

Efeitos da Escavação de Poço em Região Próxima a uma Contenção (Pit-in-Pit)

Patricia Yamaguti

Engenheira Civil, Intertechne Consultores S.A., São Paulo, Brasil, paya@inttpartner.com.br

Willy Massayuki Nakada

Engenheiro Civil, Intertechne Consultores S.A., São Paulo, Brasil, wmn@inttpartner.com.br

Ikuyo Akamine

Engenheira Civil, Intertechne Consultores S.A., São Paulo, Brasil, ika@inttpartner.com.br

Matheus Ciccacio Nogueira

Engenheiro Civil, São Paulo, Brasil, matheus.ciccacio@gmail.com

RESUMO: A utilização do espaço subterrâneo em grandes centros urbanos cresce progressivamente para implantação de estações de metrô, estacionamentos e outros interesses associados. Neste sentido, a escavação de valas ou poços de grande diâmetro para inserção destas obras torna-se um desafio com as mais diversas soluções de escoramento para vencer os desníveis topográficos criados. No entanto, em alguns casos, nas proximidades destas contenções, há a necessidade de se executar novas escavações, seja para construção de fundações, poços, entre outros. Desta forma, surgem problemas do impacto destas novas escavações dentro de valas previamente executadas (pit-in-pit), as quais carecem de verificações mais detalhadas do impacto das novas escavações, frequentemente muito próximas umas das outras pela limitação de espaço dos empreendimentos em grandes centros urbanos. Portanto, uma análise do desconfinamento das fichas e da perda da contribuição dos empuxos passivos nas contenções previamente executadas é de extrema importância. Assim, busca-se através deste artigo/trabalho apresentar estudos de variáveis envolvidas no problema para diferentes cenários com o auxílio de modelagens numéricas baseadas no método dos elementos finitos (MEF) que possam contribuir com o dimensionamento e análise da estabilidade destes elementos de contenção, buscando garantir a sua adequada segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Escavação, Recalques, Contenção, Poços, Valas, Pit-in-Pit.

ABSTRACT: The use of underground space in large urban centers is growing progressively for the implementation of subway stations, parking lots and other associated interests. In this sense, the excavation of large diameter trenches or shafts to insert these works becomes a challenge with the most diverse shoring solutions to overcome the topographic level differences created. However, in some cases in the vicinity of these retaining walls, there is a need to conduct new excavations, whether for the construction of foundations, shafts, and others. Therefore, problems arise regarding the impact of these new excavations within previously executed trenches (pit-in-pit), which require more detailed verification of the impact of new excavations, which are often remarkably close to each other due to the space limitations of projects in large urban centers. Consequently, an analysis of the deconfinement of the plugs and the loss of the passive contribution in previously executed retaining walls is extremely important. Thus, this article/work seeks to present studies of variables involved in the problem for different scenarios with the aid of numerical modeling based on the finite element method (FEM) that can contribute to the dimensioning and analysis of the stability of these retaining elements, seeking adequate safety factor.

KEYWORDS: Excavation, Settlements, Retaining Walls, Shafts, Trench, Pit-in-Pit.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional em zonas altamente urbanizadas como a cidade de São Paulo, há um aumento de desafios tipicamente urbanos como a crescente demanda por mobilidade urbana. Quanto ao enfrentamento deste desafio, é um consenso no setor de planejamento público de que deve-se mitigar o uso de transportes particulares em favor do transporte coletivo como solução adequada para a melhoria da mobilidade urbana, reduzindo assim a densidade demográfica por deslocamento (LOPES, 2013). Assim, há uma demanda crescente dentro do planejamento estratégico da cidade por obras que beneficiem o transporte coletivo como as obras de infraestrutura de maneira geral.

Inserido neste contexto, este artigo pretende realizar uma análise geotécnica e estrutural em obras metroviárias que seguem uma sequência executiva conhecida como "pit-in-pit". Esta sequência é caracterizada por uma escavação realizada dentro de uma zona previamente escavada. O método pit-in-pit é abordado por diversos autores como SUN et.al (2016), TAN et. al (2018), SHAO et. al (2020), LAI et. al. (2022) e TAO et. al. (2023), as quais realizam uma análise geotécnica e estrutural do método, embasada frequentemente por modelos computacionais.

