spaced piles commonly require anchors to limit displacements, especially in urban areas with nearby structures. This study presents an alternative solution, without the use of anchors, involving piles arranged in two staggered rows at different depths. The solution was applied in collapsible soil from the Federal District (DF) region, which adds further relevance to the study. Monitoring data and numerical modeling were carried out using the Hardening Soil (HS) constitutive model, with parameters defined based on a representative database of laboratory tests on the local porous clay. The performance of the retaining system was evaluated through inclinometer measurements taken during excavation. The numerical model was refined using the horizontal displacement profiles measured in the field, allowing for a good approximation of the observed behavior. The adopted approach proved effective in simulating the performance of the structure, validating both the constitutive model and the parameters employed.

KEYWORDS: Spaced piles; Excavations; Collapsible soils; Monitoring; Numerical modeling.

1. INTRODUÇÃO

Ambientes urbanos em constante expansão exigem, cada vez mais, o aproveitamento do espaço subterrâneo como estratégia de otimização do uso do solo, o que intensifica o interesse pela projeção e execução de estruturas de contenção. Nesses contextos, devido à proximidade com edificações vizinhas e às profundidades escavadas, o controle de deformações torna-se um requisito essencial, especialmente



2 0 2 5

considerando que tais condições frequentemente impõem restrições à instalação de ancoragens ou sistemas de escoramento. Diante desse cenário, estruturas de contenção com estacas em fila dupla têm se consolidado como uma solução eficiente e tecnicamente viável (Yang *et al.*, 2023).

Embora diversos estudos recentes tenham investigado contenções com estacas em fila dupla, não há consenso na literatura quanto à relação ideal entre espaçamento e diâmetro. Sun *et al.* (2012) afirma que o controle eficiente das deformações depende da combinação entre espaçamento entre fileiras, diâmetro e separação entre estacas, aliado a um processo executivo adequado. Peng e Liu. (2018) sugerem que, para diâmetros entre 0,60 m e 1,20 m, o espaçamento razoável varia de 3 a 4 vezes o diâmetro da estaca. Por sua vez, Rong (2017) apontam que o deslocamento horizontal é eficientemente controlado quando o espaçamento está entre 4 e 5 vezes o diâmetro, enquanto Dong *et al.* (2022) concluem, sob critérios técnicos e econômicos, que o espaçamento ótimo se situa entre 1,6 e 2,0 vezes o diâmetro. Essas divergências reforçam a importância de avaliar essa solução no contexto do solo poroso de Brasília, cuja resposta geotécnica pode diferir significativamente daquelas encontradas em outros locais.

No contexto local, há registro de apenas uma obra com essa configuração de contenção, sem que haja informações detalhadas sobre o projeto e obra. O presente estudo busca preencher essa lacuna por meio da análise de uma escavação profunda com contenção em estacas justapostas em dupla fileira, executada em solo poroso de Brasília. A obra foi monitorada com inclinômetros, e os dados obtidos permitiram avaliar seu desempenho utilizando modelos numéricos avançados, baseados no método dos elementos finitos, com a adoção de um modelo constitutivo não linear (*Hardening Soil*) e o estado tridimensional de tensões e deformações, utilizando como referência os parâmetros obtidos por Rebolledo *et al.* (2019a).

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho desse tipo de solução em solos porosos de Brasília, conhecidos por apresentar baixa densidade, estrutura metaestável e susceptibilidade ao colapso (Lollo, 2008). Considerando a necessidade de modelagem tridimensional e os custos computacionais associados, propõe-se a adoção de uma hipótese simplificadora baseada em uma placa (*plate*) equivalente, buscando representar adequadamente o comportamento do sistema. A boa reprodução dos deslocamentos medidos em campo não apenas valida essa abordagem como também contribui para o fortalecimento do banco de dados local, permitindo avanços futuros em diretrizes de projeto e otimização geotécnica para contenções similares.

2. CARACTERÍSTICAS DO LOCAL

A obra em questão está localizada no Setor de Indústria e Abastecimento (SIA), uma das regiões administrativas de Brasília, no Distrito Federal. O Planalto Central, onde se insere o Distrito Federal, apresenta uma geomorfologia singular, resultante das condições climáticas e geológicas da região. A paisagem predominante é composta por chapadas, com relevo residual e aplainado, caracterizado por topografia plana a levemente ondulada. O solo superficial é constituído, em sua maioria, por lateritas e latossolos, enquanto as rochas subjacentes, como ardósias e metarrítmitos, encontram-se frequentemente muito intemperizadas nas camadas superiores (Blanco, 1995).

