



Análise de elementos finitos da deformação da rocha em túneis duplos profundos

Felipe P. M. Quevedo¹, Carlos A. M. M. Colombo¹, Bianca M. Girardi¹, Denise Bernaud¹, Samir Maghous¹

¹*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Av. Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre 90.035-190, RS, Brasil Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre, 90.035-190, RS, Brasil motta.quevedo@ufrgs.br, ca-colombo@hotmail.com, eng.biancagirardi@gmail.com denise.bernaud@ufrgs.br, samir.maghous@ufrgs.br*

Resumo. Com base em uma análise tridimensional de elementos finitos, esta contribuição investiga a resposta irreversível instantânea induzida pelo comportamento constitutivo do maciço rochoso no perfil de convergência de túneis gêmeos com galeria transversal. No nível do material rochoso, as equações de estado elastoplástico baseadas em uma superfície de escoamento Drucker-Prager com uma regra de fluxo associada são adotadas na modelagem. Com relação ao suporte do túnel, a formulação leva em conta a presença de um revestimento elástico do tipo concreto projetado. Do ponto de vista computacional, o método de desativação-ativação é usado para simular o processo de escavação e a instalação do revestimento. A precisão das previsões de elementos finitos é avaliada por meio de comparações com as soluções analíticas disponíveis formuladas em um cenário simplificado para a configuração do túnel duplo. Um estudo paramétrico investiga a interação mútua induzida pela proximidade dos túneis e a influência da rigidez do revestimento.

Palavras-chave: Túneis gêmeos, Galeria transversal, Elastoplasticidade, Modelagem de elementos finitos

1 Introdução

Muitos métodos de projeto geralmente se concentram em túneis simples, mas os túneis duplos são uma ocorrência comum. A interação entre os túneis pode ser significativa, especialmente quando o espaçamento entre eles é mínimo. Além disso, muitos túneis gêmeos incorporam galerias transversais, introduzindo um efeito localizado nos deslocamentos e nas tensões. Embora a simulação da convergência de túneis em túneis simples tenha sido amplamente investigada e relatada na literatura publicada, poucos trabalhos abordaram a avaliação computacional da deformação em túneis gêmeos. Alguns estudos sobre túneis duplos profundos podem ser encontrados em Spyridis e Bergmeister [1], Chen et al. [2], Ma et al. [3], Fortsakis et al. [4], Chortis e Kavvadas [5], Chortis e Kavvadas [6], Guo et al. [7], Chortis e Kavvadas [8], Chortis e Kavvadas [9]. No entanto, menos atenção foi dedicada à avaliação da interação mecânica mútua induzida pela escavação da galeria transversal que conecta os túneis gêmeos.

Nesse contexto, as principais contribuições deste documento podem ser resumidas nos níveis de análise do material e do túnel. No nível do material, as equações do estado constitutivo do maciço rochoso são desenvolvidas usando uma estrutura de plasticidade, que é adequada para rochas argilosas. Para o comportamento mecânico do revestimento de concreto, é empregado o modelo elástico linear tradicional. No nível de análise estrutural, a deformação dos componentes altamente interativos do sistema de materiais (ou seja, massa rochosa e revestimento) resultante da escavação de túneis gêmeos e galeria transversal é simulada usando simulações de elementos finitos tridimensionais. Os processos de escavação e colocação do revestimento são simulados por meio da técnica de ativação/desativação. Os modelos constitutivos do maciço rochoso e os esquemas de integração numérica associados são implementados na ferramenta de personalização UPF/USERMAT [10] do software padrão ANSYS. Essa análise tridimensional de elementos finitos foi projetada especificamente para abordar as interações induzidas pelo processo de construção, a proximidade dos túneis gêmeos e a presença da galeria transversal.