É de grande importância avaliar os efeitos do método pit-in-pit para a engenharia civil, pois a remoção do volume de solo à jusante da contenção pode comprometer a ação do empuxo passivo que compõe os esforços resistentes da contenção existente à montante. Esta estabilidade pode ser entendida tanto do ponto de vista estrutural, dos esforços atuantes na parede, quanto do ponto de vista geotécnico, quanto à estabilidade global do maciço e estabilidades locais atuantes na ficha do mesmo.

Adicionalmente, devem-se analisar os efeitos da escavação pit-in-pit quanto às deformações previstas sob os edifícios lindeiros. Este fator é bastante significativo considerando que muitas das obras metroviárias são implantadas em regiões altamente urbanizadas. Com isso, faz-se necessária garantir a integridade dos edifícios lindeiros à obra, analisando se as deformações previstas com a escavação pit-in-pit são compatíveis com a capacidade de absorção dos mesmos.

A sequência executiva de escavações contidas em escavações possui uma importância significativa para a análise de estabilidade da obra, bem como para os edifícios lindeiros na região a que o mesmo pertence. Atentar para detalhes como o efeito de alívio dos esforços passivos, a redução do sobrepeso de solo a jusante, o incremento de carga solicitante atuante nas estruturas entre outros, são elementos cruciais para a realização de um projeto em níveis satisfatórios de segurança.

Os riscos atrelados a esse tipo de escavação encontram-se diretamente relacionados aos efeitos provocados pela escavação pit-in-pit citados acima. Ruptura dos elementos de contenção e/ou poço, instabilidade do maciço envolto e fissurações e trincas nos edifícios lindeiros são alguns dos possíveis efeitos que podem ser provocados por um projeto mal dimensionado, que não leve em consideração os aspectos particulares da escavação pit-in-pit.

Para a realização desta análise, faz-se uso da modelagem computacional pelo Método de Elementos Finitos (MEF). O mesmo permite a simulação de tensões e deformações atuantes na estrutura e no maciço de solo em fases sequenciais de escavação, permitindo a análise da escavação pit-in-pit em cada uma das etapas da obra.

2 ESCAVAÇÕES PIT-IN-PIT

SUN et al (2016) apresenta um caso de escavação pit-in-pit para a implantação de um Museu de História Natural em Shanghai, China, em conjunto com a passagem da Linha 13 do metrô. Esta obra consiste em duas escavações executadas em parede diafragma, de espessura 0,80 a 1,00 m, e platôs definidos nas profundidades 17,30 m e 25,0 m a partir da superfície do terreno.

Neste estudo, o autor demonstra que a distância "W" entre as paredes externas e internas da escavação e a relação " λ " entre o comprimento de ficha " H_d " com o comprimento exposto " H_e " da contenção ($\lambda = H_d/H_e$), conforme a Figura 1, possuem uma relação direta com a distribuição das superfícies potenciais de ruptura do maciço. Através de uma modelagem computacional em elementos finitos, observou-se o surgimento de rupturas localizadas das contenções para $W > W_{\text{crítico}}$, enquanto que para espaçamentos inferiores ao $W_{\text{crítico}}$, a ruptura global envolvia as duas contenções, assemelhando-se ao caso de uma parede única. Para o caso da

obra, o espaçamento crítico obtido foi entre 10,0 a 15,0 m, e deve diferir conforme a constituição estratigráfica do solo, no caso composto de solo argiloso mole.

O cálculo dos fatores de segurança de estabilidade global FS foi realizado através do método *shear strength reduction* e equilíbrio limite. Em ambos os casos, concluiu-se que o aumento do espaçamento "W" beneficia a estabilidade global, como era de se esperar, assim como há uma melhora equivalente incrementando-se as relações λ_{in} e λ_{out} mantendo o "W" constante. Assim, o autor realiza uma contribuição relevante a respeito da configuração das superfícies potenciais de ruptura em escavações do tipo pit-in-pit.