O tipo de solo predominante na região é o latossolo vermelho-escuro, originado por intenso intemperismo químico, associado a processos de lixiviação e laterização. Este solo é amplamente conhecido na engenharia geotécnica como a argila porosa colapsável de Brasília. Suas características e espessura variam de acordo com a topografia, a cobertura vegetal, a rocha de origem e a estrutura geológica local (Paixão e Camapum de Carvalho, 1994).

Em termos geotécnicos, as camadas superficiais apresentam alta porosidade e uma estrutura metaestável, com elevados índices de vazios e, portanto, baixa densidade. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (1993), essa argila porosa é composta por argilas, siltes e areias em proporções variáveis, dependendo do domínio geológico. Os solos da região são reconhecidamente colapsíveis, devido à presença de uma estrutura composta por micro e macroporos. Destacam-se também por sua baixa resistência à penetração, com valores de NSPT entre 1 e 6 golpes, e por sua alta permeabilidade, variando entre 10^{-3} e 10^{-4} m/s, valores comparáveis aos de solos granulares finos (Paixão e Camapum de Carvalho, 1994).

A investigação geotécnica da obra foi realizada por meio de três sondagens a percussão, com profundidades variando entre 38 m e 43m. Os resultados indicaram a presença de um subsolo formado predominantemente por solos argilosos, com variação de consistência e índices de vazios ao longo do perfil. As camadas superficiais são compostas por uma camada de aterro pouco espessa, sobrejacente a argilas siltosas

vermelhas, geralmente muito moles a moles nos primeiros metros. Esses estratos iniciais apresentam N_{SPT} entre 0 e 5, compatíveis com os valores típicos da argila porosa colapsável do Distrito Federal.

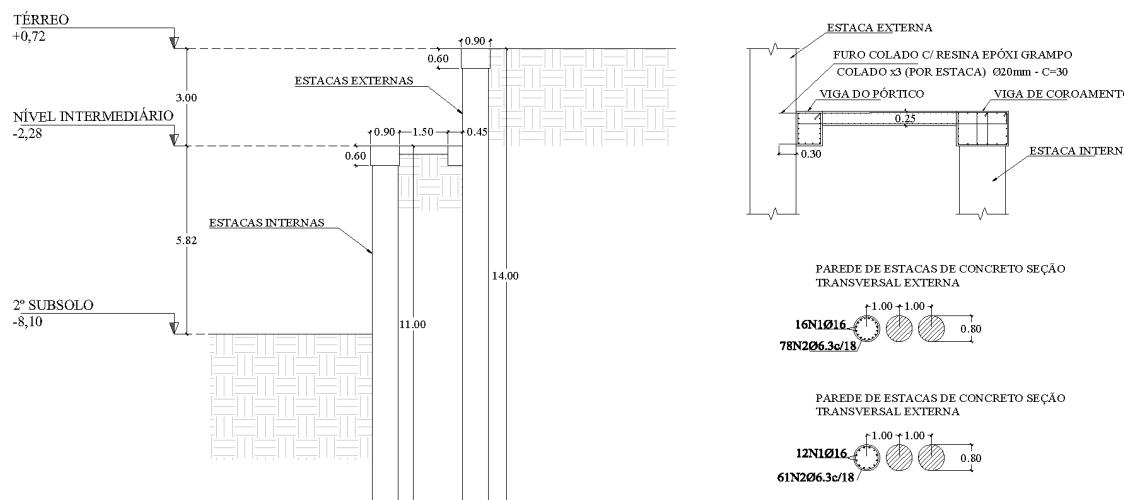
Com o aumento da profundidade, verifica-se uma transição gradual para argilas siltosas e arenosas, de rigidez média a elevada, ainda com coloração vermelha predominante, com ocorrência pontual de variações de cor e presença de pedregulhos. Os valores de N_{SPT} aumentam progressivamente, superando 30 golpes a partir de cerca de 30 m de profundidade, indicando a presença de solos de consistência dura.

Em sondagens realizadas na região do DF, é comum a presença de nível d'água (N.A.) em profundidades variadas. No entanto, ao longo de todo o perfil investigado neste projeto, não foi identificado o N.A. (março de 2023), caracterizando a presença de solos não saturados, o que é consistente com as condições típicas das camadas superiores na região.

3. DESCRIÇÃO GERAL DA ESCAVAÇÃO

A escavação retangular, com área aproximada de 3.700 m² e profundidade total de 8,8 m a partir da superfície, foi estabilizada por um sistema de contenção composto por estacas de concreto armado, escavadas e concretadas no local, dispostas em fila dupla e espaçadas a cada 1,0 m entre eixos. As estacas, com 0,80 m de diâmetro, possuem comprimento de 14 m nas estacas externas e entre 11 m e 14 m nas internas. O sistema foi capaz de garantir a estabilidade global da escavação com eficiência estrutural, exigindo apenas um número reduzido de ancoragens, aplicados exclusivamente em trechos específicos onde havia exigências particulares. A configuração geral do sistema pode ser visualizada na Figura 1. As estacas internas e externas são interligadas por um sistema composto por viga de pórtico, laje de ligação e viga de coroamento, conforme mostrado na Figura 3.

