

Túneis com seções ovalizadas em NATM para obras subterrâneas metroviárias

Guilherme Gianotti de Andrade
Engenheiro Civil, São Paulo, Brasil, gianotti.guilherme@gmail.com

Patricia Yamaguti
Engenheira Civil, Intertechne Consultores S.A., São Paulo, Brasil, paya@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 obras metroviárias destacam-se estações e poços de ventilação e saída de emergência (VSE's) que possuem poços principais, túneis de ligação e túneis de plataforma. Os túneis de ligação são utilizados para conectar poços de acesso (ligação com a superfície) com o túnel de via, ou abertura dos túneis de plataforma em estações, para passagem da tuneladora. Desta forma, em alguns casos os túneis de ligação possuem uma geometria oval (menor largura e maior altura da seção) de grandes dimensões para viabilizar a conexão por limitações geométricas (ex.: poços com diâmetro menor e tuneladoras de grande diâmetro), ou por exigências de elementos arquitetônicos. Consequentemente, esta geometria torna-se um desafio do ponto de vista construtivo, implicando na necessidade de um projeto mais cuidadoso na metodologia construtiva com a aplicação de parciais da seção, tratamentos do maciço e verificações adequadas para este tipo de geometria. Portanto, neste estudo, são apresentadas alternativas de dimensionamento e verificação buscando viabilizar de forma segura a construção de túneis em solo com seção oval para obras metroviárias com grandes dimensões (dimensões aproximadas de 11,00m x 15,00m).

PALAVRAS-CHAVE: Túnel em Solo, Seção Oval, Tratamento

ABSTRACT: In subway constructions there are stations, ventilation, and emergency exit shafts that have main shafts, connection tunnels and platform tunnels. Connection tunnels are used to connect vertical shafts (access to the surface) with the track tunnel, or to open platform tunnels in stations for the passage of the tunnel boring machine as such, in some cases the connecting tunnels have an oval geometry (smaller width and greater section height) of large dimensions to make the connection feasible due to geometric limitations (e.g. smaller diameter shafts and large diameter tunnels), or due to the requirements of architectural elements. Consequently, this geometry becomes a challenge from the construction point of view, implying the need for a more careful design in the construction methodology with the application of sequential excavation method, treatments of the soil mass and appropriate analysis for this type of geometry. Therefore, in this study, design and verification alternatives are presented to make the construction of oval-section (elliptical) soil tunnels safely feasible for large subway projects and construction (approximate dimensions of 11.00m x 15.00m).

KEYWORDS: Tunnel in Ground, Oval Section, Treatment.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, com a retomada das grandes obras de infraestrutura nos últimos anos, houve um aumento correspondente nas obras de expansão da malha metroviária da cidade de São Paulo. Novas linhas estão em processo de execução (Linha 6 - Laranja e expansão da Linha 2 – Verde) e novos projetos estão sendo elaborados para futura licitação. Com estas obras dentro de um grande centro urbano, novos desafios são

esperados para superação dos obstáculos existentes para implantação de novas linhas em regiões densamente urbanizadas.

Nos túneis rodoviários e ferroviários, dentro ou fora dos grandes centros, normalmente, as suas seções transversais buscam incluir o gabarito móvel e equipamentos necessários. Estas seções normalmente possuem um formato dimensionado a partir da junção de segmentos de arcos para englobar os itens necessários supracitados em seu interior com a otimização da distribuição dos esforços com um formato mais achatado. Desta forma, favorecem as seções típicas conhecidas de side-drift, calota e arco invertido comumente aplicadas em obras brasileiras.

No entanto, em obras subterrâneas metroviárias estas seções são aplicadas majoritariamente em túneis de plataforma, túneis de via em NATM, entre outros, mas há a utilização de seções pouco convencionais, os chamados túneis de ligação. São fundamentais nas ligações entre poços de estações, ou de ventilação e saídas de emergência (VSE), com os túneis de plataforma, ou de via para passagem de tuneladora. Portanto, mostra-se fundamental a adoção de seções ovalizadas (ou elípticas) para atender os requisitos de espaço livre para passageiros, instalação de estruturas/equipamentos, passagem de tuneladora, ou emboque dos túneis de plataforma. Ainda, esse tipo de geometria é adotado com a finalidade de reduzir o volume de escavação e consumo de concreto.