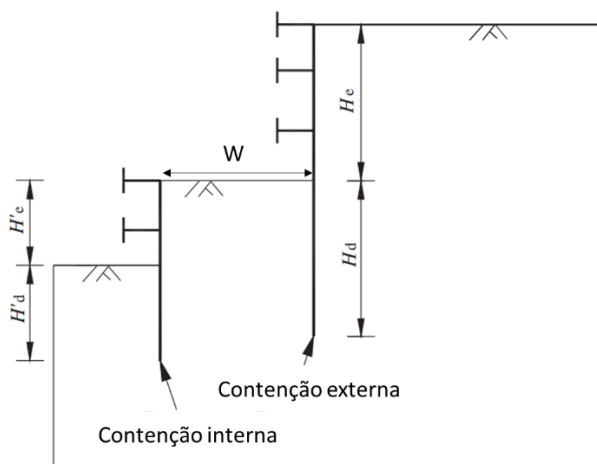


Figura 1. Medidas principais da escavação pit-in-pit (Fonte: SUN et al, 2016, adaptado pelos autores).

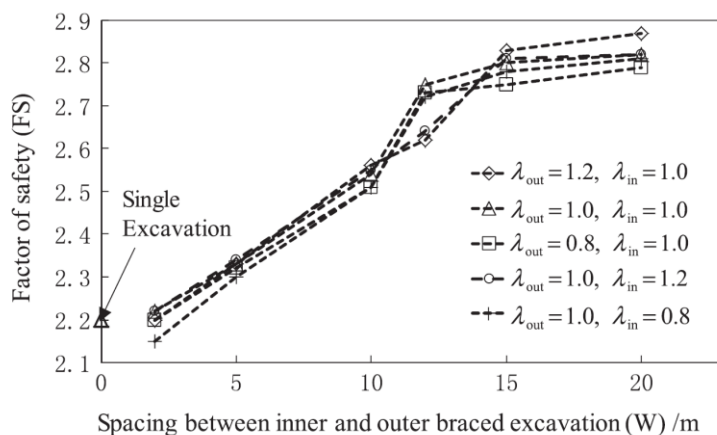


Figura 2. Fator de segurança x Espaçamento entre a escavação externa e interna. (Fonte: SUN et al, 2016).

Em um estudo mais recente, TAN et al (2018), realiza uma investigação sobre uma obra com sequência de escavação pit-in-pit. Esta obra, em relação à analisada por SUN et al (2016), possui uma instrumentação mais robusta, com presença de marcos superficiais, inclinômetros, transdutores de carga e indicadores de nível d'água, instalados em regiões perimetrais e internas à obra. Dessa maneira, foram colhidos dados relevantes para a descrição do comportamento do solo e dos elementos estruturais ao longo das diferentes fases da escavação pit-in-pit. Nesta obra a escavação externa é constituída por um poço circular de 101,0 m de diâmetro e 16,0 m de profundidade, e uma escavação interna de uma vala de dimensões 54,0 x 40,0 m e 32,0 m de profundidade, ambas executadas em parede diafragma. O subsolo é constituído superficialmente por um solo aluvionar de 10,0 m de profundidade, seguida de uma camada silto-argilosa de 10,0 m de espessura finalizando em solo residual. Assim, TAN et al (2018) conclui que há um impacto significativo da escavação interna para as movimentações do maciço contido pela contenção externa. Na média, 50,5% da movimentação ocorre durante a escavação da contenção externa, 26,0% na fase de escavação interna e 23,5% após a conclusão das etapas de escavação. Demonstra-se por simulações em modelos computacionais em Elementos Finitos que a

laje de travamento na região entre a contenção externa e interna é uma solução apropriada para diminuir o deslocamento da primeira, e conseqüentemente diminuir a zona de influência de recalques da obra sobre a região de implantação.

