

Comparativo entre procedimentos de análises de consolidação em escavação de túneis

Maria Fernanda Farias dos Santos

Engenheira Civil, EESC-USP e CJC Engenharia e Projetos, São Paulo, Brasil, mf.farias@usp.br

Gabriela Reis Piazzetta

Geóloga M.e, CJC Engenharia e Projetos e UTFPR, Curitiba, Brasil, grpiazzetta@gmail.com

Fernando Luiz Lavoie

Engenheiro Civil Dr, EESC-USP, São Carlos, Brasil, fernando.lavoie@usp.br

Tarcísio Barreto Celestino

Engenheiro Civil Dr, EESC-USP, São Carlos, Brasil, tbcelestino@gmail.com

Pedro Teodoro França

Engenheiro Civil M.e, Diretor CJC Engenharia e Projetos, São Paulo, Brasil, pedro.franca@cjceng.com.br

RESUMO: A demanda por expansão de mobilidade em centros urbanos leva a necessidade do uso do espaço subterrâneo através da implementação de túneis para uso de sistemas de transporte. O risco envolvido nessas obras aumenta devido a densidade ocupacional da região de implementação, levando a necessidade de análises numéricas que contemplem mais variáveis, tornando possível identificar, isoladamente, o efeito das escolhas construtivas. Este artigo analisa o comportamento do maciço quando exposto a escavações subterrâneas, apresentando duas permeabilidades, alta e baixa, a tempo infinito e a tempo determinado. São analisadas a influência da escavação e da drenagem, de forma isolada e concomitante, em quatro modelos bidimensionais, alta permeabilidade a tempo infinito e a tempo determinado, e baixa permeabilidade com as mesmas opções de tempo. Os resultados apresentam as alterações na poropressão e nas tensões, efetiva e total, decorrentes exclusivamente do processo de escavação (sem qualquer drenagem do maciço), alterações decorrentes da drenagem (sem qualquer efeito da escavação) e dos dois efeitos somados (escavação e drenagem). Conclui-se, é possível visualizar as alterações de tensões que ocorrem durante a escavação de forma isolada e ambas as considerações sobre tempo apresentam resultados satisfatórios, a escolha entre eles depende da necessidade do projeto.

PALAVRAS-CHAVE: túneis, análise acoplada; análise não-acoplada, análise 2D, interação sólido-fluido

ABSTRACT: The demand for mobility expansion in urban centers leads to the need to use underground space through the implementation of tunnels for the use of transport systems. The risk involved in these works increases due to the occupational density of the implementation region, leading to numerical analyses that consider more variables, making it possible to identify isolated effect of construction choices. This article analyzes the behavior of the massif when exposed to underground excavations, presenting two permeabilities, high and low, with infinite time and with a determined time. The influence of excavation and drainage are analyzed, separately and concomitantly, in four two-dimensional models, high permeability at infinite time and at a determined time, and low permeability with the same time options. The results present changes in pore pressure and tensions, effective and total, resulting exclusively from the excavation process (without any drainage of the massif), changes resulting from drainage (without any effect of excavation) and the two combined effects (excavation and drainage). In conclusion, it is possible to visualize the stress changes that occur during excavation in isolation and both time considerations present satisfactory results, the choice between them depends on the project's needs.

KEYWORDS: tunnels, coupled analysis, uncoupled analysis, bidimensional analysis, solid-fluid interaction

1 INTRODUÇÃO

Para atender à crescente demanda por transporte público nas grandes cidades é necessário executar obras de infraestrutura em centros urbanos densamente povoados, a alta ocupação eleva o dano potencial associado a essas obras (Zhou et al, 2020). De modo geral, construções subterrâneas constituem um sistema complexo devido as incertezas nas condições hidrogeológicas e interações não lineares que podem conduzir ao mecanismo de ruptura (Bryn et al, 2017). Para mitigar esses riscos, propõe-se o desenvolvimento de análises mais complexas, por exemplo com considerações sobre o adensamento do solo.