A obra foi monitorada com um total de 13 inclinômetros distribuídos ao longo de todo o perímetro da contenção, instalados no interior das estacas antes da concretagem. No entanto, apenas os dois inclinômetros localizados no costado norte (Figura 4) possuem leituras de referência (leitura zero), uma vez que esta foi a única região da escavação onde os equipamentos puderam ser instalados antes do início das escavações. Por essa razão, somente esses dois instrumentos foram considerados como base para a calibração e validação das modelagens numéricas apresentadas neste trabalho.



4. MODELAGEM NUMÉRICA

Para o sistema de contenção apresentado, existem dois fatores que exigem a adoção de uma análise com estado tridimensional de tensões e deformações. O primeiro refere-se à redistribuição dos esforços no maciço para regiões mais rígidas, causada pela rotação das direções principais de tensão, fenômeno conhecido como

2025

efeito arco (Paik & Salgado, 2003; Liang & Yamin, 2010; Pardo & Saez, 2014; George & Dasaka, 2021), como demonstrado com modelagem numérica por Hong *et al.* (2003) e Abraham (2007). O segundo fator é a própria assimetria geométrica da obra, que impede a adoção segura da hipótese de estado plano de deformações.

No primeiro caso, conforme será discutido adiante, é possível empregar uma modelagem simplificada com uso de elementos tipo placa e restrições adequadas, desde que se reconheçam as limitações impostas pelo efeito arco. Entretanto, no segundo caso, a natureza tridimensional do problema torna-se inevitável, especialmente considerando que, embora a zona de interesse principal seja o costado norte (só estacas justapostas), a presença de ancoragens à direita, juntas estruturais e o sistema de ligação entre estacas impõe uma influência espacial significativa sobre o comportamento da contenção.

Devido à ausência de ensaios laboratoriais específicos para o local da obra, os parâmetros utilizados na modelagem numérica foram obtidos a partir de dados da literatura referentes à argila porosa de Brasília. Esses dados foram coletados em pesquisas realizadas no Campo Experimental da Geotecnica da Universidade de Brasília (CEGUnB), que assim como o local de estudo está sobre o latossolo vermelho de Brasília (IPEDF, 2023). A definição dos horizontes e respectivos parâmetros geotécnicos foi realizada por meio da comparação entre os resultados das três sondagens executadas na obra e o perfil de solo apresentado por Rebolledo *et al.* (2019a), conforme ilustrado na Figura 2. A partir dessa correlação, adotou-se o modelo constitutivo *Hardening Soil* (HS), amplamente utilizado em estudos geotécnicos realizados no Distrito Federal (Rebolledo *et al.*, 2019a; 2019b; 2022; Silva *et al.*, 2022), o que reforça a adequação de seu uso neste trabalho.

Com base nos resultados das sondagens, observou-se que até aproximadamente 7 metros de profundidade os valores de N_{SPT} variaram entre 2 e 4, caracterizando uma camada de baixa resistência. Entre 7 m e 26 m, os valores oscilaram entre 5 e 9, com predomínio entre 5 e 7, indicando uma resistência intermediária. A partir de 26 m de profundidade, os valores de N_{SPT} superam 10, alcançando níveis elevados, com exceção de alguns pontos isolados com resistência inferior. Dessa forma, sem modificar os parâmetros definidos por Rebolledo *et al.* (2019a), apenas reinterpretando a correspondência entre os dados de campo e o modelo proposto, foram adotadas três camadas geotécnicas para fins de modelagem numérica: até 7,0 m de profundidade, foi utilizada a Camada 3; entre 7,0 m e 26,0 m, a Camada 5; e a partir dos 26,0 m, a Camada 6.

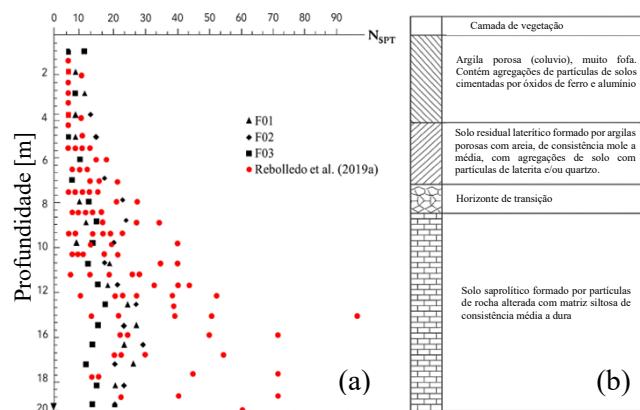


Figura 2. Perfil de N_{SPT} em profundidade, (a) local da obra e (b) CEGUnB (adaptado de Rebolledo *et al.*, 2019a).