Uma das outras conclusões demonstradas pelo autor, é que devido à diferença na magnitude dos deslocamentos da contenção externa com a interna, a região intermediária entre elas encontrar-se-á comprimida. Sob o aspecto do dimensionamento da escavação pit-in-pit, o solo nesta região pode ser considerado no estado passivo e durante a escavação interna, a depender do respectivo deslocamento, o mesmo pode ser considerado no estado ativo. Analisando as tensões laterais de empuxo atuantes na contenção, os instrumentos demonstraram que os empuxos ativos calculados pela teoria de Rankine subestimam o empuxo mobilizado, enquanto que modelos empíricos da pressão de empuxo aparente (PEA) superestimam o mesmo empuxo, mas ambas medidas encontram-se inferior ao correspondente empuxo em repouso.

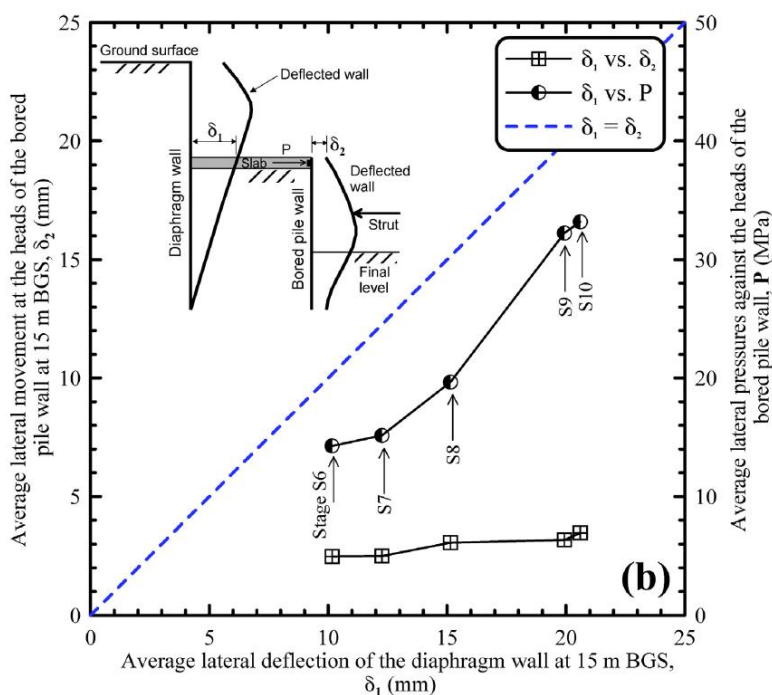


Figura 3. Mecanismo de compressão da região intermediária à escavação externa e interna, demonstrando que a diferença dos deslocamentos resulta em um estado de compressão do solo. (Fonte: TAN et al, 2018)

3 METODOLOGIA EXECUTIVA

3.1 Contexto Geral

Nesta seção serão abordados os aspectos gerais de um projeto de escavação pit-in-pit para a implantação de uma contenção em vala (externa) e uma escavação em poço (interna). A contenção em vala possui uma profundidade média de 11,75 m com paramento em parede diafragma atirantado. Adotou-se três níveis com tirantes de comprimentos 22,0 a 25,0 m, e espaçamentos destes dispositivos em 2,0 m na horizontal e 3,0 m na vertical na face da contenção, na região próxima ao poço.

O poço possui uma profundidade de 27,50 m executado com concreto projetado, possuindo um diâmetro de escavação de 41,30 m com distância mínima à parede de contenção de 1,80 m. Para a escavação do poço, considera-se a execução de um tratamento com parede de coulis até a profundidade 22,60 m como garantia de melhor estabilidade do maciço no trecho inicial do mesmo. No topo do poço, é previsto a execução de uma viga de borda de seção quadrada de lado 80,0 cm e uma laje de travamento de 25,0 cm de espessura que, conforme analisado por TAN et al (2018), possui um importante papel para a transmissão de tensões e controle de deslocamentos entre as contenções.

A respeito da geologia local, considera-se um subsolo constituído por uma camada superficial em aterro (1), seguida de argila da Formação São Paulo (3Ag1), sucedidas por areias da Formação Resende e camadas argilosas intermitentes, respectivamente designadas por 4Ar1 e 4Ag2 conforme se observa na Figura 4.