No cálculo de adensamento em fundações, o problema é facilmente entendido por se tratar de uma situação de carregamento seguido por dissipação da poropressão (Cintra et al, 2011). Já em obras de túneis, além da alteração no estado de tensões ser mais complexa, por envolver carregamentos e descarregamentos nas tensões desviadores e tensões médias, o túnel atua como um grande dreno para as águas subterrâneas, condicionando o caminho preferencial da água para o interior da estrutura, o que pode ser visto em Yoo (2016). Isso resulta na redução parcial ou total do nível freático (ou carga piezométrica) com alteração da pressão neutra e tensão média efetiva do maciço. Ou seja, em um túnel, a alteração das tensões efetivas é decorrente tanto da alteração das tensões totais pelo processo de escavação que altera a poropressão, quanto da alteração da poropressão, pelo processo de drenagem do túnel, que altera diretamente as tensões efetivas (Yoo, 2005). Ambos os processos são impactados no tempo pela velocidade da escavação, pela permeabilidade do maciço e potencial de realimentação do aquífero na zona afetada pela execução do túnel. Yoo e Kim (2006) assumem que os recalques resultantes de escavações subterrâneas são causados pelo efeito de descarregamento da escavação combinado ao rebaixamento do lençol freático.

Visando contribuir com o entendimento do desenvolvimento do processo de consolidação de solo aplicado a escavação de túneis, esse trabalho comparou através de análises bidimensionais, diferentes considerações sobre consolidação, ou seja, as interações entre poropressão, tensões e deformações a fim de compreender o impacto dessas considerações na análise do maciço durante o processo de escavação de túneis.

Os modelos numéricos usualmente abordam a relação entre comportamento da água e o comportamento dos sólidos de três formas:

- None: alterações na poropressão não afetam as deformações e as deformações não afetam a poropressão;
- Não acoplado: as alterações da poropressão afetam as deformações, mas as deformações não alteram a poropressão;
- Acoplado: alterações na poropressão afetam as deformações e vice-versa, considerando a influência do tempo.

Sendo None a análise menos complexa e acoplado a análise mais complexa em termos de interação sólido-fluido, esse artigo apresenta uma comparação de análises acopladas e none em dois tipos de maciço alta e baixa permeabilidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O Princípio das Tensões Efetivas (Terzaghi, 1936) afirma que todos os efeitos mensuráveis nas alterações de tensões, deformações e resistência ocorrem devido as alterações das tensões efetivas. Quando a condição de equilíbrio é alterada surgem alterações na poropressão. O processo de consolidação se conclui quando o excesso de poropressão é dissipado da parcela líquida para a parcela sólida, ou seja, para o solo, assim através dessa dissipação são alteradas as condições de tensões efetivas. Sem alterações nas tensões efetivas não ocorrem alterações mensuráveis no solo.

A velocidade de dissipação varia conforme as características do solo, em solos arenosos pode ocorrer de forma tão rápida que não se identifica excesso de poropressão, assim considera-se o comportamento como drenado. Para solos argilosos, é possível identificar o excesso de poropressão e o tempo para dissipação, considera-se assim o comportamento não drenado (Atkinson e Mair, 1981).

Levando em consideração a consolidação além do período construtivo, Shivaie et al (2020) estuda a consolidação a longo prazo que ocorre em solos de baixa permeabilidade, caso dos solos argilosos, que podem continuar mesmo anos após a construção. Laver (2010) afirma que a consolidação a longo prazo tende a ser mais complexa do que a consolidação que ocorre durante a escavação, pois, o tempo para que se complete a consolidação varia em função dos parâmetros do solo.

Para que as tensões efetivas se alterem é necessário que as tensões totais sejam alteradas por carregamento ou descarregamento dando origem ao excesso de poropressão. A determinação da alteração de tensões como em condição drenada ou não drenada ocorre através do comparativo entre a taxa de alteração das tensões totais comparada com a taxa de dissipação do excesso de poropressão.

O comportando de drenagem do maciço varia ao longo do estágio de construção de um túnel. Segundo França (2006) a escavação de um túnel remove as tensões existentes no contorno da escavação, alterando as tensões iniciais que estavam em equilíbrio, levando a necessidade de rearranjo para que se encontre uma nova situação de equilíbrio.

