

Análise Numérica de Túneis Rasos em Solos Não Coesivos

André Luiz Marques Junior

Discente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, andrelmjunior.8@gmail.com

Cleiton Cabral Martins

Discente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, cleitoncabralmartins@gmail.com

Aldo Durand Farfan

Professor Associado, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, aldo@uenf.br

RESUMO: A escavação de túneis em meios urbanos atualmente vem crescendo de forma exponencial, principalmente nas grandes cidades, onde o uso do espaço subterrâneo se apresenta como uma solução ao intenso número de veículos nas rodovias. Contudo, a instabilidade da face de escavação é uma das principais causas do colapso em túneis, fazendo com que este tema seja recorrente em inúmeros trabalhos. Deste modo, o propósito deste artigo é averiguar a estabilidade da face de túneis escavados em solos não coesivos, tendo como base alguns aspectos do colapso na face do túnel como o mecanismo de falha, recalque da superfície e as tensões atuantes. Os resultados preliminares em processo de calibração são apresentados neste trabalho, constatando-se que a pressão na frente de escavação e o campo de deslocamento estão alinhados com a literatura para a relação proposta. A simulação numérica considera uma relação (cobertura:diâmetro) de 0,5D. A simulação por redução de parâmetros de resistência é qualitativamente similar aos resultados experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Face de escavação, Análise Numérica, TBM.

ABSTRACT: The excavation of tunnels in urban environments is currently growing exponentially, especially in large cities, where the use of underground space is presented as a solution to the intense number of vehicles on the roads. However, the instability of the excavation face is one of the main causes of tunnel collapse, making this a recurring theme in many studies. Therefore, the purpose of this article is to investigate the stability of the face of tunnels excavated in non-cohesive soils, based on some aspects of tunnel face collapse such as the failure mechanism, surface settlement and acting stresses. Preliminary results in the process of calibration are presented in this paper, indicating that the pressure at the excavation face and the displacement field align with the literature for the proposed ratio. The numerical simulation considers a ratio (cover:diameter) of 0.5D. The simulation using reduced strength parameters is qualitatively similar to the experimental results.

KEYWORDS: Excavation face, Numerical Analysis, TBM.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os túneis urbanos desempenham um papel vital nas infraestruturas das cidades modernas, proporcionando rotas eficientes para o transporte de pessoas e mercadorias, bem como facilitando o acesso a serviços essenciais. No entanto, o planejamento, projeto e construção de túneis urbanos apresentam desafios únicos, incluindo o gerenciamento de impactos ambientais, a mitigação de perturbações nas comunidades locais e a garantia da segurança das estruturas e dos ocupantes. Dessa forma, uma compreensão abrangente das técnicas de construção, métodos de escavação, análise de estabilidade e gerenciamento de riscos é fundamental para o desenvolvimento bem-sucedido de túneis urbanos que atendam às necessidades da população e promovam o desenvolvimento sustentável das cidades.

Os túneis possuem uma complexidade que é comum a todos eles, independentemente de como ou onde estão sendo executados. A instabilidade da face de escavação em túneis é uma questão crucial na engenharia geotécnica, pois está diretamente relacionada à segurança e eficiência das operações subterrâneas (Zhang et al., 2024). A problemática dessa instabilidade surge devido à profundidade de implantação próxima à superfície, isto devido a requisitos de operacionalidade, bem como à geologia variável, que pode incluir diferentes tipos de solo, rocha, água subterrânea e pressões variáveis. Compreender e prever essas condições é essencial para evitar falhas, garantir a integridade estrutural e da infraestrutura urbana adjacente ao eixo do túnel.

Devido a esses fatores, diversos autores propuseram modelos matemáticos para prever o comportamento da frente de escavação de túneis rasos (Davis et al., 1980; Muhlhau, 1985; Leca e Dormieux, 1990; Mollon et al., 2009). As pressões de face dependem do método de escavação empregado, sendo um exemplo o método mecanizado, que utiliza tuneladoras. É importante ressaltar que, para prevenir o colapso da estrutura, uma determinação precisa da pressão de face limite se faz necessária.

O ano de 2021 marcou o octogésimo aniversário da invenção do método dos elementos finitos (MEF), que se estabeleceu como a principal ferramenta computacional para análise de design de engenharia e modelagem científica em uma ampla variedade de processos físicos. O MEF revolucionou profundamente a abordagem da modelagem científica e do design de engenharia, impactando áreas que vão desde automóveis, aeronaves e estruturas marítimas até pontes, rodovias e muito mais (Liu, W. K et al., 2022). Ademais, o MEF destaca-se como um dos principais métodos de solução aproximada para a análise de fenômenos e problemas de engenharia na atualidade.

