

Execução de Poços de Pequeno Diâmetro Conectados a Túneis de Maior Diâmetro, em Grandes Centros Urbanos

Patricia Yamaguti

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

Andressa Schittler Sartor

Engenheira Civil, Intertechne Consultores S.A., São Paulo, Brasil, anss@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: Em grandes centros urbanos existem inúmeros desafios para construção de obras subterrâneas, principalmente para implantação de estações de metrô, saídas de emergência e ventilação, dadas as características geométricas das escavações e estruturas necessárias. Em regiões centrais, devido ao elevado número de construções históricas e patrimônios tombados, estão disponíveis apenas áreas reduzidas para a implantação destas estruturas enterradas e uma grande preocupação com o impacto das escavações nestas importantes edificações lindeiras. Em muitos casos, considera-se um diâmetro maior que o necessário para a escavação dos poços, pois este deve ter tamanho suficiente para receber a tuneladora, que atravessa o poço após a finalização de sua execução. Neste artigo, apresenta-se uma solução onde o túnel é executado antes do poço, sendo necessário um tratamento especial na conexão entre estas duas estruturas. Dessa forma, o poço pode apresentar diâmetro reduzido, apenas o suficiente para atender a devida finalidade (saída de emergência, ventilação, ou outra). Adicionalmente, são propostos tratamentos do maciço em locais onde haja necessidade para mitigação de riscos durante a escavação. Portanto, há uma diminuição significativa na área impactada e a sua influência (recalque) facilitando sua implantação e diminuição dos deslocamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Poço de Pequeno Diâmetro, Colunas de Jet Grouting, Túnel.

ABSTRACT: In large urban centers there are enormous challenges for the construction of underground works, mainly for the implementation of metro stations, emergency exits and ventilation, given the underground characteristics of excavations and electrical structures. In central regions, due to the high number of historic buildings and listed heritage sites, only small areas are available for the implementation of underground structures and there is a great concern about the impact of excavations on these important neighboring buildings. In many cases, a diameter larger than necessary for digging the shafts should be considered, as this must be large enough to receive a tunnel boring machine, which crosses the shaft after completion of its execution. In this article, a solution is presented where the tunnel is built before the shaft, requiring special treatment in the connection between these two structures. Therefore, the shaft can have a reduced diameter, just enough to serve a specific aim (emergency exit, ventilation or other). In addition, soil treatments are proposed in places where there is a need to mitigate risks during excavation. Therefore, there is a significant reduction in the impacted area and its influence (settlement), facilitating its implementation and reducing the settlements.

KEYWORDS: Small Diameter Shaft, Jet Grouting Columns, Tunnel.

1 INTRODUÇÃO

Os grandes centros urbanos brasileiros apresentam o desafio de restrição de espaços devido à alta concentração populacional e comercial. Segundo o último Censo realizado pelo IBGE em 2022, a cidade de São Paulo apresenta uma densidade demográfica de 7.528,26 habitantes por quilômetro quadrado, que por sua vez, necessitam de soluções de trafegabilidade e mobilidade. No Brasil, a construção de linhas de metrô mostra-se como uma excelente alternativa de deslocamento da população, visto que as vias de trânsito apresentam uma demanda maior do que a capacidade, registrando nos horários de pico grandes congestionamentos. Conforme o relatório apresentado pela SIMOB/ANTP (2018), são realizadas uma média de 1,65 viagens por habitante por dia, sendo que este número varia de acordo com a dimensão populacional da cidade, destas viagens cerca de 36% são realizadas por transporte público e apenas 4% são realizadas por veículos sobre trilhos.

Uma das principais dificuldades para a concepção de linhas de metrô, em áreas de grande concentração populacional, está na disponibilidade de espaços urbanos para a locação dos poços de estações, saída de emergência e ventilação. De um modo geral, a redução dos poços ocorre utilizando um artifício construtivo denominado “poços garrafa”, em que o poço apresenta um diâmetro reduzido apenas na superfície do terreno de implantação e, projetam-se alargamentos graduais ao longo de sua profundidade, ocorrendo dessa forma a escavação em talude negativo.