Na Figura 1, são ilustradas as seguintes situações, em (a) o estágio antes da construção, em (b) a frente de escavação e em (c) após a instalação do revestimento, é possível identificar na figura a variação no nível freático pelas cotas h_0 , h_i e h_f . Antes da construção o fluxo de água é considerado permanente, na face de escavação há alteração do fluxo hidrostático, momento que se define se o descarregamento é drenado ou não drenado, e após a instalação do revestimento, o fluxo hidrostático volta a ser considerado permanente, porém pode assumir níveis diferentes no prévio a escavação (Atkinson e Mair, 1981).

Considerando as análises numéricas, a decisão de considerar o comportamento como drenado ou não drenado está associada a escolha de análise a ser realizada. Esse estudo considera as situações a/c que são representadas pelas análises no tempo infinito – carga hidráulica em equilíbrio, e a condição b onde o descarregamento atua na poropressão e desenvolve-se a condição drenada/não drenada de acordo com o material escavado.

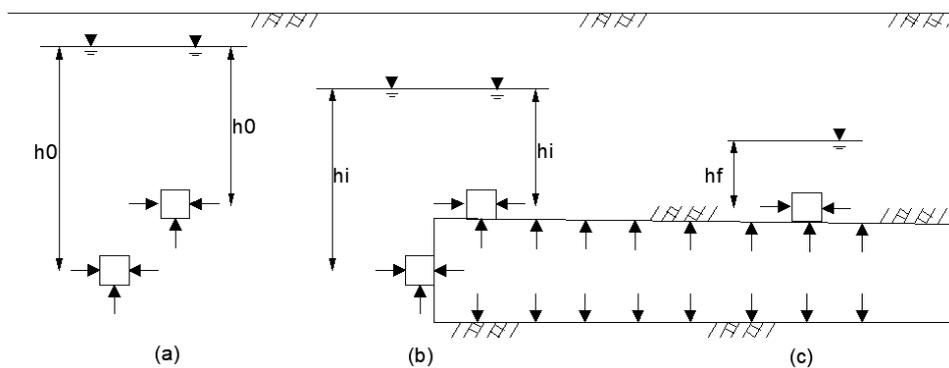


Figura 1. Estágios da construção de um túnel: (a) o estágio antes da construção, (b) a frente de escavação e (c) após a instalação do revestimento (Adaptado de Atkinson e Mair, 1981)

2.1 Alternativas para a análise de consolidação

Entre as opções possíveis para análises computacionais de consolidação utilizando elementos finitos pode-se realizar análise sem considerações sobre acoplamento, a análise não-acoplada e a análise acoplada. Além das considerações gerais do modelo, é possível separar o processamento por fases que podem ser consideradas completamente drenadas, drenadas ou não-drenadas. O material também pode ser considerado como drenado ou não drenado, mas a condição não pode ser alterada por fases.

Na condição completamente drenada não há excesso de poropressão, considera-se análise no tempo infinito e resultado refere-se a uma análise de fluxo permanente. Na condição drenada pode ocorrer excesso de poropressão, há variação de volume total, a drenagem é função do tempo e o fluido possui liberdade de se movimentar para dentro e para fora do modelo. Já na condição não drenada, não há variação volumétrica, o excesso de poropressão é função do carregamento ou descarregamento no caso de escavação de túneis, e o fluido não pode se mover para dentro e para fora do modelo. O carregamento de água pode ser considerado como carga imposta, fluxo permanente a tempo infinito ou fluxo transiente que varia junto com o tempo.

2.2 Análise bidimensional

o modelo numérico foi desenvolvido no programa RS2 (Rocscience, 2024), versão 11.021 que é um programa bidimensional que utiliza o método de elementos finitos para simular o comportamento do maciço. O programa permite a simulação sequencial de eventos construtivos e tem como principal objetivo avaliar o impacto das escavações no maciço envolvente ao túnel.

O modelo numérico considera um túnel circular genérico, com 10 m de diâmetro, situado a 20 m de profundidade (cobertura de 2 diâmetros) e escavado em maciço homogêneo e isotrópico. Foram realizadas duas análises, uma sem consideração sobre acoplamento e a outra análise acoplada. A principal diferença entre os processamentos é a consideração da influência do tempo.

2.2.1 Condições do modelo

Na Figura 2 é apresentada a geometria do modelo e as dimensões do túnel em metros. A malha foi discretizada com 3320 elementos triangulares com 6 nós e adotou-se a distribuição gradual de elementos (maior densidade próximo à escavação). Na base do modelo foram aplicadas restrições em XY e nas laterais apenas em X. O nível freático foi imposto 5 metros acima da geratriz superior do túnel.

