XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/63

Efeitos tridimensionais em escavações estroncadas profundas em solos com anisotropia macroscópica

Mauro Vitor dos Santos Moura
Pesquisador, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, mauro.moura@coc.ufrj.br

Mauricio Ehrlich
Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,

Seyed Hamed Mirmoradi
Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,

RESUMO: À medida que as áreas urbanas se tornam mais densamente povoadas, escavações profundas passam a ser cada vez mais frequentes nas grandes cidades. A previsão precisa dos deslocamentos induzidos por essas escavações é essencial para mitigar possíveis danos a estruturas vizinhas. Embora as escavações sejam tridimensionais (3D), as análises costumam ser realizadas sob a hipótese de estado plano de deformação (2D). A razão entre a condição de estado plano de deformação e a condição tridimensional real (PSR – *plane strain ratio*), constitui uma ferramenta valiosa para previsões preliminares. Essa abordagem foi validada com base em resultados de obras reais monitoradas e é específica para o tipo de escavação e para o solo envolvido. Estudos anteriores calibraram o PSR para paredes diafragma com escoramentos em solos arenosos e argilosos; neste trabalho o foco é a calibração do PSR para solos anisotrópicos, considerando três condições de face: desfavorável, favorável e ortogonal. A calibração é validada com base em um caso de escavação descrito na literatura que inclui camadas reliquiares de solo. Os resultados evidenciaram o impacto significativo da anisotropia sobre os deslocamentos: aumento dos deslocamentos absolutos no lado desfavorável, deslocamentos "invertidos" em direção ao maciço no lado favorável (próximo aos cantos) e padrões de deslocamento alterados no lado ortogonal, relacionados à direção das camadas reliquiares. Além disso, os efeitos tridimensionais promovem o arqueamento significativo quando a relação entre o comprimento e a profundidade da escavação (L/H) é menor do que 1,5, tornam-se menos expressivos para valores de L/H maiores do que 3,0.

PALAVRAS-CHAVE: Camadas reliquiares, Solo Residual, Relação 2D-3D (PSR).

ABSTRACT: As urban areas become denser, deep excavations are increasingly common in large cities. Accurate prediction of excavation-induced displacements is essential to mitigate damage to adjacent structures. Although excavations are inherently three-dimensional (3D), analyses are commonly performed under plane strain (2D) assumptions. The ratio between plane strain and true 3D conditions (PSR-plane strain ratio) provides a valuable tool for preliminary predictions. This approach has been validated using monitored field cases and is specific to excavation type and soil conditions. Previous studies calibrated PSR for diaphragm walls with struts in sandy and clayey soils. This study focuses on PSR calibration for anisotropic soils, considering three face conditions: unfavorable, favorable, and orthogonal. The calibration is validated against a documented excavation case including reliquiae soil layers. Results show a strong influence of anisotropy on displacements: increased absolute movements on the unfavorable side, "reversed" movements toward the ground mass on the favorable side (near corners), and modified displacement patterns on the orthogonal side, linked to reliquiae layer orientation. Moreover, 3D effects induce significant arching for L/H less than 1.5, become less pronounced for values of L/H greater than 3.0.

KEYWORDS: Reliquiae layer, residual soil, PSR

1 INTRODUÇÃO

Escavações profundas estão se tornando cada vez mais comuns em ambientes urbanos. A ONU estima um crescimento da porcentagem da população mundial vivendo em centro urbanos de 56% em 2021 para 68% em 2050 (UN HABITAT, 2022). A necessidade de se estudar escavações em todos os tipos de solos se faz presente.

O estudo de escavações em solos sedimentares arenosos (Khoiri e Ou, 2013; Zhang *et al.*, 2019) e argilosos (Likitlersuang *et al.*, 2013; Hsiung *et al.*, 2021) é bastante presente na literatura. Todavia, os trabalhos sobre escavações profundas em solos tropicais são mais escassos. E, solos tropicais com anisotropia são raros. Ehrlich (2004) e Ehrlich e Silva (2015) relataram casos de escavação em solos tropicais com camadas reliquiares originadas da rocha-mãe que dão origem a solos com anisotropia macroscópica na rigidez e resistência. Moura (2024) e Moura *et al*. (2024) realizaram validações e estudos paramétricos em escavações nesses tipos de solo, mas utilizando modelos em duas dimensões. Há uma necessidade de se conhecer os efeitos desses solos tropicais com anisotropia macroscópica sob solicitações tridimensionais.