Neste artigo, busca-se ilustrar as aplicações destas seções ovalizadas/elípticas em túneis de ligação nas obras da cidade de São Paulo, apresentar suas características principais e fornecer recomendações importantes quantos às premissas de projeto e cuidados necessários durante sua execução.

2 TÚNEIS DE LIGAÇÃO COM SEÇÃO OVALIZADA

Em grandes centros urbanos, muitas vezes há a dificuldade de locação de poços com o eixo coincidente com o túnel, pela falta de espaço na superfície, ou requisitos necessários para implantação dos VSE's e Estações para este cenário. Desta forma, dadas as limitações encontradas, são implantados poços de Estações e VSE's laterais com a necessidade de um túnel de ligação para conectar o túnel de via, ou plataformas, com o poço vertical de acesso ao nível do terreno.

Os túneis de ligação com seção transversal elíptica, ou com seção ovalizada (Figura 1), possuem normalmente dois eixos principais (maior, a , e menor, b). Assim, estes túneis podem possuir uma seção de altura (eixo vertical a) maior que a largura máxima (eixo horizontal b) para que possam ser embocados novos túneis (plataforma, por exemplo) partindo do túnel de ligação, ou realizar a passagem dos túneis de via (tuneladora ou túneis convencionais pelo método sequencial, por exemplo). Nas obras atuais e projetos (básicos e executivos) em elaboração do Metrô de São Paulo, alguns túneis de ligação com este tipo de seção estão sendo empregados e construídos (Figura 2).

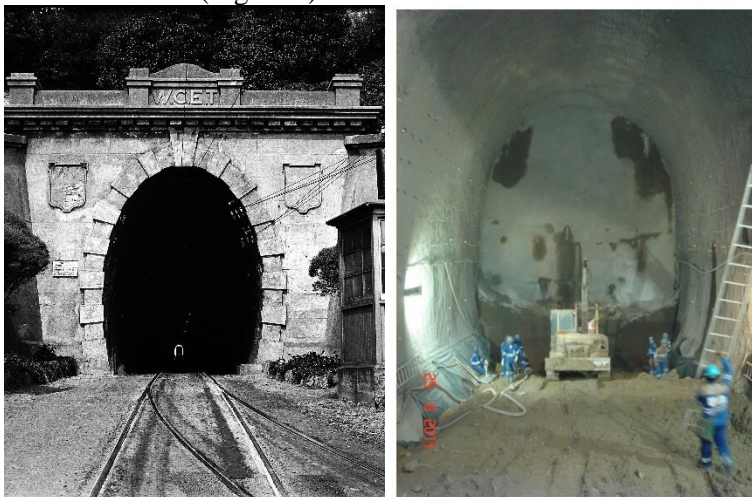


Figura 1. Exemplo de túneis com seção transversal oval/elíptica: (a) Hataitai Bus Tunnel (Fonte: wellingtoncityheritage.org); (b) execução do túnel de ligação do VSE Delmiro Sampaio da Linha 5 – Lilás da CMSP (Fonte: Carreira, W. 2014) .

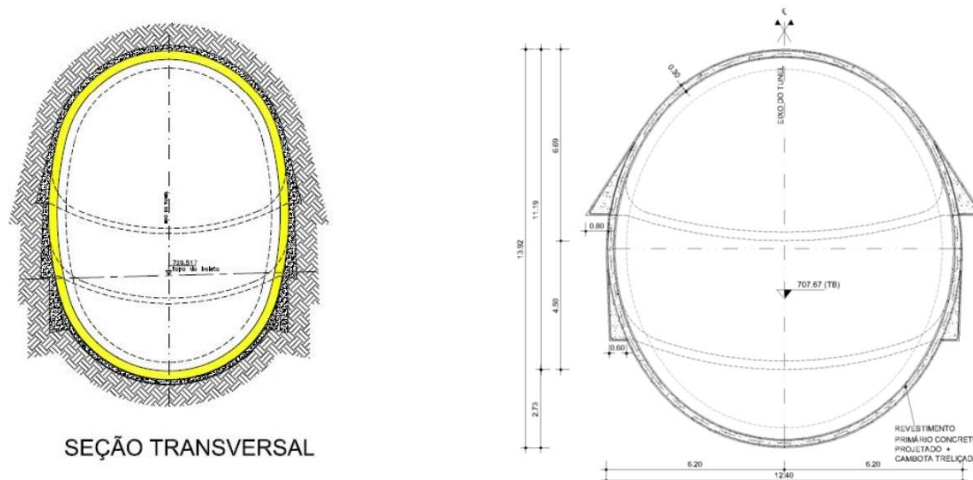


Figura 2. Exemplos de projetos de túneis de ligação com seção oval/elíptica da Linha 5 - Lilás do Metrô de São Paulo: (a) VSE Deslmiro Sampiao (Fonte: Carreira, W. 2014); (b) VSE Roque Petrella (Fonte: Aguiar, G. et al. 2014).