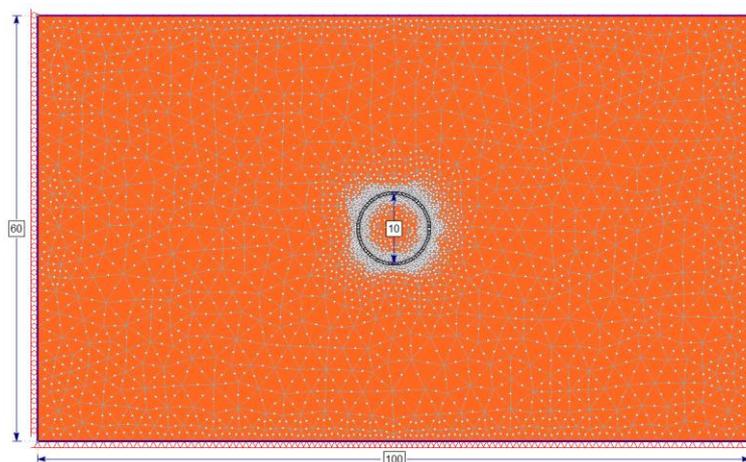


Figura 2. Dimensões da malha em metros

2.2.2 Parâmetros

Optou-se por dois solos com os parâmetros iguais de resistência e deformabilidade, variando a permeabilidade. O comportamento do material é definido pelo modelo elástico linear plástico perfeito com superfície de plastificação coincidente com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. A Tabela 1 apresenta os parâmetros dos solos adotados.

Tabela 1 – Parâmetros de solo

Material	γ (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)	E (MPa)	ν	k0	k (m/s)
Alta permeabilidade	20	30	20	30	0,3	0.7	10^{-4}
Baixa permeabilidade	20	30	20	30	0,3	0.7	10^{-7}

2.2.3 Análise de percolação

Na análise de fluxo permanente calcula-se a percolação nos elementos finitos em estado estacionário para determinar a distribuição da poropressão considerando as condições de contorno da água subterrânea impostas ao modelo. Nesta análise a permeabilidade dos materiais não tem influência na distribuição de poropressão, já que se considera o tempo infinito. análise de percolação em fluxo permanente é realizada antes da análise de tensão, para que a poropressão calculada possa ser utilizada pela análise de tensão.

Na análise de fluxo transiente define-se a duração de cada estágio de tempo transitório e as condições de contorno da água. A rede de fluxo é estabelecida de acordo com a permeabilidade dos materiais e o tempo. Nessa análise a percolação é calculada em paralelo as tensões, não de forma isolada. Pode-se determinar as condições iniciais de poropressão e/ou as condições de poropressão por estágio do cálculo.

2.2.4 Etapas do modelo

A diferença entre os dois tipos de análise está na influência do tempo. A análise sem considerações sobre acoplamento é calculada a tempo infinito e na análise acoplada foram definidos tempo para cada uma das fases, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo dos estágios da análise acoplada

Stages	Análise None		Análise Acoplada	
	Descrição	Tempo	Descrição	Tempo
1	Condição Inicial	-	Condição Inicial	0 hora
2	Escavação	-	Escavação	0.01 hora
3	-	-	Escavação	1 hora
4	-	-	Escavação	2 horas
5	-	-	Escavação	4 horas
6	-	-	Escavação	8 horas
7	-	-	Escavação	12 horas
8	-	-	Escavação	24 horas
9	-	-	Escavação	48 horas
10	-	-	Escavação	72 horas
11	-	-	Escavação	7 dias
12	-	-	Escavação	1 mês
13	-	-	Escavação	2 meses
14	-	-	Escavação	3 meses
15	-	-	Escavação	4 meses
16	-	-	Escavação	5 meses
17	-	-	Escavação	6 meses
18	-	-	Escavação	1 ano
19	-	-	Escavação	5 anos
20	-	-	Escavação	10 anos
21	-	-	Escavação	50 anos