No entanto, há casos em que ocorre uma delimitação que não é apenas territorial, mas da abrangência da região de impacto dessa escavação, surgindo então a necessidade de redução dos diâmetros dos poços ao longo de toda a sua profundidade para adaptação ao local de implantação.

Este trabalho propõe uma nova abordagem executiva para implantação de poço de pequeno diâmetro executado em parte anteriormente à execução do túnel. Nesta proposta, inicia-se a escavação do poço até uma determinada profundidade, espera-se a passagem da tuneladora e então a finaliza-se o poço, com encaixe no túnel já executado. Esta metodologia permite que o poço tenha um diâmetro único ao longo de sua profundidade, sendo adequado apenas para a função desejada, como saída de emergência ou ventilação, utilizando de artifícios de estabilização do solo, como colunas de jet grouting.

2 CONEXÃO DE POÇO E TÚNEL

As publicações sobre o tema, em sua maioria, tratam da conexão do poço com o túnel da maneira tradicional, ou seja, com a execução do poço de maior diâmetro com a posterior passagem do túnel, como Mahmoud (2023). Os estudos indicam que os locais que apresentam maiores deformações localizam-se próximo às conexões, seja entre dois túneis, ou entre poço e túnel (Figura 1).

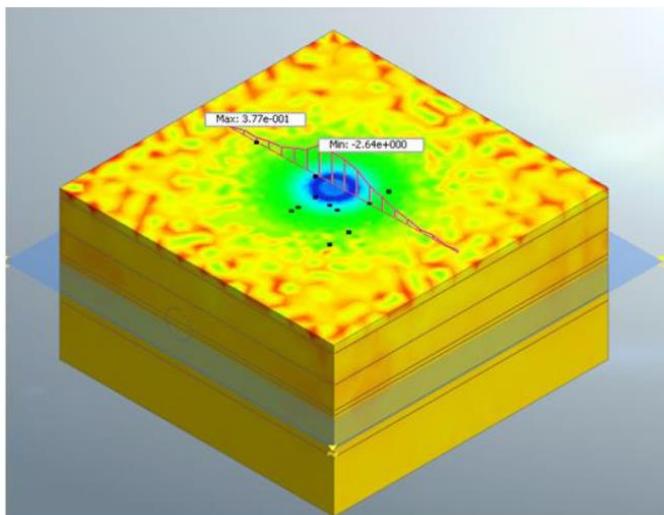


Figura 1. Recalques máximos obtidos em um modelo de poço conectado com túnel (Fonte: Mahmoud 2023)

2.1 Tratamento do maciço

Uma parte importante desse tipo de projeto é o tratamento do maciço, que possui a função de reduzir os efeitos de recalque no entorno da escavação, além de servir como apoio para o revestimento do poço, a fim de que o túnel não seja carregado com os esforços adicionais. O tratamento previsto é a utilização de duas linhas de colunas de jet-grouting que percorrem toda a extensão do poço como forma de conter lateralmente a escavação e para manter a estanqueidade do solo escavado.

Conforme a Croce et. al (2014), o jet grouting consiste em uma técnica que utiliza jatos de água com alta velocidade para escavar colunas de elevada resistência e baixa permeabilidade, devido à injeção de calda realizada por bicos horizontais.

O mesmo autor apresenta as vantagens de utilização do jet grouting, em que se destaca a aplicabilidade em diversos tipos de solo, possibilidade de diversas geometrias e execução que não produz vibração do solo, não afetando as edificações lindeiras e possibilitando a utilização em grandes centros urbanos. Na Figura 2 são apresentados exemplos de seções típicas de utilização de jet-grouting em poços.