A modelagem numérica foi conduzida em etapas progressivas, utilizando o software PLAXIS 3D (versão 2023), com o objetivo de representar com fidelidade o comportamento do sistema de contenção e, ao mesmo tempo, permitir simplificações compatíveis com análises paramétricas e simulações em maior escala. Os elementos estruturais foram modelados utilizando o comportamento linear elástico.

Inicialmente, foi desenvolvido um modelo tridimensional com elementos de volume, representando de forma detalhada o trecho correspondente ao costado norte. Esse modelo considerou as duas estacas (interna e externa), as vigas de coroamento e o sistema de ligação entre elas, onde a ligação entre a laje e as estacas foi modelada com elementos tipo viga (*beam*) mantendo uma representação realista das barras de aço coladas com epoxi.



Em seguida, foi criado um modelo equivalente com elementos tipo placa (*plate*), no qual as estacas foram substituídas por uma cortina contínua com propriedades médias equivalentes, conforme ilustrado na Figura 3. Esse modelo foi calibrado com base no ajuste dos deslocamentos horizontais e esforços internos observados no modelo de volume, de modo a garantir uma resposta mecânica coerente nas zonas críticas.

Para garantir compatibilidade entre os modelos, foram mantidos os parâmetros de deformabilidade (E e v) do modelo linear elástico, e calculadas propriedades geométricas equivalentes (Tabela 1), como a espessura da placa e seu peso específico. A espessura equivalente da estaca foi determinada a partir da condição de manter o momento de inércia de uma seção circular, transformando-o numa seção retangular. Essa equivalência é expressa pela Equação 1, em que I_c representa o momento de inércia da seção circular, b é a largura da seção (igual ao diâmetro da estaca), e d é a espessura equivalente da *placa*. A validade dessa aproximação será discutida adiante.

$$d = \sqrt[3]{\frac{12I_c}{b}} \quad (1)$$

Para o sistema de ligação viga de pórtico-laje-viga de coroamento, a rigidez foi calculada a partir do Teorema de Steiner, com base na composição de três seções retangulares, como mostrado na Equação 2. Nela, I representa o momento de inércia total, $I_{i,cm}$ é o momento de inércia de cada componente em relação ao seu próprio centroide, A_i é a área da seção, e d_i é a distância entre o centroide de cada elemento e o eixo neutro global do conjunto.

$$I = \sum_{i=1}^3 (I_{i,cm} + A_i \cdot d_i^2) \quad (2)$$

No caso da conexão flexível entre a viga de pórtico e à estaca externa, foi adotada uma espessura equivalente igual a duas vezes (dois furos por grampo) o diâmetro das barras de aço que representam os elementos colados com resina epóxi. Essa abordagem visa simular uma ligação que permite rotação (não rígida), mas ainda assim controla os deslocamentos horizontais.

Além disso, na cabeça da estaca externa foi simulada a viga de coroamento por meio de dois elementos tipo *placa* perpendiculares (a 90° entre si), cada um com espessura equivalente à direção representada, de modo a reproduzir com maior fidelidade a rigidez local e, por consequência, o perfil de deslocamentos ao longo da profundidade da estaca.

Como mencionado anteriormente, foi também calibrado o peso específico dos elementos tipo *placa* com o objetivo de reduzir a influência das forças de corpo (peso próprio) nas análises de elementos finitos. Para isso, buscou-se garantir que a placa equivalente apresentasse o mesmo peso do sistema real, originalmente representado por elementos de volume.

O peso específico equivalente γ_{eq} foi calculado a partir da razão entre o peso total do conjunto de estacas e o volume do elemento *placa* correspondente. Esse cálculo considerou o número de estacas n incluídas em uma faixa de largura b , o comprimento total das estacas L , o raio das estacas r , o peso específico do concreto γ_c e do solo γ_s , bem como a espessura equivalente da placa d , e a altura da viga de coroamento h , que foi descontada da altura efetiva da estaca. A expressão utilizada mostra-se na Equação 3.

$$\gamma_{eq} = \frac{P_p}{V_e} = \frac{(L-h) \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (\gamma_c - \gamma_s)}{b \cdot L \cdot d} \quad (3)$$

Observa-se que o valor obtido depende da largura de análise b , que representa a faixa horizontal abrangida pela modelagem com *placas*. No entanto, esse valor apresenta comportamento assintótico, estabilizando-se a partir de determinada largura. Assim, adota-se como referência o valor de γ_{eq} correspondente à região onde a curva se estabiliza.