Foi elaborado um modelo computacional com o uso do Método de Elementos Finitos (MEF) e malha triangular, com auxílio do software RS2, da Rocscience©. O solo foi modelado com comportamento linear elasto-plástico perfeito e parâmetros do critério de Mohr-Coulomb. Para estimativa das tensões atuantes na laje do travamento, considerou-se o efeito do arqueamento de tensões na parede do poço acrescentando molas ao modelo.

Em relação aos parâmetros geotécnicos destas camadas, foi realizado um levantamento com base em valores encontrados em bibliografia (Miranda, 2021), conforme apresentado na Tabela 1.

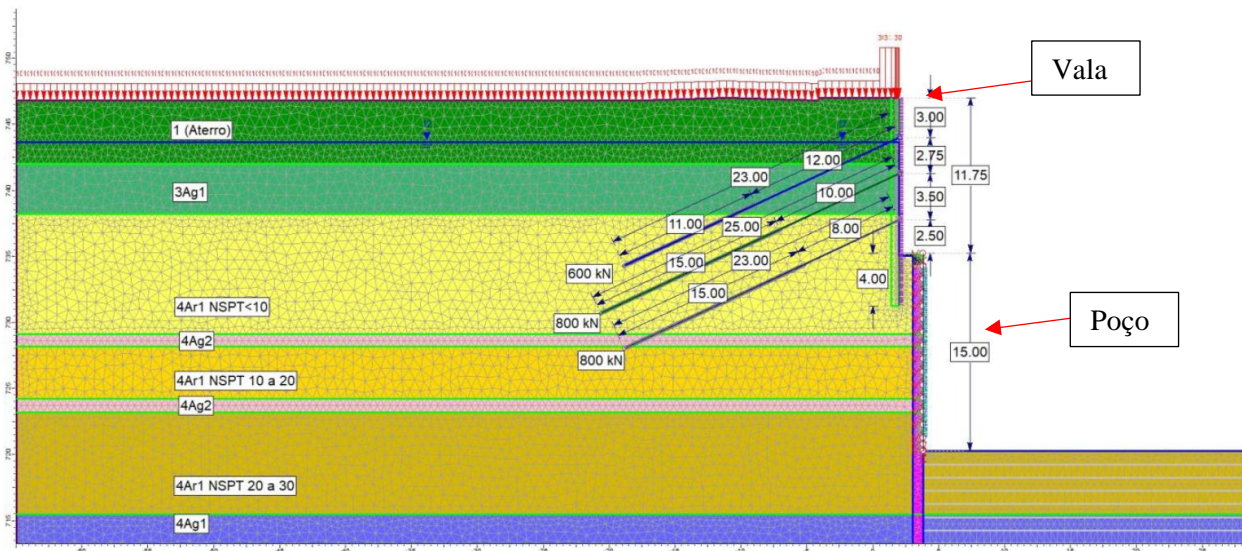


Figura 4. Modelo computacional em Elementos Finitos com trecho em vala e poço. (Fonte: Autores)

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados para as camadas de solo do modelo. (Fonte: Autores)

Material Name	Color	Initial Element Loading	Unit Weight (kN/m ³)	Young's Modulus (kPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Friction Angle (peak) (deg)	Friction Angle (residual) (deg)	Cohesion (peak) (kPa)	Cohesion (residual) (kPa)
1 (Aterro)	■	Field Stress and Body Force	16	10000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	20	20	10	10
3Ag1	■	Field Stress and Body Force	17	45000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	23	23	50	50
4Ar1 NSPT<10	■	Field Stress and Body Force	19	25000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	30	30	5	5
4Ag2	■	Field Stress and Body Force	19	60000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	21	21	40	40
4Ar1 NSPT 10 a 20	■	Field Stress and Body Force	19	60000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	30	30	6	6
4Ar1 NSPT 20 a 30	■	Field Stress and Body Force	20	100000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	33	33	7	7
4Ag1	■	Field Stress and Body Force	20	100000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	23	23	90	90