2 Modelos constitutivos

O modelo constitutivo do maciço rochoso corresponde ao modelo elastoplástico Drucker-Prager associado. A taxa de deformação local $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ é dividida em duas contribuições $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$, de modo que as relações constitutivas que relacionam o

A taxa de tensão de Cauchy $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ e os componentes da taxa de deformação podem ser escritos como:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e = \mathbf{D} : (\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p). \quad (1)$$

Na relação acima, $\dot{\epsilon}^e$ e $\dot{\epsilon}^p$, representam, respectivamente, a taxa de deformação elástica e plástica, e D denota o tensor constitutivo linear elástico isotrópico de quarta ordem definido pelo módulo de Young elástico do maciço rochoso E e pelo coeficiente de Poisson ν . A taxa de deformação plástica é dada pela regra de fluxo:

$$\dot{\epsilon}^p = \begin{cases} \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} & \text{para } f > 0 \\ 0 & \text{para } f \leq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

em que λ é o multiplicador de plasticidade (obtido por meio da condição de consistência $\dot{f} = 0$) e g é uma função de fluxo potencial análoga a f usada para simular a dilatação do volume durante a evolução das deformações plásticas. No entanto, para esta análise, foi adotada a plasticidade associada, ou seja, $g = f$. Nesse modelo, a plasticidade de Drucker-Prager

$$f(\sigma, q) = f(I_1, J_2, q) = \beta_1 I_1 + \beta_2 \sqrt{J_2} - q(\alpha), \quad (3)$$

em que I_1 é o primeiro invariante do tensor de tensão, J_2 é o segundo invariante do tensor de desvio e β_1, β_2 e $q(\alpha)$ são parâmetros de resistência relacionados ao ângulo de atrito ϕ e à coesão c , respectivamente. A superfície de plasticidade de Drucker-Prager inscrita na superfície de Mohr-Coulomb é considerada, ou seja, [11]:

$$\beta_1 = \frac{(k-1)}{3}, \beta_2 = \frac{(2k+1)}{\sqrt{3}}, q(\alpha) = 2\sqrt{k}c(\alpha), \quad (4)$$

onde $k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$. A variável interna α é a deformação plástica equivalente ϵ^p usada para simular fenômenos de endurecimento/amaciamento de deformação. No entanto, para este estudo, adotamos a plasticidade perfeita, o que significa que c é uma constante. Um modelo constitutivo elástico linear é usado para o revestimento de concreto, que pode ser expresso, dentro da estrutura da análise infinitesimal, como $\dot{\sigma} = D : \dot{\epsilon}^e$, em que $\dot{\epsilon}^e$ e D são, respectivamente, a taxa de deformação elástica e a quarta ordem tensor constitutivo elástico isotrópico definido pelo coeficiente de Poisson do revestimento de concreto ν_c e pelo módulo de Young elástico E_c . Nas análises, para fins de comparação, a rigidez do túnel será dada pela seguinte expressão [12]:

$$K = \frac{E_c}{1 + \nu_c} \frac{R^2 (R_t - e_t)^2}{(1 - 2\nu_c) R_t + (R_t - e_t)^2}, \quad (5)$$

em que R_t é o raio do túnel e e_t é a espessura da parede do túnel.

3 Discretização espacial do domínio

O domínio do material Ω para simulações de elementos finitos é definido como um paralelepípedo com dimensões $L_1 L_2 L_3$ (veja a Fig. 1). Devido à simetria, apenas a parte do material na região $x \geq 0, y \geq 0$ é discretizada para a análise F.E.. Na Fig. 1, d_1 representa a distância entre os eixos dos túneis longitudinais, L_2 é o comprimento total escavado ao longo da direção longitudinal e_z , d_3 é a espessura do domínio ao longo da direção vertical e_y , L_1 é o comprimento da região não escavada após a escavação do túnel, L_3 é o comprimento do domínio ao longo da direção transversal e_x , e d_2 indica a posição do eixo transversal da galeria que intercepta o túnel longitudinal em $z = L_1 d_2$.

A malha usada consiste em 119740 ou 221104 elementos totais (hexaedros e tetraedros), dependendo do espaçamento longitudinal do túnel d_1 . Para aumentar a precisão do modelo na zona de interseção, são usados elementos tetraédricos quadráticos de 10 nós ao redor da galeria transversal, enquanto elementos hexaédricos trilineares de 8 nós são empregados no restante do domínio. As regiões significativamente influenciadas pelo tunelamento são destacadas em cinza claro na Fig. 1. Dois valores de d_1 são considerados nas simulações paramétricas: $d_1 = 16R_t$ e $4R_t$.