A técnica do alívio de tensões foi adotada para simular o avanço da frente de escavação, onde se estabelece uma relação entre a tensão vertical inicial e a tensão vertical no momento de instalação do revestimento. Em túneis escavados por tuneladora impõe-se mesma taxa de alívio (α) em todo o contorno. Adotou-se $\alpha = 50\%$, conforme França (2006), na análise considerando apenas a escavação e na análise total. Na análise considerando apenas a drenagem não se considerou alívio na escavação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises sem consideração sobre acoplamento, “none”, apresentaram resultados coincidentes para alta e baixa permeabilidade, isso ocorre por serem análises a tempo infinito. Nessas análises, o stage 2 apresenta os resultados do processamento, esses serão inseridos no gráfico apenas como “none”, sem descrição sobre permeabilidade.

Abaixo são apresentadas as variações de tensões em função do tempo em horas considerando as três análises finais, “none”, acoplada de alta permeabilidade e acoplada de baixa permeabilidade. As tensões foram analisadas considerando as variações de tensões em três cenários:

- Tensões resultantes exclusivamente do processo de escavação (sem drenagem), Figura 3;
- Tensões resultantes exclusivamente do processo de drenagem (sem escavação), Figura 4;
- Tensões resultantes dos processos de escavação e drenagem concomitantes, Figura 5.

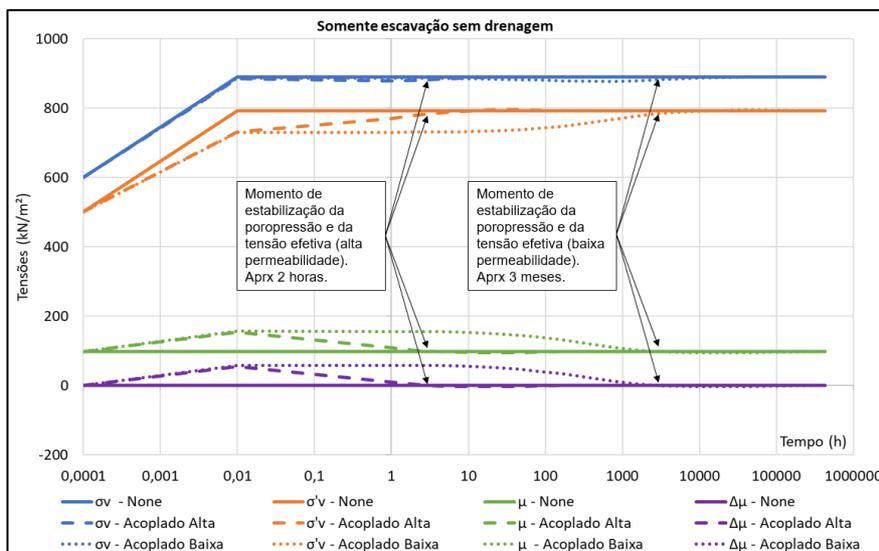


Figura 3. Tensões resultantes exclusivamente do processo de escavação (sem drenagem)

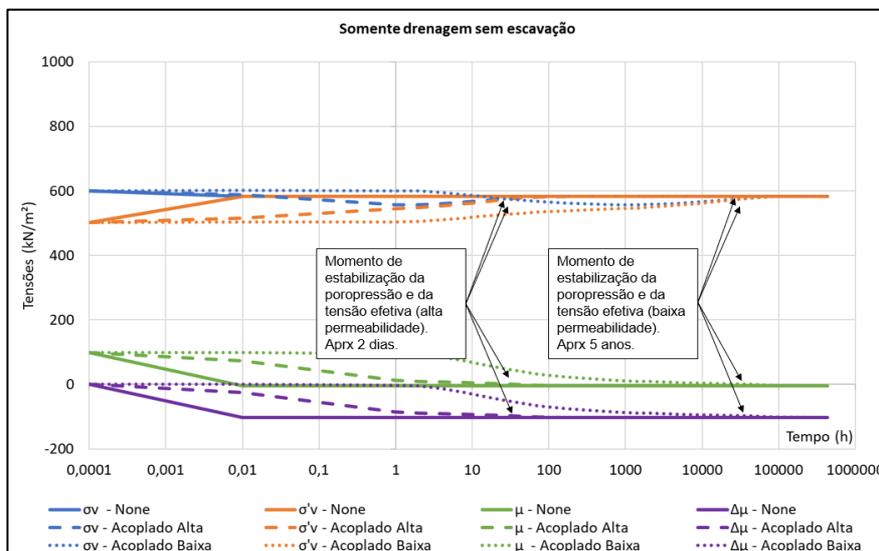


Figura 4. Tensões resultantes exclusivamente do processo de drenagem (sem escavação)