O objetivo desse trabalho é quantificar a influência que a anisotropia macroscópica, camadas reliquiares, tem em escavações estroncadas utilizando análises numéricas bidimensionais e tridimensionais

2 METODOLOGIA

Para estudar a influência que a anisotropia macroscópica que um solo residual tropical pode ter em uma escavação profunda estroncada, a metodologia empregada neste estudo se constitui dos seguintes passos: (i) validar o caso usado por Hsiung *et al.* (2021); (ii) substituir o maciço original pelo solo e camadas reliquiares validados em Moura et al. (2023) e Moura (2024); (iii) realizar uma análise paramétrica variando as dimensões em planta da escavação para estudar os valores de PSR gerados. PSR, "*plane strain-ratio*" ou "razão de estado plano de deformação" é um conceito proposto por Ou *et al.* (1996). PSR é a razão entre o deslocamento horizontal é um perfil distante "d" da borda da escavação e o deslocamento horizontal em um perfil do mesmo muro, mas em estado plano de deformação.

2.1 Validação do modelo numérico

Hsiung *et al.* (2021) validou uma escavação em solo arenoso com profundidade de 13.2 m, estabilizada com uma parede diafragma de 20 metros de profundidade e 0,6 m de espessura. Um nível de estroncas foi utilizado a 4 metros abaixo do nível do solo, com espaçamento horizontal de 6 m. O nível d'água inicialmente estava a 2,5 m de profundidade e foi sendo rebaixado conforme cada etapa da escavação era executada. A escavação foi dividida em: (i) fase inicial; (ii) instalação da parede diafragma; (iii) escavação até a cota -4,5 m combinada com o rebaixamento do NA até a cota -5,5 m; (iv) instalação de um nível de estronca na cota -4,0 m, com carga de 200 kN; (v) escavação até o cota final de 13,2 m, com respectivo rebaixamento de NA até a cota -14,2 m.

O programa de elementos finitos utilizado nesse estudo foi o PLAXIS 2024. A modelagem foi feita a partir de dois eixos de simetria com o tamanho total de 135 m x 115 m e 40 m de profundidade (Figura 1a). A escavação possui as dimensões de 78 m x 43 m, com três inclinômetros na parede diafragma (SID6, SID8 e SID9) para a validação (Figura 1b). O número de elementos tetraédricos e nós utilizados foi de 82.293 e 125.925, respectivamente (Figura 1c). As condições de contorno foram deslocamento fixos na base do modelo e deslocamentos normais fixos nos limites verticais.

Hsiung *et al.* (2021) dividiu o maciço em 6 camadas de solo. Nas 5 camadas mais superficiais, foi utilizado o modelo constitutivo *Hardening Soil small strain*, cuja profundidade vai até 25,5 m. A última camada, entre 25,5 m e 40 m, foi simulada usando o modelo Mohr-Coulomb com a rigidez em função da profundidade. Os parâmetros geotécnicos e estruturais utilizados podem ser encontrados em Hsiung *et al.*, 2021; Phan *et al.*, 2019 e Law *et al.*, 2016