3 METODOLOGIA EXECUTIVA

A escavação de túneis em solo pelo método convencional/mineiro, populamente conhecido no Brasil como *NATM*, possui resumidamente a seguinte sequência executiva: tratamento de teto e frente, escavação da calota, aplicação do concreto projetado na calota, escavação do arco invertido e concretagem do arco invertido. No caso dos túneis com seção transversal oval/elíptica e grandes dimensões (eixos maiores e menores maiores que 10 metros), deve-se considerar a parcialização da seção devido às grandes áreas a serem escavadas, desta forma, evita-se a ocorrência de instabilidades e deslocamentos elevados. Portanto, recomenda-se a parcialização da escavação da calota com a utilização de side-drift (SD), galeria lateral, e divisão em rebaixos para escavação do arco invertido definitivo (AID). Assim, considerando as dimensões da calota há a possibilidade de aplicar a escavação de uma ou duas galerias laterais para parcialização deste trecho. Seguindo a mesma lógica, podem ser executados até três rebaixos, ou mais, com utilização de AIPs até a escavação do AID (Figura 3 e Figura 4).

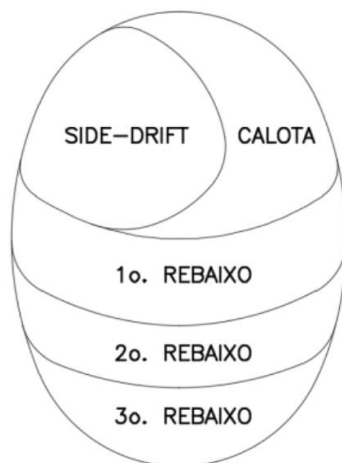


Figura 3. Esquema representativo da possibilidade de parcialização para escavação do túnel de ligação com apenas uma única galeria lateral (side-drift) e três rebaixos (Fonte: Autores).

Túneis ovais/elípticos com dimensões menores (eixo com até 8 metros) e escavados em rocha podem facilitar a escavação dos túneis considerando apenas escavação da calota e menor rebaixo até execução do AID, conforme apresentado por Amberg (1983) e Miura (2003), ou mesmo sem AID. Em solo, dadas as dimensões é recomendada a parcialização da seção.



Figura 4. Túnel de Ligação da Futura Estação Santa Isabel (em execução) com seção elíptica: (a) detalhe dos side-drifts (Fonte: Via Trolebus); (b) seção escavada para abertura dos emboques dos túneis de plataforma (Fonte: Márcia Alves/Metrô SP).

Uma alternativa é a escavação de um túnel piloto no centro da calota para maior entendimento do trecho, dependendo das condições investigadas e de obra.

4 TRATAMENTOS E REBAIXAMENTO

Uma característica da seção transversal apresentada na Figura 3 é a quase verticalidade da parede lateral para escavação dos arcos invertidos provisórios (AIP) e, principalmente, para escavação do definitivo (AID). Desta forma, Shiau et al. (2022) cita a importância da verificação de estabilidade lateral visto que Miura (2003) apresenta a necessidade de instalar travamento horizontal na seção para evitar instabilidade lateral da seção em maciço rochoso. Uma proposta é obtenção do FS através do SRF (*Strength Reduction Factor*) presentes nos programas computacionais com base no Método dos Elementos Finitos (MEF). Torna-se necessária a aplicação de um tratamento no maciço (Figura 5), normalmente usando colunas de *jetgrouting* (JG) nas paredes laterais para maior estanqueidade (em seções em solos arenosos) e melhoria nas condições do maciço para garantia da estabilidade da parede (Figura 9).