Neste trabalho, foi adotada a modelagem numérica por meio do MEF. O software utilizado foi o Abaqus 3D, e a relação C/D (cobertura:diâmetro) considerada foi de 1/2D. A análise da instabilidade de face em túneis rasos, considerando pressões de face uniformes em solos não coesivos, se justifica, pois esses solos apresentam condições críticas em termos de estabilidade. Nestes casos, o principal fator de resistência é o ângulo de atrito interno entre as partículas do solo.

2 METODOLOGIA

O estudo de caso consiste em analisar a estabilidade da face de escavação de um túnel escavado em solo não coesivo, também denominado como solo granular ou arenoso. A escolha desse material deve-se ao trabalho experimental atualmente em execução na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, realizado em pequena escala na Centrífuga Geotécnica. O maciço fabricado consiste em um solo preenchido na caixa teste utilizando areia seca despejada com pluviador e altura controlada. A geometria para a modelagem numérica é semelhante à utilizada no ensaio físico. A Figura 1 ilustra o modelo do protótipo.

É importante ressaltar que as condições de contorno impostas no modelo numérico foram suficientemente afastadas do TBM. Assim, foram restritas as faces correspondentes aos planos x e y, e no fundo da caixa foram restritos todos os eixos. As tensões geostáticas iniciais foram geradas considerando o peso próprio do material. O modelo constitutivo utilizado para o solo foi definido com um módulo de elasticidade de 2.000 MPa, coeficiente de Poisson de 0,30, e a função de escoamento de Mohr-Coulomb com ângulo de atrito de 30°. Para as peças de aço, foram considerados um módulo de elasticidade de 200.000 MPa e um coeficiente de Poisson de 0,20.

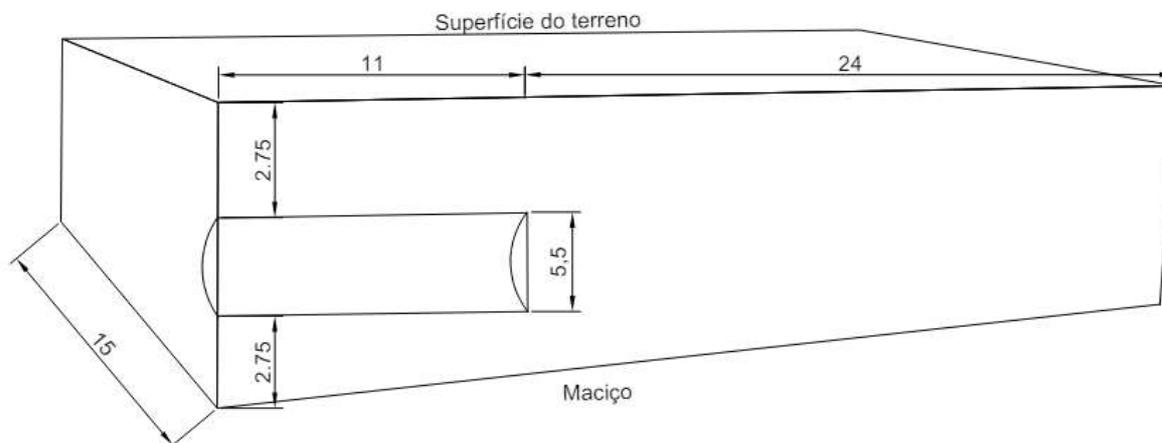


Figura 1. Dimensões do modelo numérico (em metros).

Inicialmente, a calibração da malha é realizada. Sendo assim, o semicírculo foi particionado em 20 partes ao redor da face de escavação do túnel. A Figura 2 ilustra a malha utilizada com um total de 9724 elementos quadráticos tipo C3D20R.