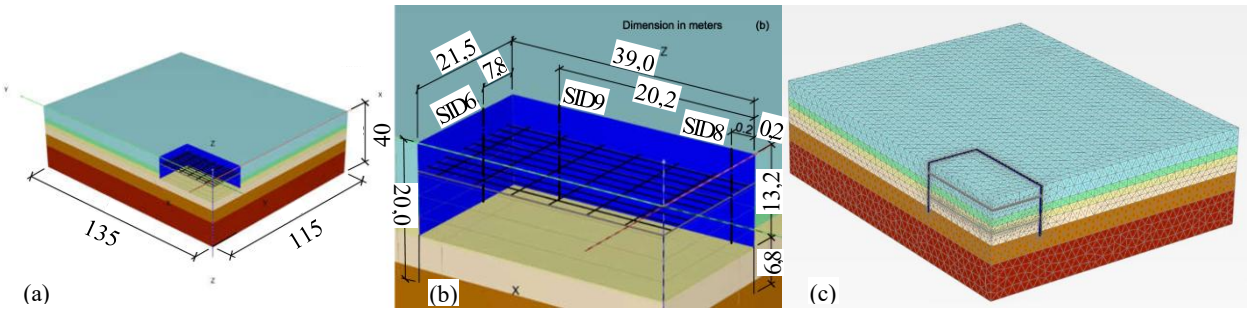


Figura 1 – Modelo de elementos finitos descrito por HSIUNG *et al.* (2021): (a) dimensões totais do modelo); (b) detalhe com as dimensões da escavação e o posicionamento dos inclinômetros SID 6, SID 8 e SID 9; (c) malha de elementos finitos utilizada.

A partir dos deslocamentos medidos pelos inclinômetros, foi possível tentar reproduzir os deslocamentos medidos para validar o modelo. A Figura 2 mostra os deslocamentos horizontais lidos nos inclinômetros, junto com os resultados de Hsiung *et al.* (2021) e os resultados deste trabalho. Os deslocamentos horizontais obtidos neste trabalho estão muito próximos dos dados do modelo de Hsiung *et al.* (2021). Comparando o modelo validado deste trabalho com os dados dos inclinômetros, para o primeiro estágio de escavação (cota -4,5 m), a diferença relativa máxima para os inclinômetros SID 6, SID 8 e SID 9, é de 5%, 2% e 29%, respectivamente. No segundo estágio de escavação, a diferença é de 16%, 26% e 8%, respectivamente. Portanto, a análise numérica foi o suficiente para reproduzir o comportamento de deslocamento horizontal observado em campo.

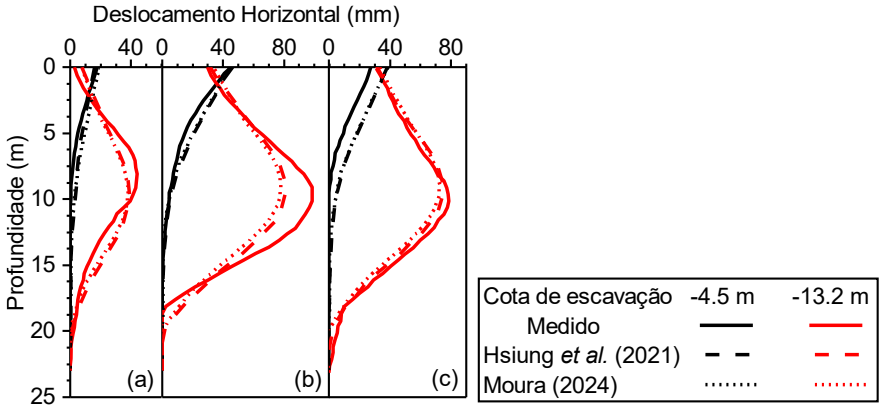


Figura 2 – Deslocamentos horizontais de acordo com a profundidade em diferentes inclinômetros: (a) SID 6; (b) SID 8; (c) SID 9 (Adaptado de Moura *et al.*, 2023).

3 Análise paramétrica

Os efeitos tridimensionais das camadas reliquiares fracas em escavações profundas estabilizadas com parede diafragma pôde ser estudado utilizando o conceito de PSR a partir do modelo validado na seção 2.1. Para este objetivo, o maciço do modelo validado foi substituído por outro constituído de um solo silto-argiloso com camadas relquiares fracas validado por Moura *et al*. (2023) e Moura (2024). Essa substituição aproximou a escavação da ruptura e afastou das condições de trabalho. Foi necessário aumentar a profundidade da parede diafragma para 22,5 m e a inserção de mais um nível de estronca na cota -8,5 m. O processo de escavação foi então alterado com uma etapa de escavação e rebaixamento do NA intermediária para esse novo nível de estroncas.