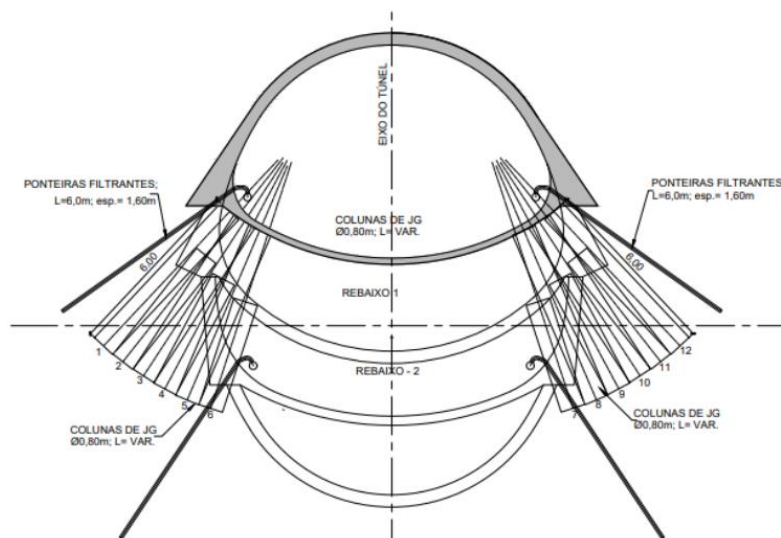


Figura 5. Exemplo de aplicação do tratamento do maciço com colunas de JG para garantia de estabilidade da parede lateral do túnel oval e instalação de dois níveis de ponteiras para alívio de pressão d'água (Fonte: Autores).

Propõe-se também a utilização de ponteiras filtrantes em dois níveis, a partir das sapatas da calota inicial e, também, a partir do primeiro AIP para abranger toda a profundidade para seções com diversos AIPs até finalizar a escavação do AID. Uma alternativa é a escavação de um túnel piloto no centro da calota para maior entendimento do trecho, dependendo das condições investigadas e de obra.

4 EXEMPLO DE MODELAGEM NO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Apresenta-se neste item um exemplo que considera a execução de um túnel em uma geologia composta predominantemente por areia média a grossa, pouco siltsosa da Formação Resende, conforme apresentado na Figura 6.

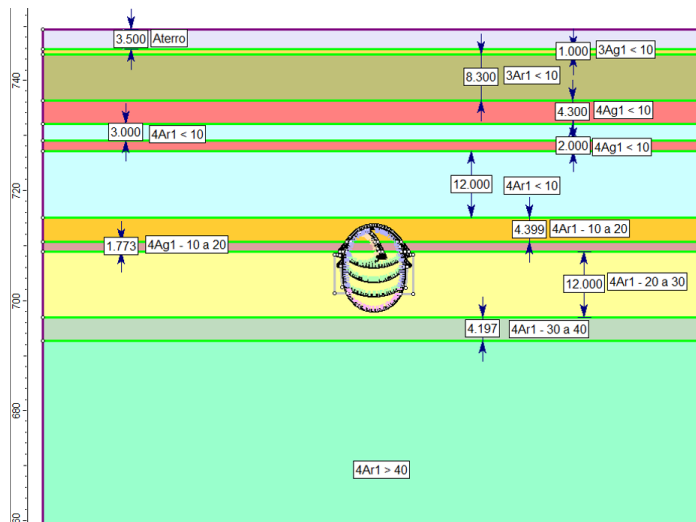












Figura 6. Contexto geológico geral do túnel considerado para o estudo (Fonte: Autores)