3.2 Cálculos

A partir do modelo constituído, foi realizada uma análise de estabilidade global da escavação pit-in-pit pela Teoria de Equilíbrio Limite e pelo método *shear strength reduction* (SSR). No primeiro caso, calcula-se o Fator de Segurança (FS) através da relação entre o momento resistente M_R e o solicitante M_S , gerada pelas tensões mobilizadas ao longo da superfície potencial de ruptura, conforme (1).

$$FS = \frac{MR}{MS} \quad (1)$$

A Figura 5 apresenta a análise de estabilidade pela Teoria de Equilíbrio Limite, realizada com o auxílio do software Slide, da Rocscience®.

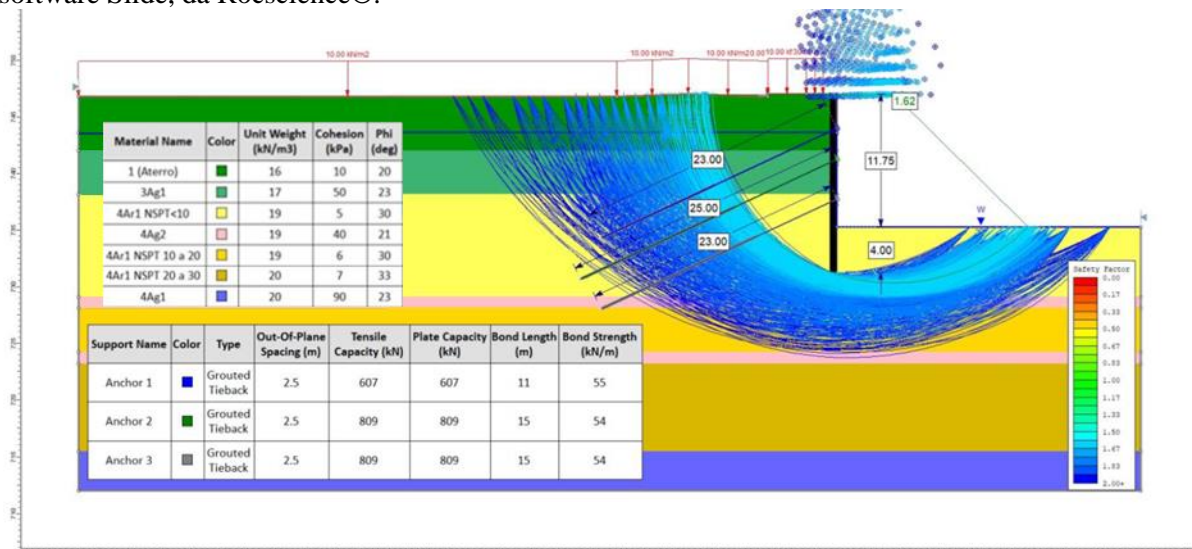


Figura 5. Fator de segurança calculado em 1,62 através do método de equilíbrio limite. (Fonte: Autores)

Já no método SSR, o valor do Fator de Segurança é obtido realizando-se diminuições gradativas da tensão cisalhante resistente até o surgimento da ruptura. Dado que "S_a" corresponde à tensão original do solo e "S_e" a tensão reduzida até o ponto de ruptura do maciço, tem-se que o fator de segurança pelo método SSR é calculado pela seguinte equação (2).

$$FS = \frac{S_a}{S_e} \quad (2)$$

Os resultados do cálculo da estabilidade geral pelo método SSR são apresentados na Figura 6, realizada com auxílio do software RS2, da Rocscience®.