O revestimento de concreto ao longo da parede da galeria, mostrado em vermelho na Fig. 1, tem uma espessura e_g . O raio da galeria R_g é fixado em $2/3 R_t$ para simplificar, com o mesmo sistema de revestimento (mesmo material de concreto e espessura da camada) aplicado aos dois túneis longitudinais. Os parâmetros d_5 e d_1 definem o tamanho da região de transição envolvendo elementos tetraédricos no plano yz ao redor da galeria.

O estado de tensão inicial que prevalece no maciço rochoso antes do processo de escavação do túnel é definido pela tensão geostática vertical e horizontal constante σ_v e σ_h , assumindo a seguinte forma:

$$\sigma = -\sigma_v e_y \otimes e_y - \sigma_h \mathbf{1} - e_y \otimes e_y \quad (6)$$

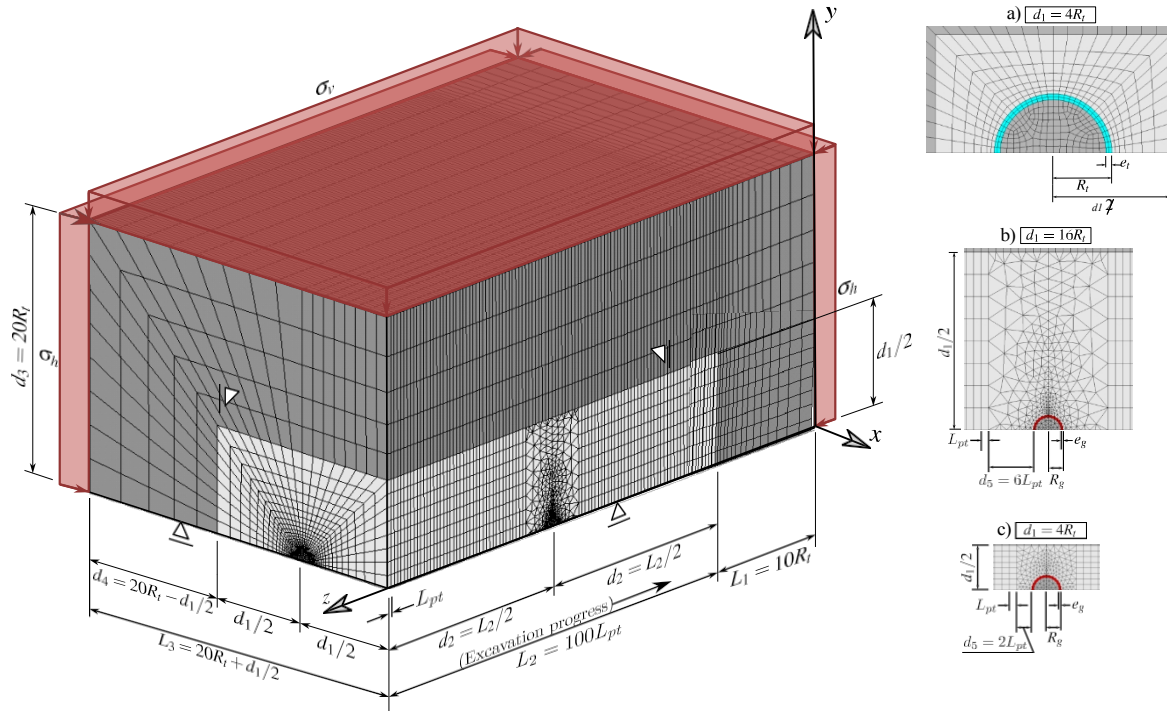


Figura 1. Geometria, malha e condições de contorno do domínio e detalhes de a) seção transversal do túnel longitudinal para a configuração $d_1 = 4R_t$ e seção transversal da galeria para as configurações b) $d_1 = 16R_t$ e c) $d_1 = 4R_t$.