O maciço foi modelado com dois tipos de solo nomeados como: Solo residual e Camada fraca. O primeiro modelado como volume e o segundo como interface com mergulho de 60°. O espaçamento da camada fraca adotado foi de 1 m. Os parâmetros geotécnicos estão descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros geotécnicos validados por Moura *et al.* (2023)

Solo	**Modelo Constitutivo**	γ_{unsat} (kN/m³)	γ_{sat} (kN/m³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	Ψ (°)	E' (MPa)	υ'	E'_{inc} (MPa/m)	z_{ref} (m)
Camada fraca	MC	20	21	30	20	0	17,0	0,3	1,5	0,0
Solo Residual	HSs	20	21	44	20	14	-	-	0,0	-

Solo	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref}	m	$\gamma_{0.7}$	G_0^{ref} (MPa)	υ'_{ur}	R_f	K_0
Solo Residual	38,0	36,0	114,0	0,7	0,0001	116,4	0,2	0,7	0,305

O mergulho da camada fraca cria condições diferentes em cada parede diafragma: Desfavorável, Favorável e Ortogonal (Figura 3a). Com a finalidade de verificar a influência que a camada fraca tem precisamos criar a condição Sem Camada fraca. As dimensões da escavação como comprimento da parede primária (L) e comprimento da parede secundária (B) foram variadas no estudo paramétrico. Outro parâmetro importante é a profundidade da escavação (H).

A obtenção do PSR exige o cálculo dos deslocamentos na condição de estado plano de deformação. Para isso foram criados modelos em três dimensões, mas com grande comprimento na direção ortogonal à direção dos deslocamentos previstos, de forma a se aproximar de uma condição de estado plano de deformação. Dois tipo de modelos foram criados para calcular os deslocamentos de estado plano de deformação: condição Desfavorável e Favorável (Figura 3b) e condição Ortogonal (Figura 3c).

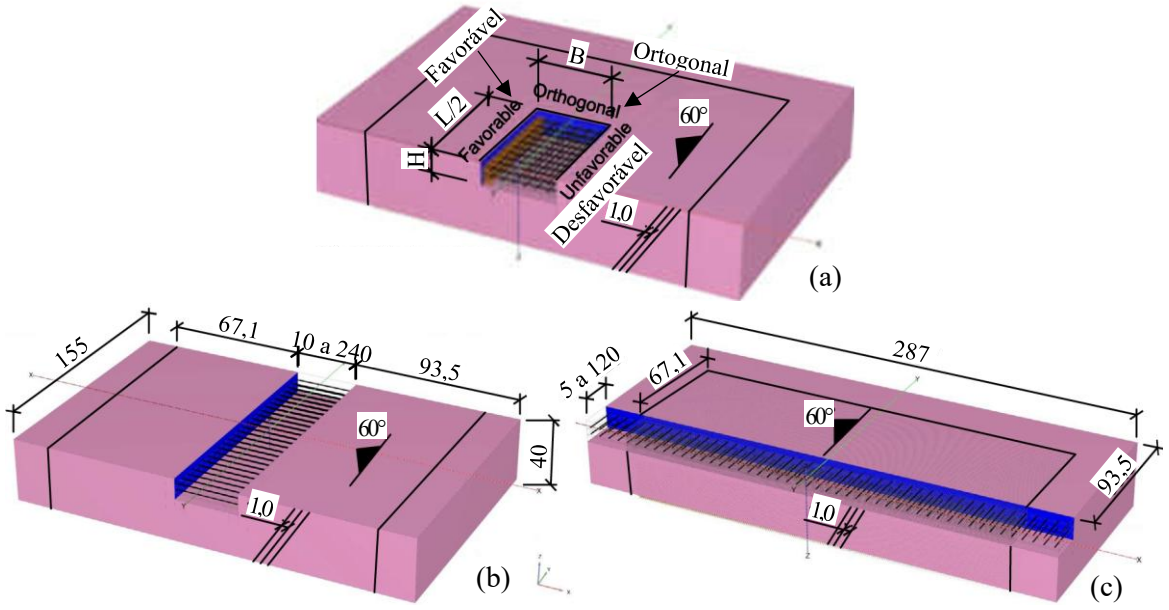


Figura 3 – Modelos numéricos utilizados no análise paramétrica: (a) escavação em 3D com as três condições; (b) escavação em estado plano de deformação para a condição desfavorável e favorável; (c) escavação em estado plano de deformação para a condição ortogonal.