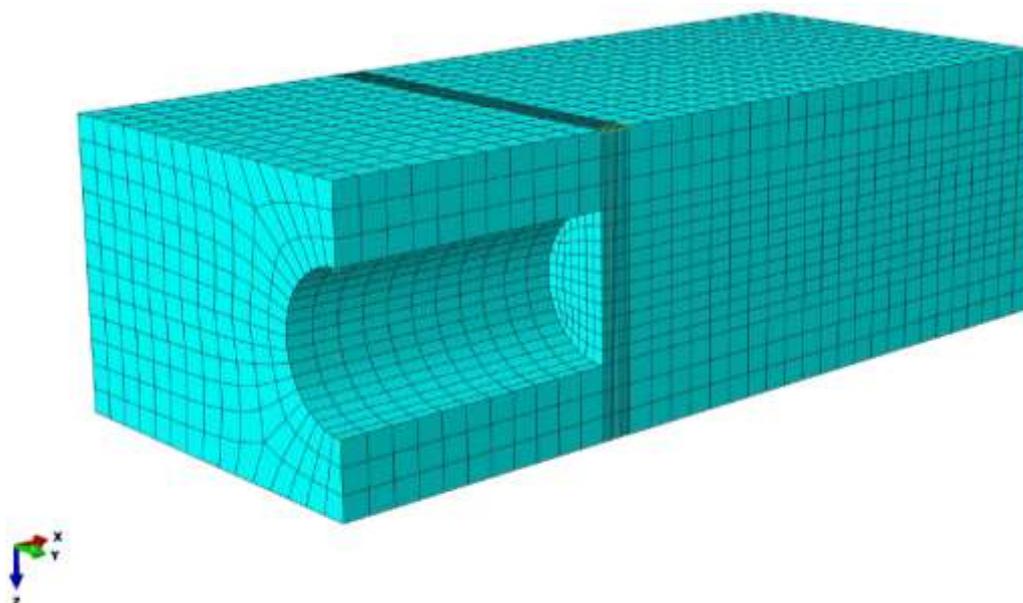


Figura 2. Malha utilizada no software Abaqus 3D.

Bishop (1996) constatou que o modelo de Mohr-Coulomb é o que melhor examina o comportamento de ruptura do solo, pois leva em consideração o atrito do solo e determina a ruptura quando a tensão de cisalhamento atinge seu valor máximo. Diversos estudos envolvendo a estabilidade da face de túneis consideram esse modelo uma vez que, ele representa às condições de solo estudadas. (Chounyu et al., 2023, Liu et al., 2019, Qarmout et al., 2019, Zamora Hernández et al., 2019, Zou et al., 2019).

Um aspecto crucial na simulação numérica é o comportamento do solo não coesivo. Para contornar este problema optou-se por atribuir duas funções de escoamento no maciço de solo. Na etapa de geração das tensões in-situ o maciço foi confinado com uma coesão de 10,0 kPa, este valor elevado de coesão ajuda a estabilizar o maciço de solo, permitindo que o modelo numérico alcance um estado de equilíbrio inicial que simula as condições reais do solo antes da escavação. E na etapa de alívio (escavação) foi considerado um valor mínimo para a coesão de 0,5 kPa, este valor menor reflete mais precisamente as condições reais do solo não coesivo, onde a coesão é muito baixa ou inexistente. A redução da coesão nesta fase é crucial para permitir que o modelo capture o comportamento plástico e o potencial de colapso do solo durante a escavação.

A utilização de diferentes valores de coesão nas simulações é uma estratégia para abordar de forma mais precisa o comportamento do solo não coesivo durante as fases de confinamento e escavação. Esta abordagem ainda está em processo de testes e validações com resultados experimentais. O presente trabalho apresenta resultados preliminares da simulação com uma relação C/D (cobertura:diâmetro) de 1/2D, sendo o diâmetro de 110mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação física representa uma escavação com Tunnel Boring Machine (TBM) do tipo Earth Pressure Balance (EPB). Para isso, na frente de escavação, coloca-se uma placa rígida em forma de semicírculo que é deslocada para trás, provocando alívio de tensões na frente de escavação. A simulação numérica busca representar esse comportamento, cujos resultados são mostrados na Figura 3. No eixo das abscissas, plota-se o deslocamento controlado da placa até 2% do valor do diâmetro, e nas ordenadas, o decréscimo das tensões devido ao alívio provocado pelo deslocamento da placa. A simulação numérica mostra um comportamento qualitativamente satisfatório, com uma coesão de 0,5 kPa.