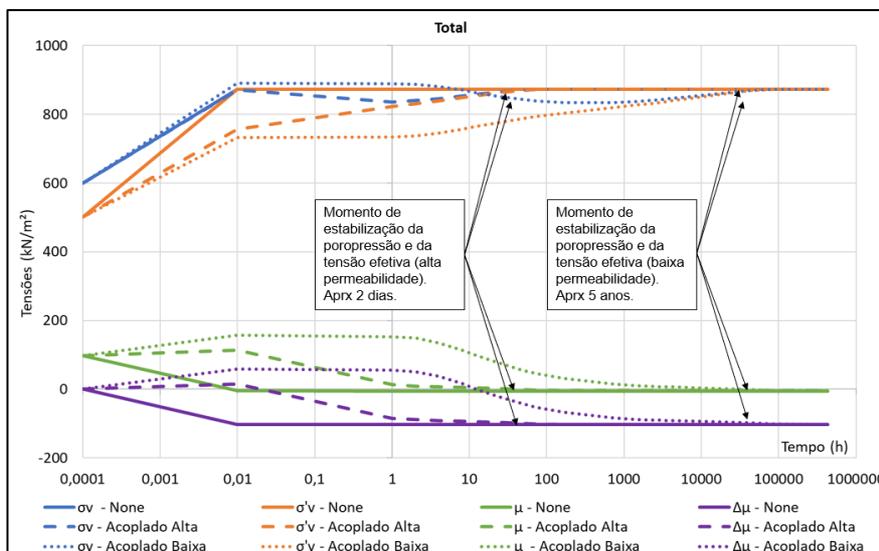


Figura 5. Tensões resultantes dos processos de escavação e drenagem concomitantes

Na tabela abaixo são apresentados os tempos em cada análise onde ocorreram estabilização das poropressão e das tensões efetivas. São apresentados separadamente os tempos para estabilização das alterações nas tensões e pressões decorrentes exclusivamente do processo de escavação (sem qualquer drenagem do maciço) e para os efeitos decorrentes da drenagem (sem qualquer efeito da escavação), quando o túnel funciona como um dreno. Também são apresentados os tempos necessários para estabilização dos dois efeitos somados (escavação e drenagem), que é o que mais se assemelha ao problema da obra real de um túnel.

Tabela 3 – Tempo necessário para estabilização das tensões

Tensões resultantes da	Acoplado		None
	Baixa permeabilidade ($k = 10^{-7}$)	Alta permeabilidade ($k = 10^{-4}$)	
Escavação	3 meses	2 horas	-
Drenagem	5 anos	2 dias	-
Escavação + Drenagem	5 anos	2 dias	-

Na análise sem consideração sobre acoplamento, no momento da escavação, considerado como 0.01h, as tensões atingem a condição de equilíbrio que será alcançada pelas demais análises somente após determinado período. Nas análises acopladas pode-se observar um comportamento similar entre maciços, porém o maciço de baixa permeabilidade apresenta um processo de estabilização mais suave quando comparado ao de alta permeabilidade, que é mais abrupto. Na escavação a tensão vertical total alcança um ponto de pico que decresce e retorna a aumentar até a estabilização. A tensão vertical efetiva apresenta aumento considerável no mesmo período de pico da tensão vertical total mantendo comportamento crescente até a estabilização.

Como todas as alterações nas tensões no inicialmente absorvidas pela água, a poropressão e o excesso de poropressão alcançam seu valor máximo no momento da escavação, após o pico assumindo comportamento decrescente referente a dissipação da poropressão. Observa-se que a dissipação no maciço de baixa permeabilidade ocorre de forma mais lenta do que o maciço de alta, isso se deve ao comportamento comum das argilas e areias., referente ao já mencionado comportamento drenado e não-drenado.