A análise paramétrica foi executada variando as dimensões em planta entre os valores de 10 m a 240 m (Figura 3). O resultado foi organizado a partir de duas razões: largura dividido pelo comprimento da escavação (B/L) com valores iguais a 0,5, 1,5 e 3,0; e comprimento pela profundidade da escavação (L/H) iguais a 1,5, 3,0 e 6,1, totalizando 9 combinações. O número total de modelos calculados foram 42.

4 Resultados

A Figura 4 mostra um perfil típico dos deslocamentos horizontais da parede diafragma em estado plano de deformação para cada condição: favorável, desfavorável, ortogonal e sem camada fraca. Os deslocamentos horizontais, no caso da condição Desfavorável, são entre 2,2 a 5,6 vezes maiores quando comparado as outras condições. A isto pode ser atribuído ao aumento do empuxo ativo motivado pelas camadas fracas. Enquanto o ponto de deslocamento máximo, o ponto de inflexão, da condição desfavorável fica por volta de 1,5 m abaixo da cota de escavação, e nos outros casos esse ponto fica acima do fundo da escavação.

As outras três condições exibem deslocamentos horizontais de tamanhos similares, mas possuem diferenças enquanto a forma da curva. A condição favorável apresenta deslocamentos horizontais menores na região de baixa profundidade, e em alguns casos até com valores negativos, ou seja, contra o maciço. Isso se deve ao fato de que as estroncas, solicitadas pelo lado desfavorável, se apoiam no lado favorável, este funciona como uma fundação. Enquanto nas maiores profundidades, o perfil de deslocamentos horizontais se apresenta mais verticalizado. A isto se deve o fato de que as camadas fracas condicionam uma cunha de empuxo passivo menor, reduzindo a resistência do solo. A condição ortogonal e sem camadas fracas exibem forma de curvas similares, mas com os valores de deslocamento absolutos do ortogonal ligeiramente maiores (entre 1,1 e 1,3 vezes). Isso mostra a diversidade do comportamento da escavação conforme seu posicionamento em relação à direção das camadas fracas. O detalhamento dos resultados pode ser encontrado em Moura (2024).

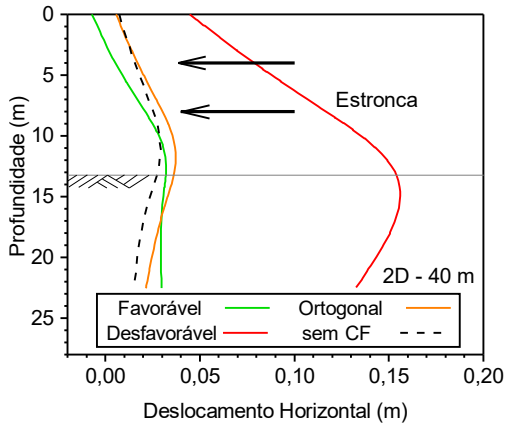


Figura 4 – Perfis de deslocamento horizontal versus a profundidade em uma análise 2D com largura de 40 m.

Os valores de PSR foram calculados para todo o comprimento da parede e organizados em função da distância "d" do canto da escavação normalizada pelo comprimento da parede "L", d/L (Figura 5 e Figura 6).

A Figura 5a mostra a condição desfavorável. Os valores de PSR no canto do muro (d/L = 0) variam entrem 0,06 e 0,16, enquanto no centro da parede (d/L = 0,5) chegam aos valores máximos de 0,38 a 0,92. É possível observar que o PSR depende fortemente da razão L/H. Quando o L/H é baixo (L/H = 1,5), o PSR máximo varia entre 0,38 e 0,68 de acordo com B/L, mas quando o L/H é alto (L/H=6,0), o PSR máximo varia apenas entre 0,88 a 0,92 em função de B/L. Quanto maior o L/H, regiões do muro mais próximas do canto tem o PSR mais próximas da unidade.