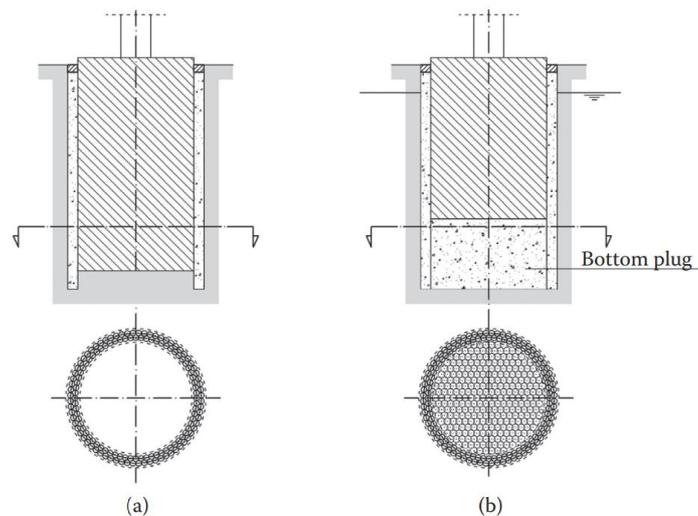


Figura 2. Exemplo de seção típica de execução de colunas de jet grouting (a) acima do nível d'água e (b) abaixo do nível da água. (Fonte: Croce et. al 2014)

A partir destes conceitos, desenvolve-se uma metodologia para a execução de um poço de menor diâmetro. Nesta metodologia, o ponto mais sensível continua sendo a conexão com o túnel.

3 METODOLOGIA EXECUTIVA

A sequência executiva projetada para o poço é a seguinte (Figura 3):

1. Execução de tratamento do maciço com dois anéis de colunas de jet grouting secantes e tangentes ao revestimento do poço;
2. Escavação do poço e aplicação do revestimento primário, com escavação de nichos que devem servir de apoio para o revestimento, até cerca de 3,00 m acima da geratriz superior da tuneladora;
3. Execução de colunas de jet grouting de 5,00 m de profundidade, preenchendo toda a área do fundo do poço para proteger a passagem da tuneladora;
4. Execução do revestimento secundário até cerca de 3,00 m acima da geratriz superior da tuneladora
5. Passagem da tuneladora e reforço dos anéis pré-moldados;
6. Escavação do poço até os anéis pré-moldados, e finalização do revestimento secundário do poço;
7. Demolição dos anéis de reforço e consolidação do revestimento secundário.