Na obra analisada, devido à presença de duas camadas geotécnicas distintas no subsolo, foi necessário calcular valores separados de γ_{eq} para cada uma das camadas, respeitando a estratificação do terreno e a variação das propriedades do solo com a profundidade.

Já para o sistema de ligação entre as estacas, composto pela viga de pórtico, a laje e a viga de coroamento, a influência da largura da faixa de análise é desprezível. Assim, o peso específico equivalente foi obtido simplesmente como o quociente entre o peso total da estrutura e o volume da *placa* correspondente. O peso da viga de coroamento considerado só num das duas *placas* ortogonais no topo da estaca externa.

No modelo com elementos de volume, foram inicialmente consideradas interfaces em toda a superfície de contato entre o solo e a estrutura de concreto, representadas pela coloração verde escura na Figura 3. Essas

interfaces visavam reproduzir com maior realismo a interação solo-estrutura, permitindo o deslizamento relativo e a possível separação em regiões críticas.

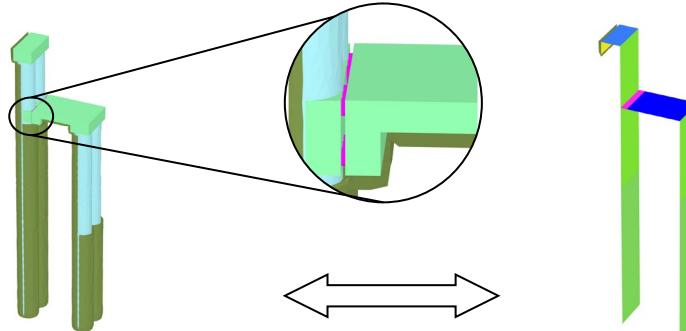


Figura 3. Transformação do sistema de elementos de volume a elementos tipo placa.

No entanto, a partir dos resultados das análises numéricas, observou-se que a separação efetiva entre o solo e a estrutura ocorria apenas na face anterior da viga de coroamento, onde se concentram os esforços horizontais associados ao empuxo de terra. Nas demais regiões, o contato solo-estrutura permaneceu aderente, sem indicar abertura significativa.

Diante disso, no modelo com *placas* equivalentes, optou-se por incluir interfaces apenas nessa zona frontal da viga de coroamento, onde sua influência sobre os deslocamentos horizontais é mais pronunciada. As demais superfícies da estrutura foram modeladas em contato direto com o solo, o que se mostrou adequado ao comportamento observado.

Essa decisão é tecnicamente justificável na modelagem numérica, uma vez que o sistema de contenção não está submetido a carregamentos nem a condições que favoreçam o rompimento da interface por tração, como é comum por exemplo fundações profundas em solos moles. Assim, o uso pontual de interfaces reflete com fidelidade o comportamento real da obra, além de contribuir para a otimização do modelo numérico sem prejuízo à precisão dos resultados.

Por fim, o modelo com *placas* equivalentes foi aplicado para representar a totalidade da obra, abrangendo o trecho correspondente ao costado norte e os elementos estruturais adjacentes, como ancoragens, juntas estruturais e o sistema de ligação entre estacas. Essa abordagem permitiu capturar os efeitos tridimensionais associados à geometria da contenção, mantendo um custo computacional reduzido e níveis satisfatórios de confiabilidade.

As juntas estruturais foram modeladas como elementos tipo *placa* com largura mínima suficiente para representar fisicamente a descontinuidade, evitando exageros que pudesse gerar instabilidades numéricas. Foram atribuídos a esses elementos uma espessura reduzida e um módulo de elasticidade baixo, conforme apresentado na Tabela 1, de modo a simular adequadamente a perda de rigidez nessas regiões sem comprometer a estabilidade do modelo.

Já o efeito das edificações vizinhas sobre a escavação foi representado por meio de cargas de superfície uniformes de 10 kN/m², aplicadas nas regiões correspondentes, conforme ilustrado na Figura 4. Essa simplificação visa reproduzir as sobrecargas indiretas transmitidas pelas estruturas existentes, garantindo que sua influência global no comportamento da escavação seja considerada no modelo.

Tabela 1. Propriedades equivalentes do modelo simplificado.