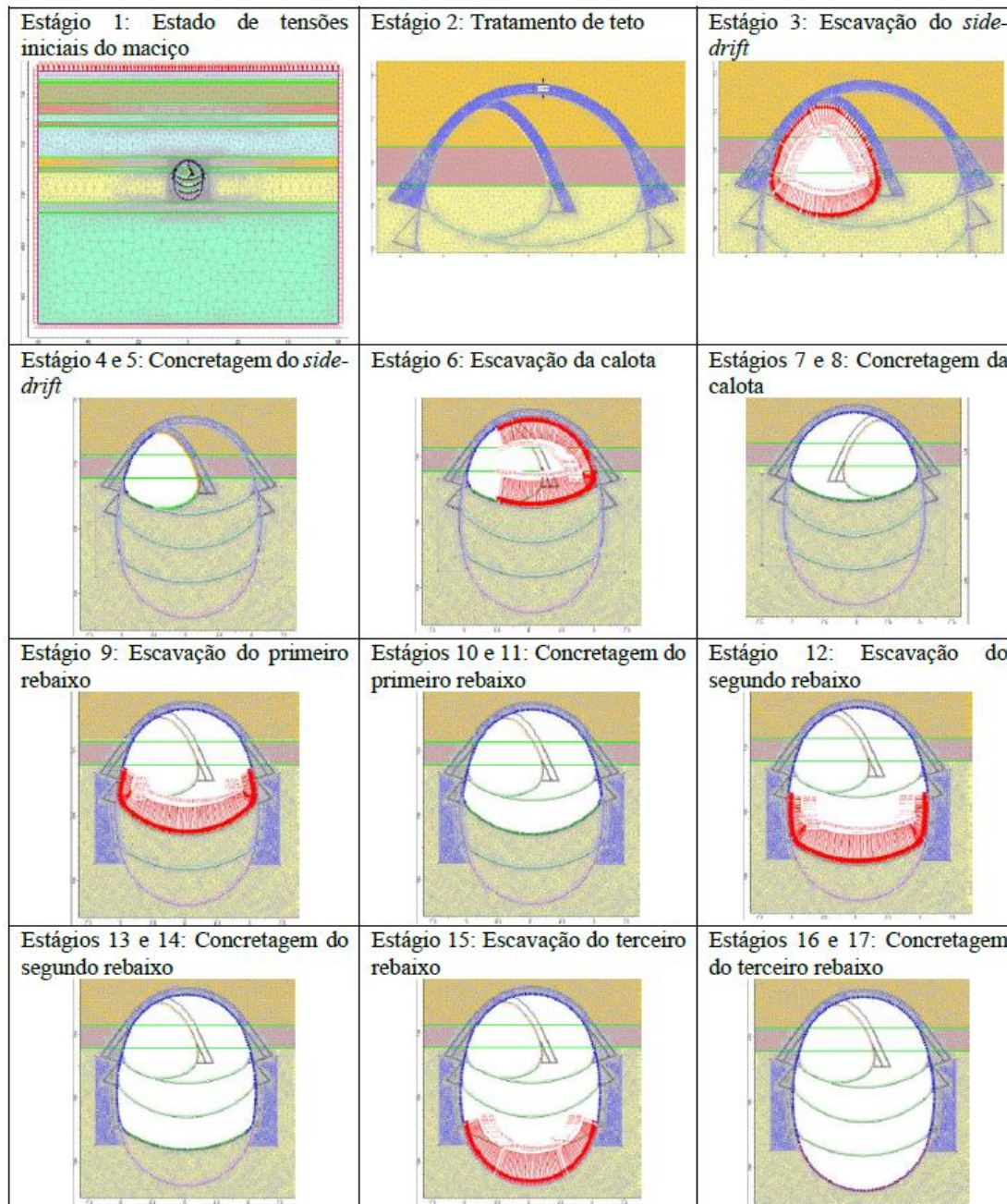
Realiza-se uma modelagem pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) no software RS2 da Rocscience®, considerando cada etapa da parcialização da escavação, com análise em estado plano de deformações (2D para túneis), para as quais a simulação dos avanços da escavação (alívio das tensões de 50%) que ocorrem ortogonalmente à seção de cálculo é efetuada mediante aplicação de tensões no revestimento/linha de escavação. Para a modelagem, mais especificamente, considera-se material linear elasto-plástico perfeito, além do módulo de deformabilidade do revestimento e alargamentos das sapatas ser igual à metade do valor final no trecho recém-escavado, devido ao processo de cura do concreto projetado ($f_{ck} = 35$ MPa). Os parâmetros geológico-geotécnicos adotados no modelo são apresentados na Tabela 1, estes valores foram obtidos através de valores tabelados na bibliografia (Miranda, 2021).

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

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Young's Modulus (kPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Friction Angle (peak) (deg)	Cohesion (peak) (kPa)
At		15	30000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	20	10
4Ar1 (IV) - 30 a 40		20.5	420000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	36	5
4Ar1 (I) < 10		19	60000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	30	5
4Ar1 (II) - 10 a 20		19.5	180000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	32	5
4Ar1 (V) > 40		21	540000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	38	5
4Ar1 (III) - 20 a 30		20	300000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	34	5
4Ag1 (I) < 10		19	45000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	20	30
3Ar1 (I) < 10		18	45000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	30	5
3Ag1 (I) < 10		17	45000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	22	30
4Ag1 (II) - 10 a 20		19	180000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	21	70

Na simulação do comportamento do terreno perante as escavações opta-se pela adoção de módulos de deformabilidade dos solos na condição de carregamento e descarregamento, pois considera-se que esta condição seja mais coerente com a trajetória de tensões a que o terreno afetado pela escavação efetivamente esteja sujeito. Adota-se para os módulos de deformabilidade no descarregamento valores equivalentes a 3 vezes ao dos módulos no carregamento. Aos materiais constituintes do terreno foi atribuído o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e modelo constitutivo reológico do tipo elasto-plástico perfeito. A Tabela 2 apresenta as etapas consideradas para o modelo.