As tensões horizontais na frente de escavação, após a geração das tensões in situ, estão próximas a 50 kPa. Com o deslocamento da placa rígida, inicia-se o processo de escavação, provocando uma queda súbita das tensões. Observa-se que, até um deslocamento de 1,7%, existe um descolamento da placa rígida junto à areia, resultando em tensões nulas na frente de escavação. No entanto, posteriormente, a placa rígida se descola da areia, gerando tensões de tração no intervalo de 1,7% a 1,8%. No final da simulação, quando a placa atinge o deslocamento total (prescrito), o campo de tensões busca o equilíbrio até atingir um valor de aproximadamente 45 kPa em compressão.

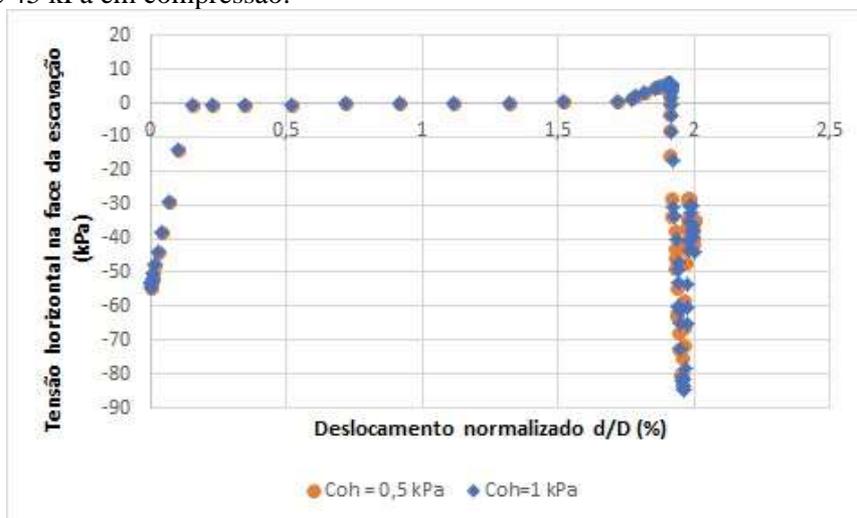


Figura 3. Gráfico de deslocamento normalizado vs tensões horizontais na face de escavação.

Os resultados relacionados aos deslocamentos exibem padrões semelhantes aos descritos por Idinger et al. (2011). Espera-se que o mecanismo de ruptura em túneis rasos siga um padrão em formato de "chaminé", conforme observado no estudo realizado em centrífuga, utilizando o software Particle Image Velocimetry (PIV), como evidenciado na Figura 4a.

A Figura 4b oferece uma representação visual do comportamento do campo de deslocamento conforme modelado no ABAQUS (protótipo em metros). A análise desses resultados revela uma notável semelhança qualitativa com as descobertas documentadas na literatura, como destacado por Idinger et al. (2011). Além disso, é importante ressaltar que o modelo numérico desenvolvido segue o mesmo padrão do modelo físico, composto por duas componentes distintas: solo arenoso e TBM.

A simulação da escavação ocorre com a retirada do material localizado diretamente na face de escavação, ou seja, o TBM é fixo e o material adjacente a ele é retirado ao desativar os elementos (em um meio disco de elementos na frente do solo). Esse método permite uma simulação precisa das interações entre os diferentes elementos envolvidos, além de garantir uma validação mais sólida e confiável dos resultados obtidos por meio da análise computacional.

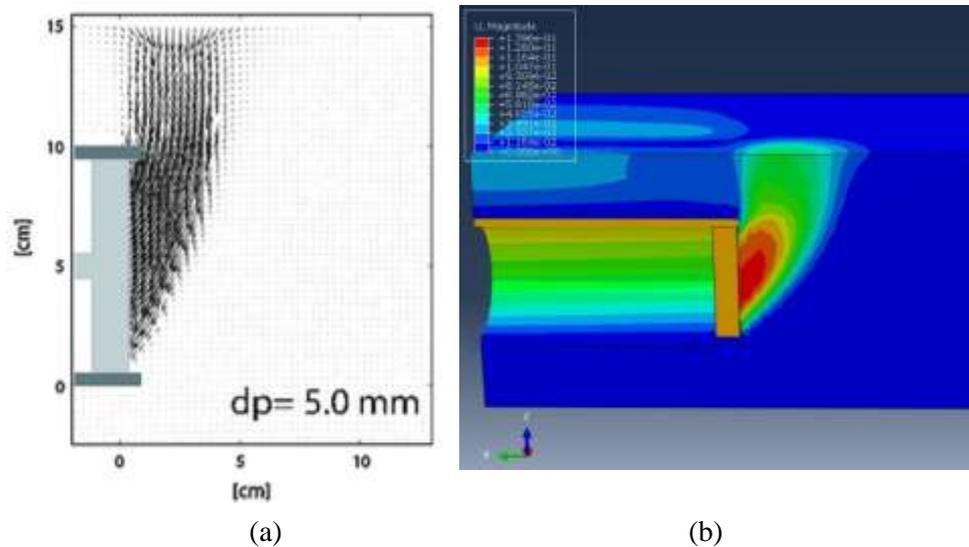


Figura 4. Campos de deslocamentos (a) Indiger et al., 2011 (b) protótipo do presente trabalho realizado no ABAQUS.