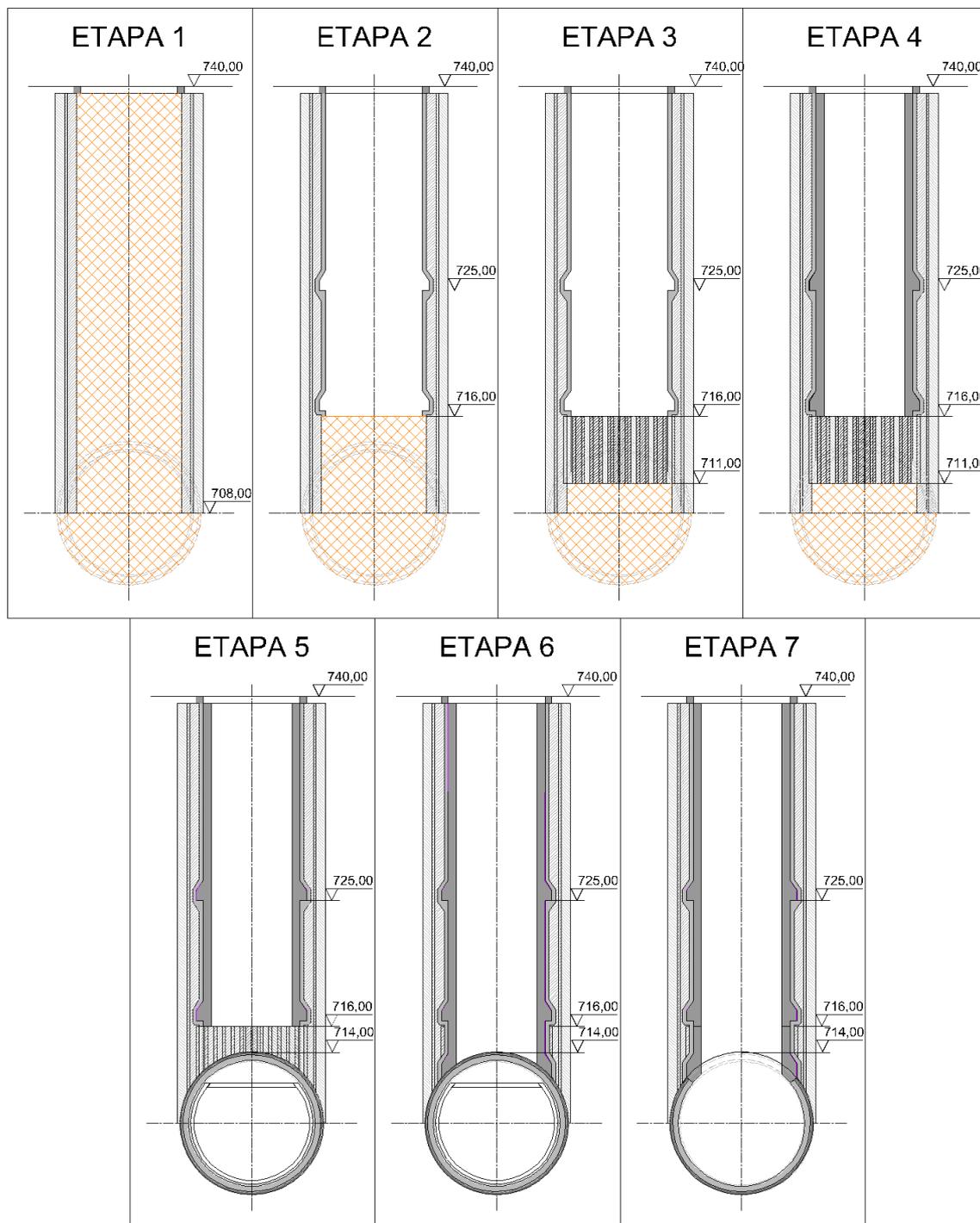


Figura 3. Etapas de execução do poço (Fonte: Autores)

3.1 Escavação

A escavação do poço deve ser realizada a partir do nível do terreno natural, apresentando um diâmetro interno útil de 6,0 m e externo de 8,80 m. Para este estudo, considera-se que o poço está inserido em solo da Formação Resende, com predominância de material arenoso, com areia fina a média, areia média a grossa com pedregulhos e siltosa por vezes argilosa, interdigitado com lentes de argila siltosa e raramente lente de argila arenosa, de distribuição irregular.

Sendo assim, a escavação será iniciada após a finalização do tratamento do maciço com as colunas de jet grouting e antes da passagem da tuneladora. O método de escavação utilizado é o método sequencial, conhecido como *New Austrian Tunneling Method (NATM)*, através de nichos alternados com 6,0 m de largura e aplicação imediata de concreto projetado até completar o perímetro total.

Segundo Percic (2023), o método sequencial *NATM* apresenta as vantagens de ser um método aplicável em diversos tipos de solos e condições geológicas, sendo amplamente utilizado nas regiões urbanas, no entanto, a autora destaca como desvantagem que este método requer uma mão de obra especializada e qualificada, tanto na parte de execução quanto na parte de monitoramento do maciço.

Ao longo da escavação do poço estão previstos dois apoios (Figura 4), com a função de reduzir a carga das paredes aplicadas sobre o túnel.

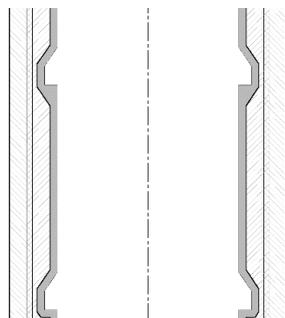


Figura 4. Detalhe dos apoios das paredes do poço (Fonte: Autores)

A escavação ocorre em passos de avanços de 1,0 m até cerca de 3,00 m acima da geratriz superior do túnel. Essa etapa, inevitavelmente altera o estado natural do campo de tensões do solo, que se encontra em equilíbrio.