A Figura 5b possui a condição favorável. Os valores de PSR no canto do muro (d/L = 0) mostram valores negativos, entre -0,55 e -0,16. Ao se aproximar do centro do muro, o PSR cresce e se torna positivo entre as posições 0,04 < d/L < 0,19, até atingir o máximo no centro do muro com o PSR variando entre 0,55 e 1,00. Similar ao caso desfavorável, a razão L/H tem grande influência nos resultados. Quando o L/H é baixo (L/H = 1,5), o PSR máximo varia entre 0,55 e 0,84 de acordo com B/L, mas quando o L/H é alto (L/H=6,0), o PSR máximo varia apenas entre 0,88 e 1,00 em função de B/L.

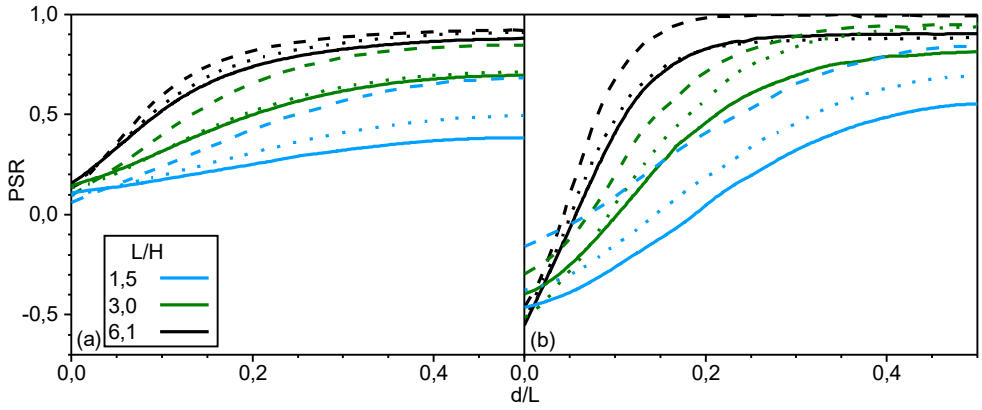


Figura 5 – PSR vs d/L – (a) condição desfavorável; (b) Condição favorável; linhas tracejadas, linhas pontilhadas e linhas contínuas representam as razões B/L iguais a 0,5, 1,5 e 3,0, respectivamente.

A Figura 6a a seguir contém a condição Ortogonal. Neste caso a curva não é simétrica em relação ao centro do muro. Os valores de PSR são ligeiramente maiores no lado direito da figura, o lado em que fica o muro com a condição desfavorável, enquanto o lado esquerdo é o lado do muro com a condição favorável. No entanto, essa assimetria diminui conforme o L/H diminui, ela é bem pronunciada com o L/H = 6, ainda visível com o L/H = 3 e imperceptível com o L/H = 1,5. Para os casos de L/H = 6,0, a seção d/L = 0,8, tem PSR entre 0,88 e 0,91, e na seção d/L = 0,2, o PSR varia entre 0,77 e 0,81. Novamente a razão L/H tem grande influência nos resultados, no centro do muro (d/L = 0,5), o PSR varia entre 0,50 e 0,81 para o L/H = 1,5 e entre 0,88 e 0,92 para o L/H = 6,0.

A Figura 6b explicita a condição sem camada fraca. A forma das curvas é similar ao caso da condição desfavorável. No canto do muro (d/L = 0), o PSR varia entre 0,01 e 0,07. Ao se aproximar do centro do muro, o PSR aumenta até um máximo no centro (d/L = 0,5) variando entre 0,62 e 0,98. Como nos outros casos, L/H influencia fortemente o resultado, quanto maior for seu valor, maior será o PSR. Quando o L/H é baixo (L/H = 1,5), o PSR máximo varia entre 0,62 a 0,85 de acordo com B/L, mas quando o L/H é alto (L/H=6,0), o PSR máximo varia apenas entre 0,95 e 0,98 em função de B/L.