Tabela 2. Etapas de escavação consideradas para o Modelo de Elementos Finitos (MEF) (Fonte: Autores)



As figuras 7 e 8 apresentam os resultados obtidos de tensão horizontal, vertical, deslocamentos verticais e plastificação dos elementos na etapa final.

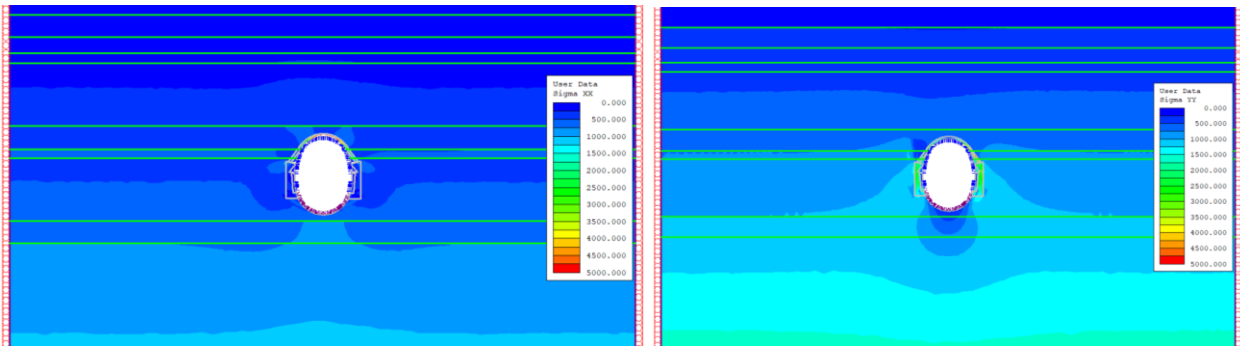


Figura 7. Tensões horizontais e verticais, respectivamente, na etapa final (Fonte: Autores).

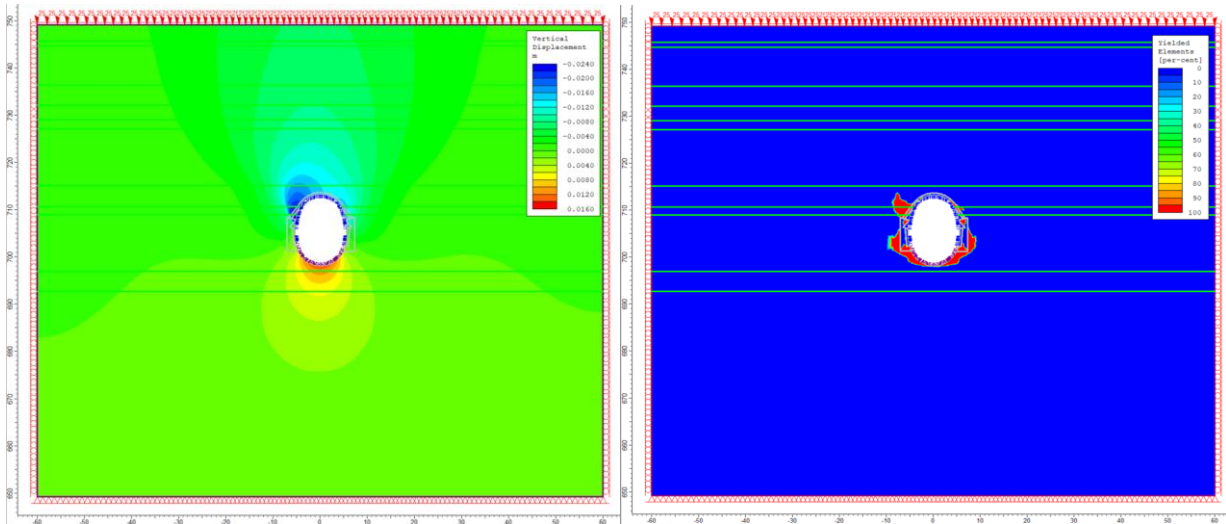


Figura 8. Deslocamentos verticais e plastificação dos elementos na etapa final (Fonte: Autores).