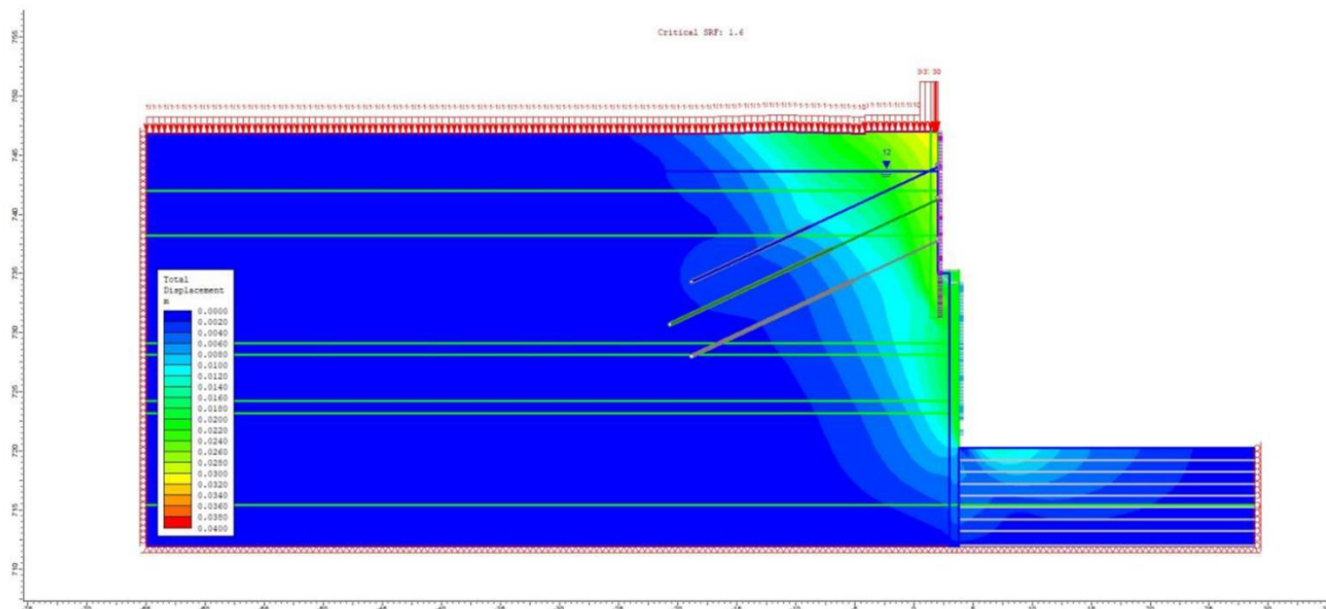


Figura 6. Fator de segurança calculado em 1,60 através do método *shear strength reduction*. (Fonte: Autores)

Assim como esperado, a distância "W" de espaçamento entre as contenções de 1,80 m é um valor inferior ao correspondente crítico para a contenção. Assim, a superfície potencial engloba as duas paredes de contenção pit-in-pit como se fossem uma só, resultando em um FS de 1,60. Sobre o cálculo desta estabilidade, ressaltam-se alguns fatores que influenciam positivamente na estabilidade da contenção: a presença da laje de travamento conectando as duas contenções, o tratamento de solo com parede de couli externamente ao poço, e a presença

de tirantes. Outros fatores como rebaixamento do nível do lençol freático poderiam atuar no sentido de melhorar a estabilidade da contenção, porém poderiam ampliar o impacto da obra sobre os edifícios lindeiros.

Ao comparar-se os resultados de estabilidade pelo SSR e pelo equilíbrio limite na fase de escavação da contenção externa, os fatores de segurança são muito parecidos, provavelmente atrelado às boas condições geológicas do maciço e à ação dos tirantes que impedem a mobilização da contenção externa.

Assim como analisado por TAN et al (2018), a região entre as contenções tende a encontrar-se comprimida pela diferença de deslocamento entre a contenção externa e interna. Esta variação resulta em tensões de compressão na laje de travamento de 25,0 cm de espessura, e mobilização o solo entre as contenções no estado passivo conforme se observa na Figura 7.