4 CONCLUSÃO

Observa-se na Figura 4b que a pressão na frente de escavação e o campo de deslocamento se alinham consistentemente com as informações presentes na literatura (Indiger et al., 2011), especialmente no caso da relação $C/D = 1/2D$. O campo de deslocamentos mostrado por PIV (Figura 4a) representa o comportamento de um meio discreto com recuo de 5% do TBM, enquanto a Figura 4b mostra o campo de deslocamentos em um meio contínuo com recuo do TBM de 2% do diâmetro. A metodologia da simulação por redução de parâmetros de resistência se mostra qualitativamente similar ao experimental.

Portanto, os resultados preliminares deste estudo são promissores, destacando a necessidade de explorar outros recursos computacionais para meios discretos e a relação de cobertura e diâmetro do túnel para valores superiores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e o Auxílio à Pesquisa (APQ1-2021).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.W. Bishop. (1996). The strength of soils as engineering materials. *Geotechnique*, 16 (2), pp. 91-130, 10.1680/geot.1966.16.2.91
- Assis, A. P. (2002a). *Mecânica das Rochas: Obras Subterrâneas*. Brasília, DF: Departamento de Engenharia Civil, UnB.
- Assis, A. P. (2002b). *Métodos estatísticos e probabilísticos em geotecnia*. Brasília: Universidade de Brasília
- Chunyu, L., Zhengpeng, J., Zhi, L., Kefeng, X., & Bohan, W. (2023). Analyses on face stability of shallow tunnel considering different constitutive models. *Frontiers in Materials*, 9, 10.3389/fmats.2022.1112425
- Davis, E. H., Gunn, M. J., Mair, R. J., & Seneviratne, H. N. (1980). The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material. *Geotechnique*, 30(4), 397-416.
- Hernández, Y. Z., Farfán, A. D., & de Assis, A. P. (2019). Three-dimensional analysis of excavation face stability of shallow tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 92, 10.1016/j.tust.2019.103062

- Idinger, G., Aklik, P., Wu, W., & Borja, R. I. (2011). Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel. *Acta Geotechnica*, 6, 105-117. 10.1007/s11440-011-0139-2
- J. Zou, Z. Qian, X. Xiang, G hui Chen. (2019). Face stability of a tunnel excavated in saturated nonhomogeneous soils. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 83, pp. 1-17, 10.1016/j.tust.2018.09.007
- Katebi, H., Rezaei, A. H., Hajialilue-Bonab, M., Tarifard, A. (2015). Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, 67–78. 10.1016/j.tust.2015.04.004
- Leca, E., & Dormieux, L. (1990). Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material. *Géotechnique*, 40(4), 581-606.
- Liu, W. K., Li, S., & Park, H. S. (2022). Eighty years of the finite element method: Birth, evolution, and future. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(6), 4431-4453.
- M. Qarmout, D. König, P. Gussmann, M. Thewes, T. Schanz. (2019). Tunnel face stability analysis using Kinematical Element Method. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 85, pp. 354-367, 10.1016/j.tust.2018.11.024
- Mollon, G., Dias, D., & Soubra, A. H. (2009). Probabilistic analysis and design of circular tunnels against face stability. *International Journal of Geomechanics*, 9(6), 237-249.
- Mühlhaus, H. B. (1985). Lower bound solutions for circular tunnels in two and three dimensions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 18(1), 37-52.
- X. Liu, F. Wang, H. Fang, D. Yuan. (2019). Dual-failure-mechanism model for face stability analysis of shield tunneling in sands. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 85, pp. 196-208, 10.1016/j.tust.2018.12.003
- Zhang, Z., Ji, J., Guo, X., & Goh, S. H. (2024). Inverse reliability analysis and design for tunnel face stability considering soil spatial variability. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(5), 1552-1564. 10.1016/j.jrmge.2023.07.015