Conforme mencionado anteriormente, o processo de escavação do túnel, incluindo as etapas de escavação e a instalação do revestimento, é simulado por meio do método de ativação e desativação mostrado na representação esquemática da Fig. 2. Cada etapa de escavação é modelada pela desativação dos elementos correspondentes (a rigidez dos elementos é reduzida por um fator de $1E8$), enquanto a instalação de elementos de revestimento a uma distância d_{0t} da face da escavação (comprimento sem revestimento) é obtida por meio da ativação dos elementos correspondentes, atribuindo-lhes propriedades de concreto. Nessa figura, n_p é o número total de etapas de escavação e n_{pig} representa o número de etapas de escavação do túnel longitudinal antes da escavação da galeria. Após a realização das n_{pig} etapas de escavação, a escavação da galeria é iniciada a partir da parede longitudinal do túnel. Referindo-se à notação da Fig. 2, L_{pg} é o comprimento do degrau considerado para a escavação da galeria, e d_{0g} é o comprimento sem revestimento da galeria. Após a conclusão da escavação da galeria, prosseguimos com as etapas de escavação do túnel longitudinal. Os principais parâmetros que definem o domínio da geometria, bem como o processo de escavação e a instalação do revestimento estão resumidos na Tabela 1.

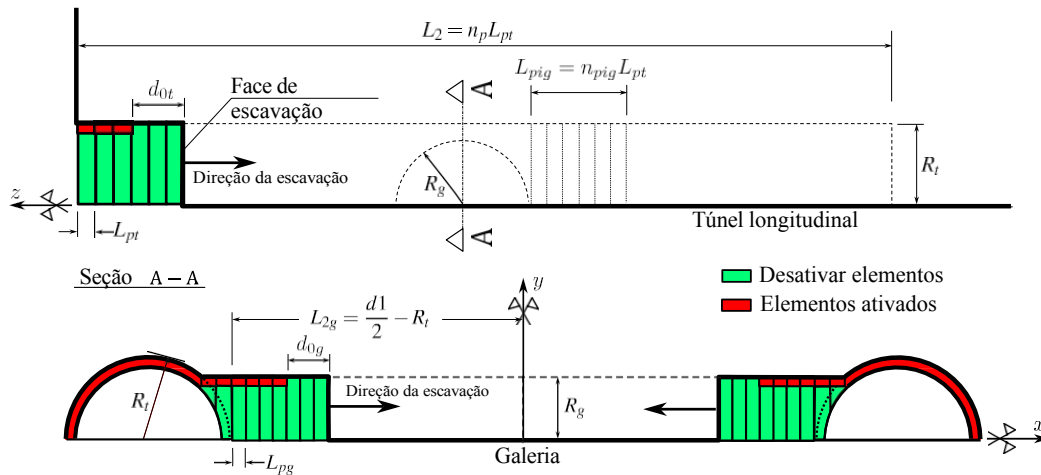


Figura 2. Representação esquemática do processo de escavação.

Tabela 1. Parâmetros relacionados à geometria do domínio, escavação e instalação do revestimento.

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES
Túneis longitudinais			
Raio do túnel longitudinal	r_t		R_t
Espessura do revestimento	e	m_t	$0,1R_t$
Comprimento da etapa de escavação		p_t	$1/3R_t$
Comprimento sem forro	d	m_{0t}	$2L_{pt}$
Galeria			
Raio da galeria	r_g		$2/3R_t$
Espessura do revestimento	e	m_g	e_t
Comprimento da etapa de escavação		p_g	$1/3R_g$
Comprimento sem revestimento	d	m_{0g}	$2L_{pg}$
Número de etapas que iniciam a escavação da galeria		n_{pig}	un 15
Resto do domínio			
Distância entre os eixos longitudinais do túnel	d_1	m	$4R_t, 16R_t$
Comprimento total ao longo da direção vertical	d_3	m	$20R_t$
Comprimento da região não escavada	L_1	m	$10R_t$
Comprimento total escavado	L_2	m	$100L_{pt}$
Comprimento total ao longo da direção transversal	L_3	m	$20R_t + d_1/2$