Com relação aos efeitos decorrentes exclusivamente do processo de escavação, o tempo ao longo do qual ocorre a dissipação da poropressão e estabilização das tensões efetivas exerce grande influência na estabilidade e deformações do maciço no entorno do túnel, em especial na etapa de escavação (passo de avanço), onde o maciço está exposto no contorno escavado. O tempo de dissipação da poropressão também influencia na área ao redor do túnel potencialmente afetada pela escavação e, também está intimamente ligado com o *stand up time* do maciço, tempo no qual o maciço se apresenta estável. O maior *stand up time* dos maciços argilosos em comparação com o *stand up time* dos maciços arenosos, entre outros aspectos, está diretamente relacionado com o maior tempo necessário para dissipação da poropressão em maciços com menor permeabilidade.

Com relação aos efeitos decorrentes exclusivamente da drenagem pelo túnel, onde o túnel funciona como um canal de fluxo preferencial, a velocidade do tempo de alteração da poropressão está intimamente ligado com a abrangência e raio de influência do rebaixamento no entorno do túnel. Em maciços com alta permeabilidade, tem-se um impacto mais abrangente; em maciços baixa permeabilidade, tem-se uma zona de abrangência localizada.

4 CONCLUSÕES

As variáveis analisadas neste trabalho constituem considerações de grande importância no cenário de escavações de túneis, os resultados obtidos mostram que a tempo infinito, a poropressão e as tensões efetivas e totais alcançam o mesmo valor. Através das diferentes interações é possível identificar as alterações nas tensões e pressões decorrentes exclusivamente do processo de escavação (sem qualquer drenagem do maciço), as alterações decorrentes da drenagem (sem qualquer efeito da escavação) e dos dois efeitos somados (escavação e drenagem), tornando mais clara a compreensão da interação água-sólido. As análises reafirmaram o comportamento previsto da areia, onde a estabilização das tensões e deslocamentos ocorre de forma mais rápida do que a argila, devido a diferença entre permeabilidades. Ambas as análises, a tempo infinito ou com

determinação do tempo por estágios, apresentam resultados satisfatórios, a escolha entre eles depende da necessidade do projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CJC Engenharia e Projetos por ceder tempo e recursos para o desenvolvimento deste artigo e a equipe da Rocscience, em especial ao Dr. Alireza Azami, pela atenção e disponibilidade para conversas que nos possibilitaram materializar os conceitos discutidos.

O primeiro e o terceiro autores agradecem à Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação (PRPI) da Universidade de São Paulo (USP) pelo auxílio financeiro concedido por meio do Programa de Apoio aos Novos Docentes USP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkinson, J. H., Mair, R. J. (1981) *Soil mechanics aspects of soft ground tunnelling*. Ground Engineering. Volume 14. Issue 5. P. 20-38.
- Bryn, M. J., Afonin, D. A., Bogomolova, N. N. (2017). *Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction*, Procedia Engineering. Volume 189, p 386-392.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N., Albiero, J. H. (2011). *Fundações diretas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Laver, R. (2010). *Long-term behaviour of twin tunnels in London Clay*. Tese de Doutorado. Universidade de Cambridge, Cambridge.
- França, P. T. (2006). Estudo do comportamento de túneis: análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia – USP, São Paulo.
- Shivaei, S., Hataf, N., Pirastehfar, K. (2020). *3D numerical investigation of the coupled interaction behaviour between mechanized twin tunnels and groundwater – A case study: Shiraz metro line 2*. Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 103
- Terzaghi, K. (1936). *The shearing resistance of saturated soil and the angle between the planes of shear*. 1st International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Volume 1. P.54 – 56
- Yoo, C. (2005). *Interaction between tunneling and groundwater—numerical investigation using three-dimensional stress-pore pressure coupled analysis*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, 131(2), p 240-250.
- Yoo, C., & Kim, S. B. (2006). *Stability analysis of an urban tunnelling in difficult ground condition*. Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 21, p 351–352.
- Yoo, C. (2016) *Ground settlement during tunnelling in groundwater drawdown environment – Influence factors*. Underground Space. Volume 1, Issue 1, p 20-29
- Zhou, C., Kong, T., Jiang, S.N., Chen, S.D., Zhou, Y., Ding, L.Y. (2020). *Quantifying the evolution of settlement risk for surrounding environments in underground construction via complex network analysis*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 103.