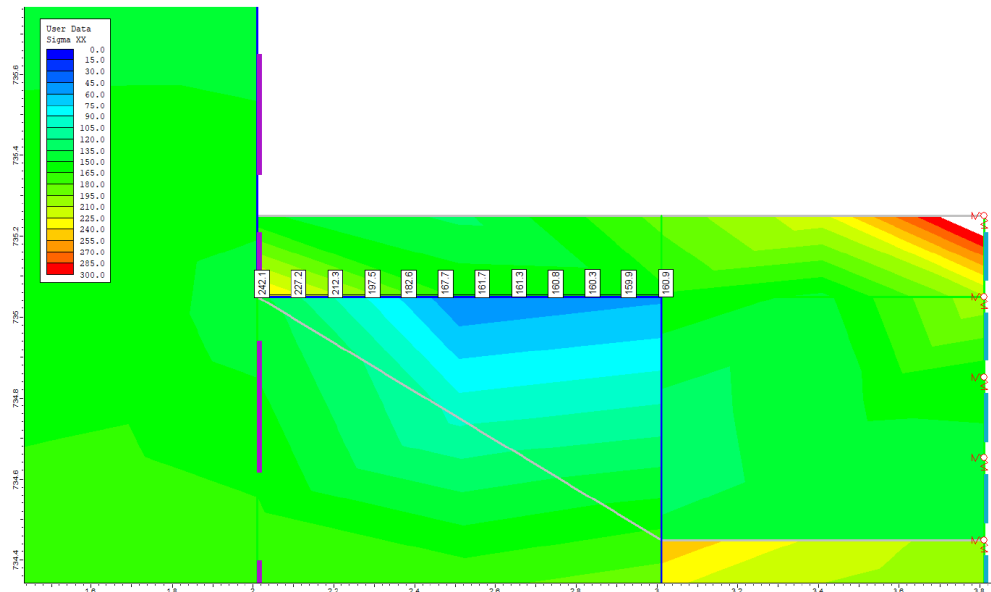


Figura 7. Tensões, em kPa, de compressões existentes na laje de travamento. (Fonte: Autores)

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo apresentou diversos aspectos geotécnicos e estruturais sobre a escavação pit-in-pit em um subsolo de comum ocorrência na região metropolitana de São Paulo. Assim, resume-se a seguir as principais conclusões deste artigo:

(1) As análises de estabilidade globais demonstraram que os fatores de segurança calculados pelo método *shear strength reduction* (SSR) são muito parecidos com os fatores calculados pela Teoria de Equilíbrio Limite no último estágio da escavação da contenção externa, considerada a mais crítica. Isso demonstra que a escavação do poço interno pouco afetou na estabilidade global, demonstrando efetividade do uso dos tirantes e da laje de travamento para a estabilidade da contenção, bem como do tratamento através de parede de couli no contorno do poço, interno à vala;

(2) Os resultados dos modelos computacionais demonstram que a região entre a contenção externa e a interna encontra-se comprimida devido à diferença sobre o deslocamento das contenções, conforme analisado por TAN et al (2018). Isso leva à necessidade de dimensionamento de uma laje que suporte esta tensão de compressão surgida durante as etapas de escavação pit-in-pit.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio da Intertechne Consultores S.A.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LAI et al (2022) Undrained stability of pit-in-pit braced excavations under hydraulic uplift. In: Research paper of ScienceDirect.
- LOPES et al (2013) *Demanda por meios de transporte na Grande São Paulo: uma análise de políticas públicas* (2013). In: Insper working paper.
- SUN et al (2016) *Basal-heave analysis of pit-in-pit braced excavations in soft clays*. In: Research paper of Elsevier, Computer and Geotechnics 81 (2017) 294-306.
- SHAO et al (2020) *Preliminary numerical analysis of the influence of pit-in-pit excavation on the stability of the foundation pit supported by diaphragm wall*. In: IOP Conference Ser.: Earth Environ. Sci. 570 022052.
- TAN et al (2018) *Investigation on performance of a large circular pit-in-pit excavation in claygravel-cobble mixed strata*. In: Research paper of Elsevier, Tunnelling and Underground Space Technology 79 (2018) 356–374.
- TAO et al (2023) *Monitoring and numerical simulation analysis of a pit-in-pit excavation of the first branch line of Lanzhou Metro*. In: Applied Rheology 2023; 33: 20230111.