4 Verificação com túnel duplo sem revestimento em meio elastoplástico

No contexto das condições de deformação plana, Ma et al. [3] desenvolveram uma solução analítica aproximada para as tensões e o limite da zona plástica em torno de túneis circulares duplos profundos escavados em um meio elastoplástico homogêneo. Para o modelo constitutivo, os autores consideraram o critério de Mohr-Coulomb perfeitamente plástico com a regra de fluxo plástico associada. A solução de tensão para túneis gêmeos foi formulada com base na premissa de que a zona plástica ao redor de cada túnel envolve totalmente a borda do túnel, com as duas zonas plásticas permanecendo separadas e desconectadas. A Fig. 3 mostra a comparação entre a solução 3D F.E. (de um ponto distante atrás da face da escavação) e a solução de estresse para túneis gêmeos. solução analítica para o limite da zona plástica fornecida em [3]. Para essas análises, $R_t = 1$ m, $d_1 = 2R_t = 2$, $d_3 = 20R_t = 20$, módulo de Young da rocha $E = 20$ GPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ e ângulo de atrito $\phi = 30^\circ$. Essa análise mostra que a modelagem de elementos finitos produz previsões muito semelhantes às mostradas em 3. Além disso, os resultados mostram que os valores mais baixos de valores de coesão c resultam em zonas plásticas maiores.

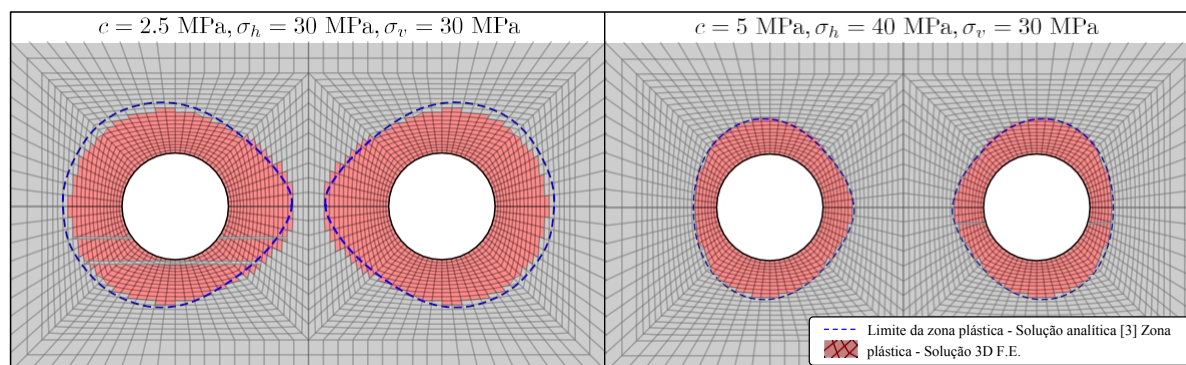


Figura 3. A extensão da zona plástica obtida com as simulações F.E. atuais e com a solução de tensão fornecida em Ma et al. [3].

Outras comparações são ilustradas na Fig. 4, que mostra os componentes de tensão radial σ_r e ortorradial $\sigma_{\theta\theta}$

ao longo de três caminhos radiais definidos em coordenadas polares por $\theta = 45^\circ$, 90° e 135° . É importante observar que, embora as simulações de elementos finitos usem a superfície de escoamento de Drucker-Prager inscrita na superfície de Mohr-Coulomb (como usado na solução de Ma et al. [3], as previsões numéricas se aproximam da solução analítica de tensão.