3.2 Modelo Numérico

Para o estudo em questão, realiza-se uma modelagem pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) no software RS2 da Rocscience©. No caso, considera-se um modelo axissimétrico, onde são simulados todos os passos de avanço da escavação seguidos da execução do revestimento em concreto projetado. Foram admitidas algumas hipóteses para a análise, sendo elas: maciço homogêneo, isotrópico, elasto-plástico perfeito, com critério de ruptura representado pelo critério de Mohr Coulomb, com uma lei de fluxo não-associada (comportamento perfeitamente plástico). A Figura 5 apresenta a geologia considerada para o modelo:

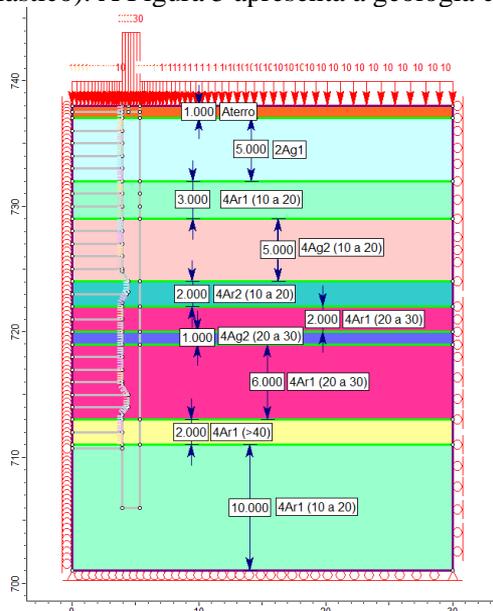


Figura 5. Contexto geológico geral considerado para o estudo (Fonte: Autores)

Os parâmetros geológico-geotécnicos considerados no modelo são apresentados na Tabela 1, e foram obtidos através de valores tabelados em bibliografia (Miranda, 2021).

Tabela 1. Parâmetros geológico-geotécnicos adotados no modelo (Fonte: Autores)

| Material | Cor | Peso próprio (kN/m ³) | Módulo de elasticidade (kPa) | Coefficiente de Poisson | Critério de falha | Tipo de material | Ângulo de atrito (°) | Coesão (kPa) |
|---------------------|---|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------|------------------|----------------------|--------------|
| Aterro (1) |  | 16,0 | 10000,0 | 0,3 | Mohr Coulomb | Plástico | 20,0 | 10,0 |
| 2Ag1 |  | 16,0 | 4000,0 | 0,3 | Mohr Coulomb | Plástico | 20,0 | 8,0 |
| 4Ag2 (NSPT 10 a 20) |  | 19,5 | 30000,0 | 0,3 | Mohr Coulomb | Plástico | 22,0 | 50,0 |
| 4Ar1 (NSPT 10 a 20) |  | 19,5 | 60000,0 | 0,3 | Mohr Coulomb | Plástico | 31,0 | 5,0 |
| 4Ar1 (NSPT 20 a 30) |  | 20,0 | 100000,0 | 0,3 | Mohr Coulomb | Plástico | 32,0 | 5,0 |
| 4Ar2 (NSPT 10 a 20) |  | 19,5 | 60000,0 | 0,3 | Mohr Coulomb | Plástico | 34,0 | 3,0 |
| 4Ag2 (NSPT 20 a 30) |  | 20,0 | 100000,0 | 0,3 | Mohr Coulomb | Plástico | 24,0 | 80,0 |
| 4Ar1 (NSPT > 40) |  | 21,0 | 180000,0 | 0,3 | Mohr Coulomb | Plástico | 35,0 | 5,0 |

A Figura 6 apresenta as tensões horizontais e verticais do maciço na última etapa da escavação, através da figura é possível visualizar que o tratamento com colunas de jet grouting é fundamental para manter as tensões do maciço reduzidas ao longo da escavação, tanto que, as tensões horizontais são mantidas praticamente estáveis ao longo da borda poço em toda profundidade.

