

Modelagem Numérica de Escavação em Talude com Camadas Reliquiadas Estabilizada com Ancoragens – Caso de Estudo

Mauro Vitor dos Santos Moura

Doutorando, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, mauro.moura@coc.ufjf.br

Maurício Ehrlich

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

Sayed Hamed Mirmoradi

Professor Visitante, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,

RESUMO: O município de Niterói/RJ possui taludes de solo com origem em um gnaisse metassedimentar que deu origem a camadas reliquiadas centimétricas de baixa resistência e alta deformabilidade, que muitas vezes estão desfavoráveis a uma escavação, entre camadas de alta resistência e baixa deformabilidade. Casos de escavação na região foram relatados indicando a preponderância das camadas reliquiadas nas direções dos movimentos e nas cargas de ancoragens. O objetivo deste trabalho foi descrever o processo de validação de um caso de escavação em talude com camadas reliquiadas estabilizada com ancoragens. Discutiu-se informações sobre modelos constitutivos adequados, ensaios utilizados, escolha de parâmetros e geometria do modelo. Foi necessário utilizar uma combinação de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais para obter os parâmetros geotécnicos e modelar o solo com modelos constitutivos que levam em consideração a degradação da rigidez com as deformações, e as camadas reliquiadas com interfaces seguindo a geometria identificada em campo. A validação foi satisfatória e foi possível reproduzir os dados de instrumentação de inclinômetros, marcos superficiais à montante e cargas das ancoragens.

PALAVRAS-CHAVE: Camada Reliquiada, Solo Residual, Estrutura Ancorada, Falha Geológica

ABSTRACT: The city of Niterói has soil slopes originating from a metasedimentary gneiss, resulting in centimeter-thick relic layers of low resistance and high deformability, often posing challenges during excavation between layers of high resistance and low deformability. Excavation cases in the region have been reported, indicating the predominance of relic layers in the directions of movements and in the anchor loads. The aim of this study was to describe the validation process of an excavation on a slope with relic layers stabilized with anchors. Information on appropriate constitutive models, tests and parameters used, and model geometry were discussed. A combination of direct shear and triaxial tests was used to obtain geotechnical parameters and to model the soil with constitutive models that consider stiffness degradation with deformations and relic layers with interfaces following the geometry identified in the field. The validation was satisfactory, and it was possible to reproduce the data from the inclinometer, surface benchmarks upstream, and anchor loads.

KEYWORDS: Reliquiae Layer, Residual Soil, Anchored Structure, Geological Fault

1 INTRODUÇÃO

Escavações em área urbanas com topografia acidentadas são cada vez mais comuns. Esse fenômeno acontece no município de Niterói, o crescimento urbano e a necessidade de maior aproveitamento do terreno criam uma demanda por escavações em taludes da cidade. A geomorfologia da região é constituída de colinas com vertentes convexo-côncavas de gradientes suaves a moderados e topos arredondados (CPRM, 2017). O solo, por sua vez, é originado do gnaisse kinzigito, um biotita gnaisse bandado com intercalações de quartzitos e lentes de rocha calcissilicáticas (Marques, 2010). Os solos formados por essa rocha constituem-se de areia

fina a média, argilo-siltosa, de plasticidade baixa a média, em alguns casos alta, formando espesso pacotes de solo (Gomes Silva, 2006).

O mapa geológico do local (UFF, 2004) aposta a presença de lineamentos estruturais e zonas de falhamento separando duas unidades litológicas distintas: a Unidade Ingá e Unidade Gnaiss facoidal sem zonas chanockíticas (Figura 1). As escavações de interesse ocorrem todas na Unidade Ingá, que se caracteriza por ser um conjunto gnáissico, composto por níveis centimétricos a decamétricos intercalados, de leucognaisses biotíticos, gnaisses, feldspáticos e gnaisses quartzosos de aspecto quartzítico, além de presença de dobras e contatos por falha com o gnaiss facoidal encaixante. Ehrlich *et. al* (2017) discute a questão das camadas reliquias em escavações da região.

Na Figura 1 estão localizadas as outras escavações que identificaram camadas reliquias no todo ou em trechos do talude, estabilizados com ancoragens ou grampos. A Ocorrência III, é o caso de estudo deste trabalho, mais detalhes sobre os outros casos podem ser encontrados em Ehrlich e Silva (2015) e Silva (2017) para a Ocorrência I; Gomes Silva (2006) e Lima (2007) para a Ocorrência II; Saramago *et al.* (2010) para a Ocorrência IV. Modelagem numérica de cada caso pode ser encontrada em Moura (2018).