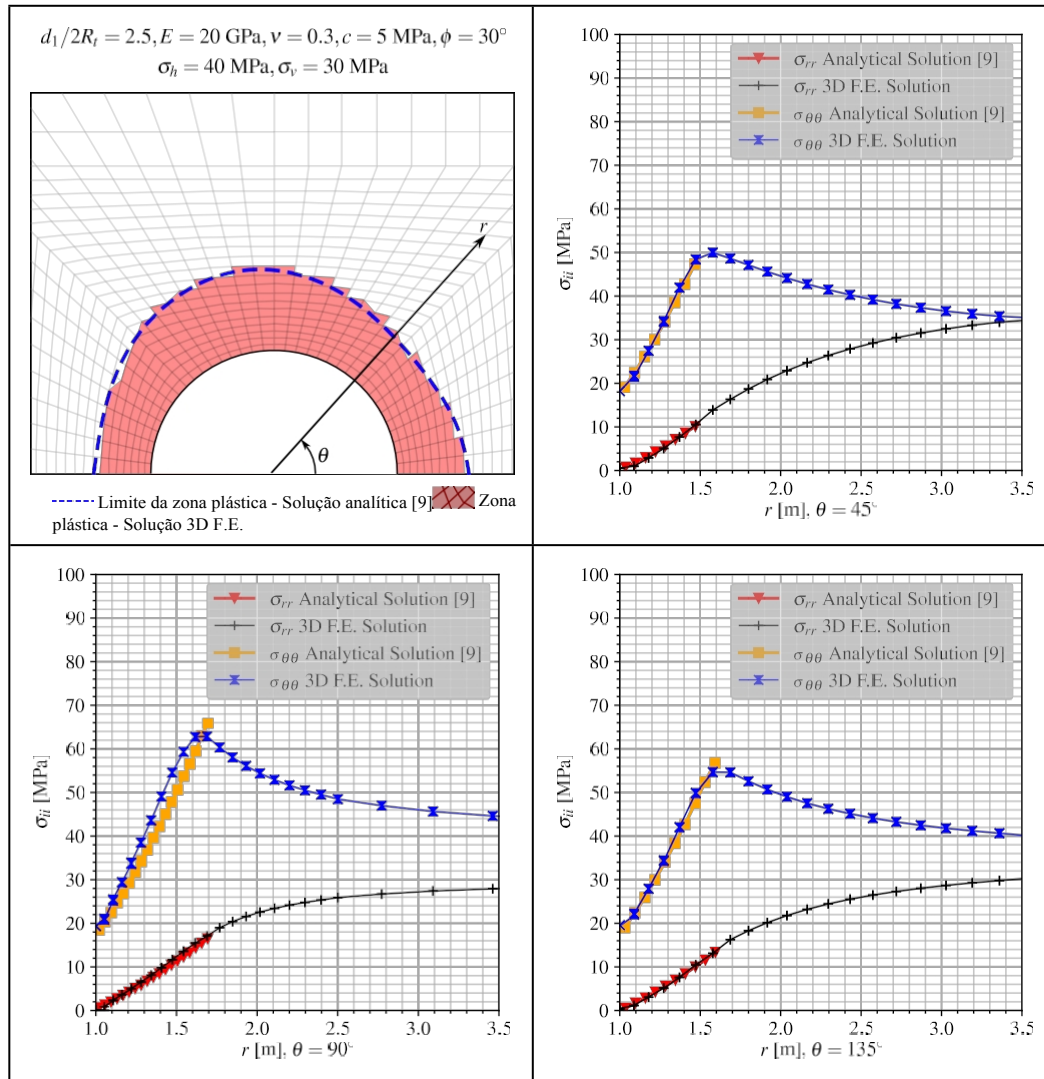


Figura 4. Distribuição dos componentes de tensão radial e ortorradial ao longo de diferentes direções radiais: comparação entre previsões numéricas e analíticas.

5 Resultados numéricos e discussão

Para desenvolver a análise, empregamos o módulo de Young $E = 1500 \text{ MPa}$, coeficiente de Poisson $\nu =$

$$0,49, c = 4\sqrt{3} \text{ 2},$$

$\phi = 0^\circ$ e, tensões iniciais isotrópicas $\sigma_v = \sigma_h = 9 \text{ MPa}$, que correspondem aos parâmetros constitutivos e condições de abertura de túneis (450 m de profundidade) na massa de rocha argilosa incompressiva na bacia de Paris (em Aisne, França), conforme detalhado em Rousset [13], Giraud [14] e Piepi [15]. Para o revestimento, serão considerados dois valores de rigidez:

$K = 969 \text{ MPa}$ e $K_c = 3403 \text{ MPa}$. Assumindo um módulo de Young $E_c = 30303 \text{ MPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu_c = 0,2$, esses valores correspondem a espessuras de revestimento e_t de $0,03R_t$ e $0,1R_t$.