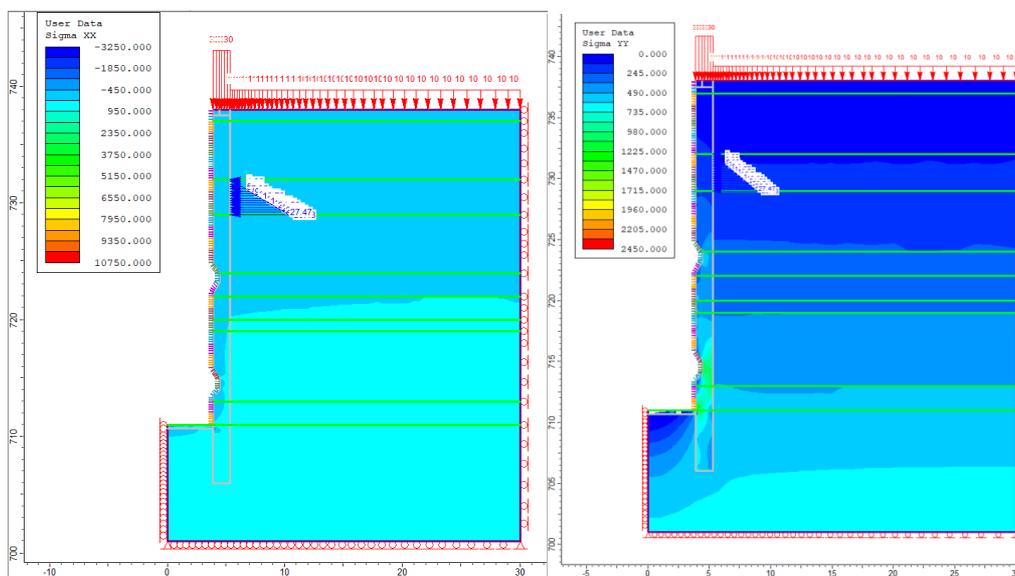


Figura 6. Tensões horizontais e verticais (em kPa), respectivamente, na etapa final (Fonte: Autores)

Os deslocamentos horizontais e verticais para a última etapa de escavação, demonstrados na Figura 7 também são estabilizados pela utilização do tratamento na borda do poço, que mantém as movimentações do maciço em pequenos níveis e com menor área de propagação.

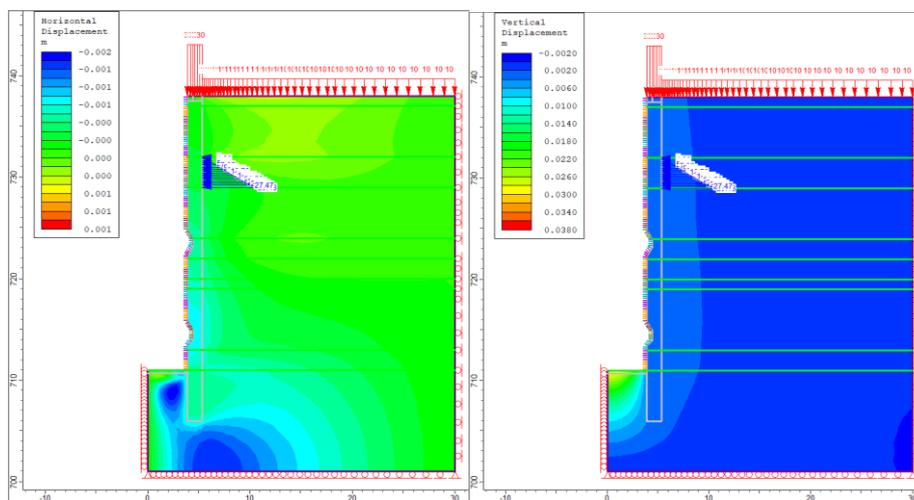


Figura 7. Deslocamentos horizontais e verticais, respectivamente, na etapa final (Fonte: Autores)

Na Figura 8 são demonstradas as plastificações no maciço que praticamente não acontecem para o modelo em questão, validando assim os resultados de que os esforços no maciço ao longo das etapas de escavação estão dentro do esperado.