Observa-se na Figura 8 uma maior plastificação do maciço no entorno da parede lateral, sendo este o trecho mais crítico durante a escavação de túneis ovalizados/elípticos de grandes dimensões em solo. O tratamento lateral diminui a formação de mecanismos de instabilidade, deslocamentos e tensões nestes pontos.

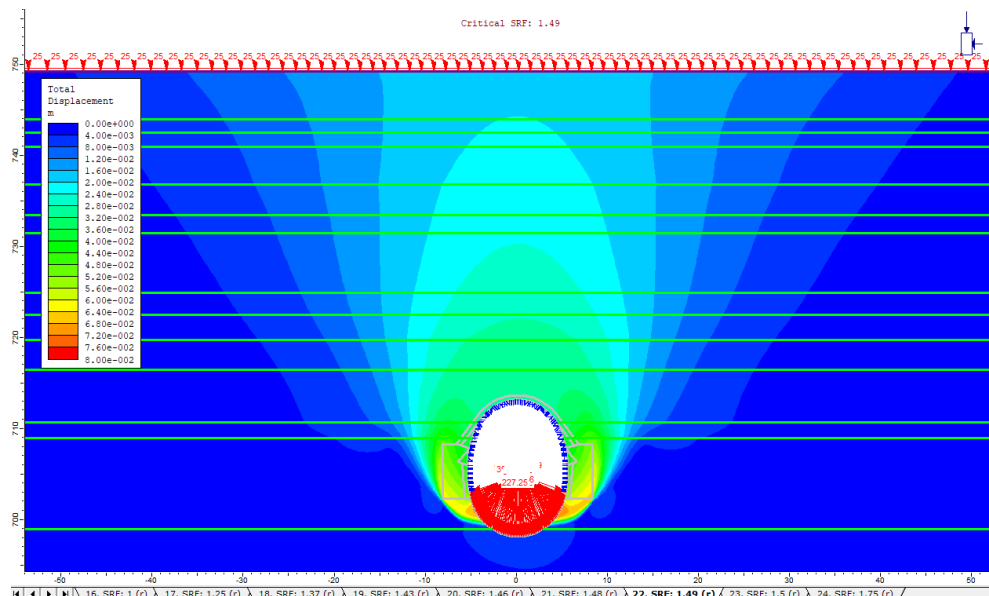


Figura 9. Verificação de estabilidade através do SRF considerando o tratamento de JG na parede lateral durante escavação do AID (Fonte: Autores).

Sem a representação do tratamento lateral da parede para escavação do AID, não houve convergência do modelo e obtenção de resultados de fator de segurança (FS) para a seção do túnel analisado. Nota-se que com a proteção foi obtido um FS de $1,49 > 1,3$ para obras provisórias (revestimento primário).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo indica que a adoção de tratamentos para o maciço a ser escavado, aliado à utilização de ponteiros filtrantes, principalmente nas suas paredes laterais, onde o risco de instabilidade é mais crítico, é uma boa solução. A metodologia foi comprovada com o uso de um modelo executado em Método de Elementos Finitos (MEF), onde foram analisadas as tensões resultantes, deslocamentos verticais, plastificação dos elementos, bem como a estabilidade da parede, lateral.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, G., Futai, M.M., Soares Jr., D. (2014) *Análise da escavação de um túnel da Linha 5 do Metrô de São Paulo em solo residual de gnaíse*, In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica- XVII COBRAMSEG, Goiânia. Anais... p.1-9.
- Amberg, R. (1983). *Design and construction of the Furka base tunnel*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 16(4), 215-231.
- Arastounia, M. (2016). *Automated as-built model generation of subway tunnels from mobile LiDAR data*. Sensors, 16(9), 1486.
- Carreira, W. (2014) *Análise dos Deslocamentos no Maciço, em Túnel executado pelo Método NATM*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 148 p. Disponível em: < <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-26082015-165940/pt-br.php>>. Acesso em 01 jan. 2024.
- 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.
- Miura, K. (2003). Design and construction of mountain tunnels in Japan. Tunnelling and Underground Space Technology, 18(2-3), 115-126.
- Shiau, J., Keawsawasvong, S., & Seehavong, S. (2022). *Stability of unlined elliptical tunnels in rock masses*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 55(11), 7307-7330.