Denotando por u_y o componente de deslocamento que segue o eixo y , a Fig. 5 e a Fig. 6 exibem as curvas de convergência $U_B = u_y B R_t$ que caracterizam o movimento para dentro no teto do túnel $Bx = 0, y = R_t, z$ em função da distância longitudinal normalizada até a face para diferentes condições: sem revestimento (NL), com revestimento elástico

(EL), com (WG) e sem galeria (NG) para $d_1 = 16R_t$ e $d_1 = 4R_t$. Nessas figuras, U_C representa a convergência em $z R_t = 25$ (longe do efeito da face da escavação e da galeria), e U_D é destacado na posição da galeria.

$D(x = 0, y = R_t, z = L_2 z)$

No caso do túnel único, o revestimento de maior rigidez (linha sólida preta) reduziu a convergência em aproximadamente 35%

em comparação com o cenário sem revestimento (linha tracejada preta). Por outro lado, o revestimento moderadamente rígido (linha pontilhada preta) aumentou a convergência em 12% em comparação com o revestimento de maior rigidez.

Quando $d_1 = 16R_t$ (linhas azul e amarela), os resultados de U_C são semelhantes aos do túnel isolado (linha preta). Entretanto, com uma distância reduzida para $d_1 = 4R_t$, a interação entre os túneis se torna significativa. Uma distância menor

Figure 10 is a line graph showing the normalized magnetic field U_B [%] versus the normalized distance z/R_t . The y-axis ranges from 0.00 to 2.50, and the x-axis ranges from -25 to 5. The graph contains several curves representing different tunneling and excitation conditions. A vertical dashed line at $z/R_t = 0$ is labeled "Face de escavação". An inset diagram shows two circles representing the tunnel and the probe, with radius R_t , distance d_1 , and magnetic field B .

Legend:

- NG, NL, single tunnel, $U_C = 1.41$
- NG, EL, $K_c = 969$, single tunnel, $U_C = 1.03$
- NG, EL, $K_c = 3403$, single tunnel, $U_C = 0.92$
- NG, NL, $U_C = 1.41$
- NG, EL, $K_c = 969$, $U_C = 1.03$
- NG, EL, $K_c = 3403$, $U_C = 0.92$
- WG, NL, $U_C = 1.43$
- WG, EL, $K_c = 969$, $U_C = 1.03$
- WG, EL, $K_c = 3403$, $U_C = 0.92$

Figure 10 is a plot of the normalized magnetic field U_B [%] versus the normalized distance z/R_t . The y-axis ranges from 0.00 to 2.50, and the x-axis ranges from -25 to 5. A vertical dashed line at $z/R_t = 0$ is labeled "Face de escavação". The plot shows several curves representing different tunnel configurations and materials. Three specific values are highlighted with boxes and arrows: 2.03, 1.28, and 1.10. An inset diagram shows two circles representing tunnels with radii R_t and R_b , separated by a distance d_1 .

Legend:

- NG, NL, single tunnel, $U_C = 1.41$
- NG, EL, $K_c = 969$, single tunnel, $U_C = 1.03$
- NG, EL, $K_c = 3403$, single tunnel, $U_C = 0.92$
- - - NG, NL, $U_C = 1.83$
- NG, EL, $K_c = 969$, $U_C = 1.13$
- NG, EL, $K_c = 3403$, $U_C = 0.98$
- - - WG, NL, $U_C = 1.85$
- WG, EL, $K_c = 969$, $U_C = 1.13$
- WG, EL, $K_c = 3403$, $U_C = 0.98$

*Anais do XLV Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, ABMEC
Maceió, Alagoas, 11 a 14 de novembro de 2024*

revestimento de rigidez mais alta (linha azul sólida). No entanto, ao analisar a diferença entre o U_C e o U_D , há uma diferença de até

12% para o revestimento de maior rigidez (linha azul sólida para $4R_i$ e $16R_i$) e até 13% para o revestimento de rigidez moderada (linha azul pontilhada para $4R_i$ e $16R_i$) para $d_1 = 4R_i$. Em ambas as figuras, o aumento da rigidez localiza o efeito da galeria no perfil de convergência, reduzindo-o de $22,5R_g$ (sem revestimento) para $10,5R_g$ e $7,5R_g$ (com revestimento) ao longo do túnel longitudinal. A proximidade do túnel teve um impacto mínimo sobre essa faixa.