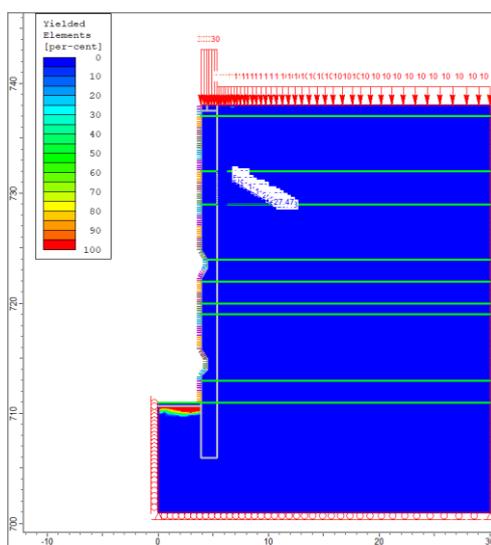


Figura 8. Plastificação dos elementos na etapa final (Fonte: Autores)

De forma a ilustrar a importância da utilização do tratamento de colunas de jet-grouting na borda do poço, a Figura 9 demonstra a comparação entre duas simulações, a linha azul representa o resultado da análise do recalque a partir da borda do poço para o modelo numérico sem aplicação de tratamento e, em laranja, está representado o resultado do recalque para o modelo numérico com a aplicação do tratamento de colunas de jet-grouting. Percebe-se que há uma redução de 35 mm para 13 mm nos recalques apresentados na borda do poço. Sendo assim, fica comprovada uma redução de 63% nos recalques esperados para a região do poço, causando menores impactos nas edificações presentes na região de implantação do poço.

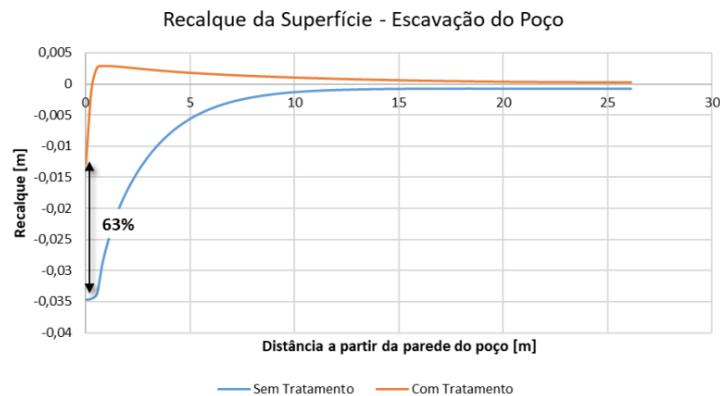


Figura 9. Recalques resultantes do modelo numérico. (Fonte: Autores)

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método construtivo sugerido para poços de pequeno diâmetro conectado a túneis de maior diâmetro apresenta bons resultados do ponto de vista de modelo numérico, no entanto, considera-se essencial o uso do tratamento do maciço nas paredes laterais, bem como no fundo da escavação do poço, para minimizar os impactos das escavações na região de implantação do poço. O modelo executado em Método de Elementos Finitos (MEF) permitiu a análise de tensões resultantes, deslocamentos e plastificação dos elementos. Como sugestão para os próximos trabalhos, considera-se a realização de análises numéricas tridimensionais, principalmente nos elementos de tratamento do solo, bem como seus efeitos no entorno.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Croce, P., Flora, A., Modoni, G., (2014). *Jet grouting: technology, design and control*. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton, FL, USA.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2022) Censo Demográfico Populacional – Panorama Cidades. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>>. Acesso em 16 jun. 2024.
- Mahmoud S. Nafi, Nasser M. Salch, Nisreen E. Elfaris, Waleed A. Dawoud (2023). Verification of numerical modelling of tunnel-shaft connection under static loading. *Engineering Research Journal (EJR)*, Faculty of Engineering at Shoubra, Cairo, Egito.
- Miranda, A. O. (2021). *Geoestatística aplicada a dados geológicos e geotécnicos da Bacia de São Paulo*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 149 p.
- Percic, I., Jokanovic, I., (2023). *Construction Of Underground Structures in Urban Areas*. *Journal of Faculty of Civil Engineering*.
- Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público - SIMOB/ANTP, (2018). Relatório geral. Disponível em: <<https://files.antp.org.br/simob/sistema-de-informacoes-da-mobilidade--simob--2018.pdf>>. Acesso em 16 jun. 2024.