Elemento	Modelo constitutivo	E [kN/m ²]	v	d [m]	γ_{eq} [kN/m ³]
Estaca camada 03 (Placa)	Elastico linear	$25,2 \cdot 10^6$	0,15	0,67	6,94
Estaca camada 05 (Placa)	Elastico linear	$25,2 \cdot 10^6$	0,15	0,67	5,50
Laje (Placa)	Elastico linear	$25,2 \cdot 10^6$	0,15	0,67	2,48
Viga de coroamento vertical (Placa)	Elastico linear	$25,2 \cdot 10^6$	0,15	0,60	0,00
Viga de coroamento horizontal (Placa)	Elastico linear	$25,2 \cdot 10^6$	0,15	0,90	10,10
Grampo (Beam)	Elastico linear	$20,0 \cdot 10^6$	0,15	0,04	0,00
Juntas (Placa)	Elastico linear	$1,0 \cdot 10^2$	0,15	0,05	0,00

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 5a e 5b são apresentados os deslocamentos horizontais obtidos nos modelos com elementos de volume e com elementos tipo *placa*. Observa-se um ajuste satisfatório entre as respostas numéricas dos dois modelos, com diferenças inferiores a 2 mm ao longo da profundidade nas duas estacas analisadas. O modelo com *placa* apresentou deslocamento ligeiramente menor na cabeça da estaca, o que pode ser atribuído ao aumento relativo da rigidez na zona de conexão, em comparação ao modelo 3D com estacas discretas.

A partir da configuração da contenção no costado norte, foi conduzida uma análise paramétrica com elementos de volume, variando a relação entre o espaçamento e o diâmetro das estacas (S/D). O diâmetro das estacas foi mantido fixo em 0,8 m, enquanto o espaçamento foi ajustado de forma incremental, desde o valor original S/D = 1,25 até S/D = 2,00. Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 6. A variação da razão entre espaçamento e diâmetro das estacas (S/D), permitiu observar numericamente o efeito de arqueamento, fenômeno que contribui para a estabilidade do solo entre os elementos estruturais mesmo na ausência de face contínua. Para valores de S/D até 1,5, os deslocamentos horizontais ao longo da profundidade apresentaram descontinuidades desprezíveis entre os pontos localizados na estaca e entre estacas. Esse comportamento evidencia uma redistribuição eficiente de tensões no interior do maciço, resultando em rigidez global mais eficiente. No entanto, a partir de S/D > 1,5, identificou-se uma redução progressiva do efeito de arqueamento, com deslocamentos horizontais distintos no centro do vão, indicando reduções do confinamento e da rigidez global do sistema. Esses resultados reforçam a existência de um limite crítico para o espaçamento entre estacas, acima do qual o solo deixa de se comportar como parte integrante da contenção.

Essa análise permite validar a hipótese de modelagem da contenção com uma *placa* contínua equivalente, no caso específico da obra, cujo espaçamento corresponde a S/D = 1,25. Os resultados sugerem que, em projetos futuros, esse tipo de abordagem pode ser empregado para otimizar o espaçamento entre estacas em sistemas de contenção, contribuindo para soluções mais econômicas e eficientes do ponto de vista geotécnico. Além disso, a adoção da placa equivalente permite reduzir significativamente o custo computacional, sem comprometer a representatividade do modelo numérico.

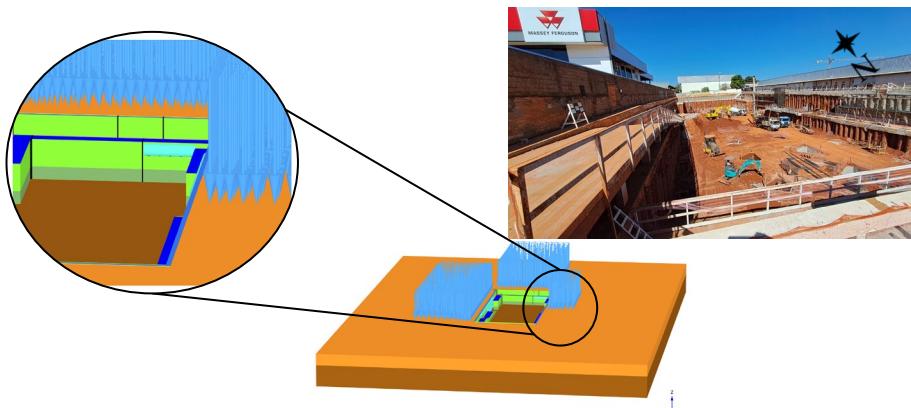


Figura 4. Vista panorâmica geral da obra e modelo 3D considerado.

Com a modelagem tridimensional da obra completa, foi obtido o perfil de deslocamentos horizontais das estacas, possibilitando a comparação direta com os dados medidos em campo pelos inclinômetros. No caso da estaca externa, observou-se um ajuste bastante próximo, com pequenas diferenças localizadas na transição entre as camadas geotécnicas. Essas diferenças podem estar associadas à variabilidade dos parâmetros do modelo constitutivo, refletindo a heterogeneidade natural do solo, ou ainda às limitações do próprio modelo *Hardening Soil* em capturar plenamente certos comportamentos locais.