6 Conclusões

Considerando os parâmetros constitutivos e as condições de tunelamento adotadas, as análises mostram que o revestimento tem um impacto profundo no perfil de convergência dos túneis gêmeos. Ele reduz a convergência geral em até 35% e diminui a convergência localizada da galeria em aproximadamente um terço em comparação com o cenário sem revestimento. Além disso, um revestimento menos rígido, aproximadamente 3,5 vezes menos rígido, aumenta a convergência em 12% e expande o efeito localizado em 40% em comparação com o revestimento mais rígido. A interação do túnel torna-se significativa em $4R_i$, mas tem impacto mínimo na faixa do efeito localizado da galeria ao longo do túnel longitudinal.

Agradecimentos. Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela CAPES e pelo CNPq.

Declaração de autoria. Os autores confirmam, por meio deste documento, que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho e que todo o material aqui incluído como parte do presente artigo é de propriedade (e autoria) dos autores ou tem a permissão dos proprietários para ser incluído aqui.

Referências

- [1] P. Spyridis e K. Bergmeister. Analysis of lateral openings in tunnel linings (Análise de aberturas laterais em revestimentos de túneis). *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 50, pp. 376-395, 2015.
- [2] F. Chen, L.-b. Lin e D. Li. Soluções analíticas para túneis gêmeos em grande profundidade considerando a instalação do revestimento e a interação mútua entre o geomaterial e os revestimentos. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 73, 2019.
- [3] Y. Ma, A. Lu, X. Zeng e H. Cai. Analytical solution for determining the plastic zones around twin circular tunnels excavated at great depth (Solução analítica para determinar as zonas plásticas ao redor de túneis circulares gêmeos escavados em grande profundidade). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 136, pp. 104475, 2020.
- [4] P. Fortsakis, E. Bekri, G. Prountzopoulos e P. Marinos. Numerical analysis of twin tunnels interaction (Análise numérica da interação de túneis gêmeos). Em *Proc. 1st Eastern European Tunnelling Conference*, Budapeste, Hungria, 2012.
- [5] F. Chortis e M. Kavvadas. Three-dimensional numerical analyses of perpendicular tunnel intersections (Análises numéricas tridimensionais de interseções de túneis perpendiculares). *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, pp. 1771-1793, 2021a.
- [6] F. Chortis e M. Kavvadas. Investigação numérica tridimensional da interação entre túneis gêmeos. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, pp. 5559-5585, 2021b.
- [7] Z. Guo, X. Liu e Z. Zhu. Uma solução elástica para a tensão de túneis circulares gêmeos no campo de tensão hidrostática. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, pp. 1-11, 2021.
- [8] F. Chortis e M. Kavvadas. 3D numerical investigation of the axial forces acting on tunnel junctions constructed in fractured/weathered to very blocky rockmass. Em *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*, pp. 1574-1582. CRC Press, 2023a.
- [9] F. Chortis e M. Kavvadas. 3D numerical investigation of the bending moments acting on tunnel junctions constructed in fractured/weathered to very blocky rockmass. Em *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*, pp. 1583-1591. CRC Press, 2023b.
- [10] ANSYS. *ANSYS Programmer's Reference, versão 15.0*. Canonsburg, Pennsylvania, 2013.
- [11] D. Bernaud. *Tunnels profonds dans les milieux viscoplastiques: approches expérimentale et numérique*. Ph.D. Tese (em francês), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França, 1991.
- [12] M. Panet. *Le Calcul des Tunnels par la Méthode Convergence-Confinement*. Presses De L'ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées, 1995.
- [13] G. Rousset. *Comportement mécanique des argiles profondes: Application au stockage de déchets radioactifs*. Tese de doutorado (em francês), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França, 1988.
- [14] A. Giraud. *Couplages thermo-hydro-mécaniques dans les poreux peu perméables: application aux argiles*. CILAMCE-2024

profondes. Tese de doutorado (em francês), Ecole Nationale des Ponts et Chausse'es, Paris, França, 1993.

[15] G. T. Piepi. *Comportamento viscoplástico com ruptura de argilas raiadas. Applications aux ouvrages souter- rains*. Tese de doutorado (em francês), Ecole Nationale des Ponts et Chausse'es, Paris, França, 1995.