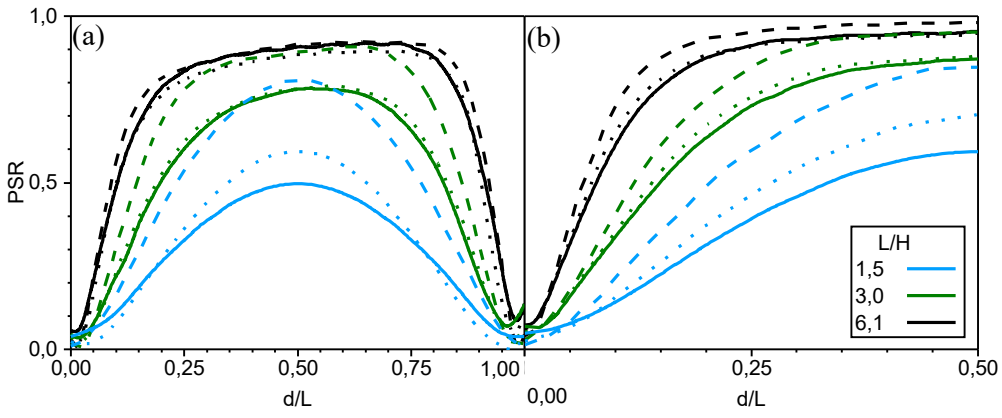


Figura 6 – Relação PSR–d/L para as condições (a) ortogonal e (b) sem camada fraca. As linhas tracejadas, pontilhadas e contínuas correspondem a razões B/L iguais a 0,5, 1,5 e 3,0, respectivamente.

A Figura 7 resume todos os PSR máximos encontrados em todas as condições. De uma forma geral, as curvas levemente inclinadas para frente e PSR crescendo na diagonal de cima para baixo. Com exceção da condição favorável (Figura 7b), onde a curva de PSR = 0,9 se afasta dessa tendência. Os autores atribuem esse fato ao tamanho grande dos modelos para atingir L/H e B/L correspondentes. Nesses casos houve grande plastificação, se afastando das condições de trabalho. Em todos os casos é possível observar o aumento do

$PSR_{máx}$ com o aumento de L/H e que a influência de B/L só se torna mais pronunciada para valores de L/H menores.

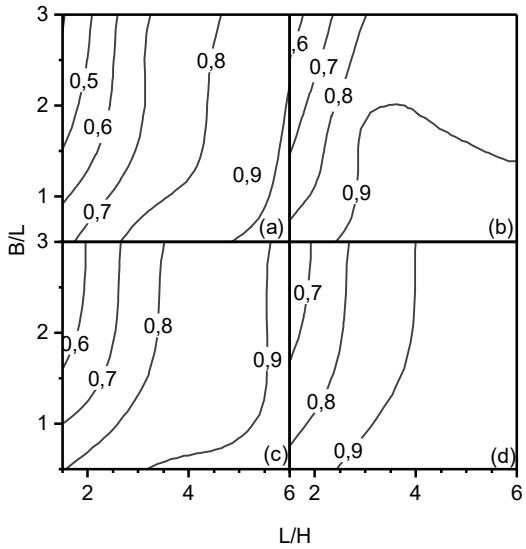


Figura 7 – Variação do PSR_{max} com L/H e B/L para diferentes casos: (a) Desfavorável; (b) Favorável; (c) Ortogonal; e (d) sem camada fraca.

5 Conclusões

Este trabalho investigou a influência de camadas reliquiares fracas no comportamento de escavações estabilizadas por paredes diafragma e estroncas. Foram realizadas análises numéricas bidimensionais e tridimensionais pelo método dos elementos finitos com o objetivo de avaliar o impacto dessas camadas no desempenho da escavação. O modelo foi validado e conduziu-se um estudo paramétrico no qual as dimensões em planta da escavação foram sistematicamente variadas. Esse procedimento permitiu quantificar a influência da anisotropia macroscópica associada às camadas fracas nos deslocamentos da estrutura de contenção. A Razão de Estado Plano de Deformação (Plane Strain Ratio – PSR) foi então empregada para sintetizar os resultados em um ábaco, a partir do qual os deslocamentos de uma parede em uma escavação tridimensional podem ser estimados em função das dimensões em planta (L, comprimento da parede principal, e B, comprimento da parede secundária) e da condição de anisotropia do maciço.