Para a estaca interna, o modelo foi capaz de reproduzir o comportamento geral da curva de deslocamentos ao longo da profundidade (Figura 5c e 5d), inclusive as concavidades características do perfil. No entanto, na região da cabeça da estaca, foi observada uma diferença de aproximadamente 17%, que pode ser atribuída à rigidez relativa da conexão entre a laje e à estaca, já mencionada em seções anteriores.

Cabe destacar que os inclinômetros medem apenas deslocamentos relativos ao longo do fuste da estaca, e não o deslocamento absoluto do sistema. Por essa razão, para permitir uma comparação compatível com os dados de campo, os resultados obtidos nas simulações numéricas foram ajustados por meio da subtração do deslocamento horizontal na base das estacas, considerando esse ponto como referência nula.

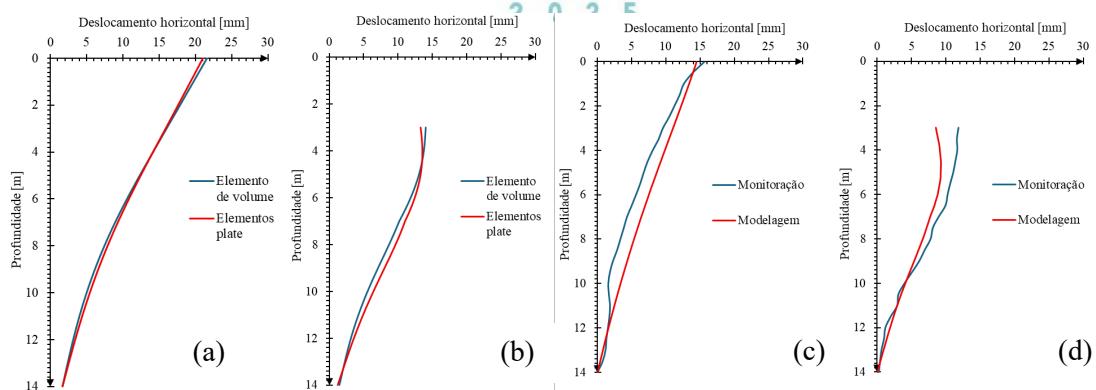


Figura 5. Comparação do perfil de deslocamento obtido nas modelações numéricas com elementos volume e placa (a) Estaca externa (b) Estaca interna. Monitoração e modelagem (c) Estaca externa (d) estaca interna.

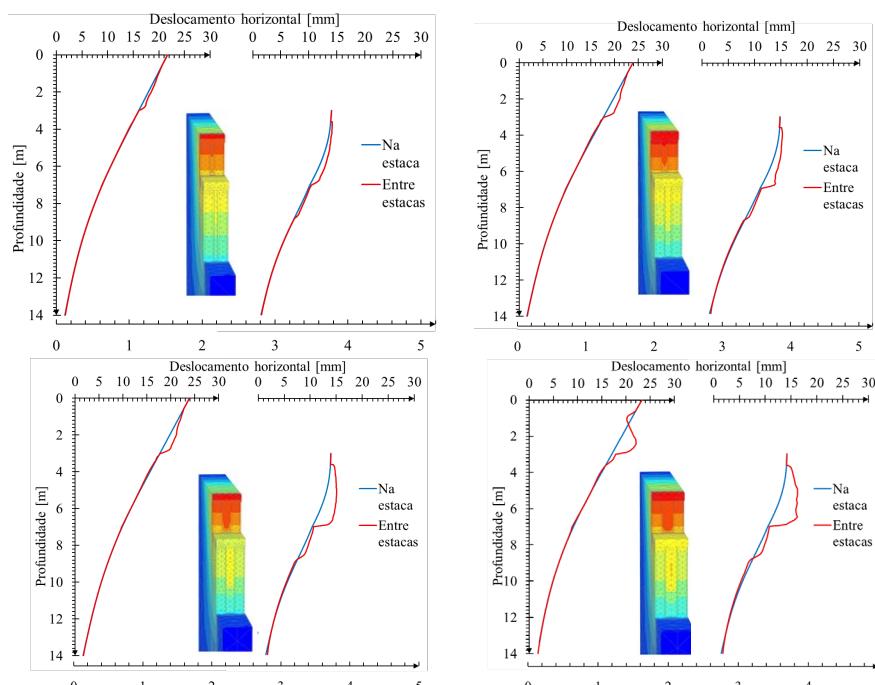


Figura 6. Deslocamentos horizontais (u_x): (a) $S/D=1,25$; (b) $S/D=1,50$; (c) $S/D=1,75$; (d) $S/D=2,00$.