Em gráficos mostrando o perfil de deslocamento típico, PSR versus a distância do canto do muro normalizado pelo comprimento da parede primária (d/L) e $PSR_{máx}$ em função de L/H e B/L foi possível estabelecer alguns padrões:

- A condição desfavorável causa um substancial aumento nos deslocamentos comparado às outras condições. Os perfis de deslocamento e forma das curvas das condições ortogonal e sem camada fraca são similares, mas no caso ortogonal, o perfil de deslocamento ao longo do muro é assimétrico e são maiores no lado próximo a condição desfavorável. Essa assimetria diminuiu até desaparecer quanto menor for a razão L/H;
- Para L/H baixos, a escavação se aproxima da forma de um poço, então os valores de PSR são menores devido ao efeito de arqueamento do entorno da escavação. Esse efeito diminui a influência das camadas fracas nos deslocamentos em todas as condições também pelo efeito do arqueamento.
- O caso favorável possui um perfil de deslocamento com as profundidades rasas mais inclinadas em direção ao maciço e com PSR negativos no canto da escavação. Esse fenômeno provavelmente acontece pela transmissão de cargas pelas estroncas. O lado desfavorável solicita as estroncas e estas se apoiam no lado favorável. Escavações estabilizadas com métodos alternativos, como cortinas ancoradas, podem exibir comportamentos diferentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores apreciam imensamente o financiamento deste estudo a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ehrlich, M., "Performance of a 25 m high anchored wall for stabilization of an excavation in gneiss saprolite. Landslides: evaluation and stabilization". Anais: *Proceedings from the IX international symposium on landslides*, Rio de Janeiro, Brasil, pp 1561–1568, 2004.

Ehrlich, M., Silva, R.C., "Behavior of a 31 m high excavation supported by anchoring and nailing in residual soil of gneiss", *Engineering Geology*, v. 191, pp. 48–60, 2015.

Hsiung, B.C.B., Likitlersuang, S., Phan, K.H., "Impacts of the plane strain ratio on excavations in soft alluvium", *Acta Geotechnica*, v. 16, pp. 1923–1938, 2021.

Khoiri, M., Ou, C.Y., "Evaluation of deformation parameter for deep excavation in sand through case histories", *Computers and Geotechnics*, v. 47, pp. 57–67, 2013.

Law, K. H., Ismail, Z., Hashim, R., "3D Finite Element Analysis of a Deep Excavation Considering the Effect of Anisotropic Wall Stiffness", Anais: *Proceedings of the 19th Southeast Asian Geotechnical Conference & 2nd AGSSEA Conference*, Kuala Lumpur, Malásia, 2016

Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowski, D., Oh, E., Balasubramaniam, A., "Finite element analysis of a deep excavation: a case study from the Bangkok MRT", *Soils and Foundations*, v. 53, n. 5, pp. 756–773, 2013.

Moura, M. V. S., Ehrlich, M., Mirmoradi, S. H., "Effects of reliquiae layer and excavation procedure on the behaviour of anchored structures", *Acta Geotechnica*, v. 18, pp. 6111–6122, 2023.

Moura, M. V. S., *Efeito de camadas reliquiares fracas e do procedimento de escavação no comportamento de estruturas ancoradas e estroncadas.* Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2024.

Moura, M. V. S., Ehrlich, M., Mirmoradi, S. H., "Modelagem Numérica de Escavação em Talude com Camadas Reliquiares Estabilizada com Ancoragens – Caso de Estudo" Anais: *XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Balneário Camboriú, SC, Brasil, 2024.

Ou, C.Y., Chiou D.C., Wu T.S., "Three-dimensional finite element analysis of deep excavations", *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 122, n. 5, pp. 337-345, 1996.

Phan, H.K, Hsiung, B.C.B., Hong, N.G., "Re-categorized soil layers and performance prediction of deep excavation in Kuala Lumpur", Anais: *Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Infrastructure and Sustainable Development (TISDIC 2019)*, pp. 123-133, 2019.

Zhang W., Hou Z., Goh A., Zhang R., "Estimation of strut forces for braced excavation in granular soils from numerical analysis and case histories", *Computers and Geotechnics*, v. 106, pp. 286–295, 2019.