6. CONCLUSÕES

A análise integrada entre monitoramento de campo e modelagem numérica permitiu validar o desempenho de uma contenção com estacas espaçadas em dupla fileira, sem o uso sistemático de ancoragens, executada com sucesso em solo colapsável do Distrito Federal. A escavação apresentou deslocamentos horizontais compatíveis com os critérios de desempenho, e o modelo *Hardening Soil*, calibrado com dados locais, reproduziu de forma realista o comportamento observado. A análise paramétrica foi fundamental não apenas para identificar o limite crítico da razão S/D, evidenciando o papel do efeito de arqueamento na rigidez do sistema, mas também para validar a hipótese de modelagem com *placa* contínua equivalente, que se mostrou eficaz na representação global da contenção, reduzindo significativamente o custo computacional sem comprometer a qualidade dos resultados. Esses achados reforçam o potencial técnico e econômico da solução adotada, bem como sua aplicabilidade em futuros projetos em condições geotécnicas semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraham, K. (2007). *Three-dimensional behavior of retaining wall systems* (Master's thesis). Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.



- Andrade, L. N. (2024). *Avaliação do efeito arco em cortinas de contenção via análise numérica 3D do comportamento tensão x deformação* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Ceará.
- Blanco, S. B. (1995). *Aspectos de geologia de engenharia da escavação do metrô de Brasília* (Dissertação de mestrado). Universidade de Brasília.
- Dong, B. C., Qu, Z. Y., Huang, W. J., Wang, X. Y., Chen, S. L., & Zhang, P. F. (2022). Study on mechanical characteristics of double row pile supporting structure in deep foundation pit under earthquake. *Journal of Wuhan University of Technology*, 46, 297–302.
- George, T. I., & Dasaka, S. M. (2021). Numerical investigation of soil arching in dense sand. *International Journal of Geomechanics*, 21(5).
- Instituto de Pesquisas Ecológicas do Distrito Federal (IPEDF). (2023). *Classes de solos do Distrito Federal. Catálogo IPE-DF*.
- Liang, R. Y., & Yamin, M. (2010). Three-dimensional finite element study of arching behavior in slope/drilled shafts system. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34(11), 1157–1168.
- Lollo, J. A. (Org.). (2008). *Solos colapsíveis: Identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas*. Editora Cultura Acadêmica/UNESP.
- Paik, K. H., & Salgado, R. (2003). Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects. *Geotechnique*, 53(7), 643–653.
- Paixão, M. N. O. N., & Camapum de Carvalho, J. (1994). Influência da microestrutura no colapso de um solo de Brasília. In *Anais do II Simpósio sobre Solos Não Saturados* (Vol. 1, pp. 105–110). Recife, PE.
- Pardo, G. S., & Saez, E. (2014). Experimental and numerical study of arching soil effect in coarse sand. *Computers and Geotechnics*, 57, 75–84.
- Peng, W. X., & Liu, L. (2018). Indoor model test study on row spacing of double-row piles supporting deep excavation pit. *Journal of Hunan University*, 45, 121–127.
- Rebolledo, J. F. R., León, R. F. P., & Camapum de Carvalho, J. (2019a). Obtaining the mechanical parameters for the Hardening Soil Model of tropical soils in the city of Brasília. *Soils and Rocks*, 42(3), 265–279.
- Rebolledo, J. F. R., León, R. F. P., & Camapum de Carvalho, J. (2019b). Performance evaluation of rigid inclusion foundations in the reduction of settlements. *Soils and Rocks*, 42(1), 61–74.
- Rebolledo, J.F.R., Santiago, I.M. (2022). *Performance evaluation of rigid inclusions for settlement control of grain silos in tropical soils*. Soils and Rocks, 45(4): e2022004822.
- Rong, L. (2017). *Model test of unequal double-row pile with mast* (Master's thesis). Xi'an University of Architecture & Technology.
- Silva, A. R. C., Rebolledo, J. F. R., Farias, M. M., & Guimarães, M. J. R. (2022). Análise da influência da geometria da fundação na interação solo-estrutura de um aerogerador assente em solo tropical. In *Anais do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG* (Campinas, SP). São Paulo: ABMS.
- Sui, Y., Zhang, S., Li, Z., Zhang, X., Wu, F., & Tai, P. (2024). Numerical simulation of double-row retaining system with different piers. *Buildings*, 14, 1049.
- Sun, T., Liu, J. Y., & Liu, Y. (2012). Optimal row distance of retaining structure with double-row piles. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 34, 616–620.
- Yang, Y., Chen, C., Liu, C., Huang, L., Chen, W., Lin, N., & Xie, W. (2023). Performance of a deep excavation and the influence on adjacent piles: A case history in karst region covered by clay and sand. *Underground Space*, 8, 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2022.11.003>