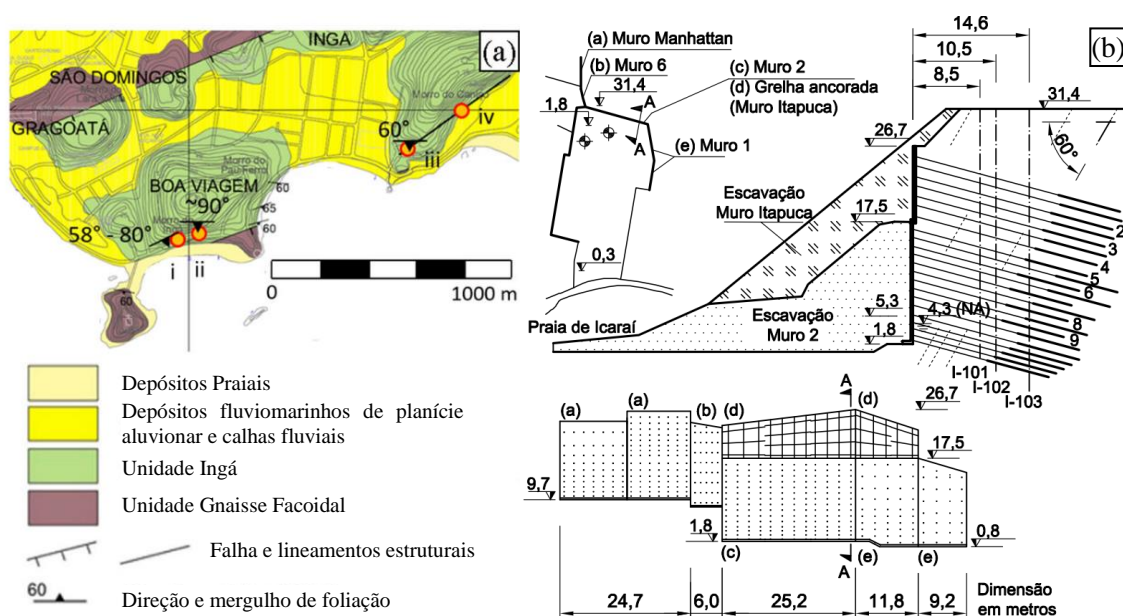


Figura 1 - (a) Mapa geológico geotécnico da região (b) Planta baixa, corte e visão frontal do muro do caso de estudo (Moura *et. al.*, 2023).

2 DESCRIÇÃO DO CASO

2.1 Caso de estudo

A Obra do estudo de caso passou diversas etapas durante a construção de seus diversos muros. Mais detalhes podem ser encontrados em Ehrlich (2004) e Moura *et al.* (2023). A primeira parte da obra ocorreu com a escavação da cota +31,4 m até a cota 17,5 m e foi estabilizada com o Muro Itapuca, com estabilização de três níveis de ancoragem. A obra foi reiniciada para a escavação até a cota final de +1,8 m para a construção de edifício de 17 pavimentos. Primeiramente, o Muro Itapuca foi reforçado com uma grelha possuindo 4 níveis de ancoragem. Escavação reiniciou com a construção do Muro 1, 2 e 6. Quando a escavação atingiu a cota +5,3 m, rachaduras a montante foram notadas e a obra foi paralisada. Amostras indeformadas foram obtidas no trecho final da escavação para a realização de ensaios de caracterização e ensaios de cisalhamento direto. Foram observados no campo e na amostra indeformada camadas reliquias no solo, onde foi possível diferenciar três camadas distintas de solo. A caracterização do solo encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Características das amostras (Ehrlich, 2004).

Camada	% < 2 (mm)	% < 20 (μm)	% < 2 (μm)	Limites (%)		USCS a	h ^b (%)	γ^c (kN/m ³)	Ia	c ^d (kPa)	Φ^e (°)
				LL	IP						
1	100	52	28	102	77	MH	23,5	20,0	2,75	20	27
2	79	13	4	NP	-	SM	9,1	19,1	-	80	36
3	99	23	10	NP	-	SM	12,3	20,2	-	20	39

^a Sistema Unificado de Classificação de Solo; ^b umidade; ^c peso esp. úmido; ^d coesão; ^e âng. atrito

Das três camadas uma se destacou por ter um alto IP e atividade da argila (Ia). Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados de forma a coincidir o plano de ruptura com o plano das camadas. Os resultados demonstraram que a resistência da camada 1 foi significativamente menor do que as outras duas.

Um novo projeto foi elaborado baseando-se na ruptura da camada 1. O muro 2 passou por reforços com novos níveis de ancoragens. O restante da escavação foi feito com nichos e foi finalizada sem nenhum problema adicional.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica passa pela determinação da geometria, dos modelos constitutivos e dos parâmetros geotécnicos e estruturais da obra. As camadas reliquias por sua característica de pequena espessura, introduziu um nível de desafio em sua simulação. Como ocorrido em Silva (2017) e Moura (2018), as camadas reliquias comandaram o comportamento da obra com relação a cargas e movimentação. Além disso, os inclinômetros instalados demonstraram que os deslocamentos foram altamente ortogonais à face (ângulos de 2° a 9°), mesmo estando próximo a região côncava do talude (Figura 2). Devido a esses fatos, e de estar desfavorável a escavação, foi escolhido analisar a obra em estado plano de deformação. O modelo foi dividido em duas partes: o solo residual mais resistente, simulado como região e o solo residual mais fraco, simulado como interface.

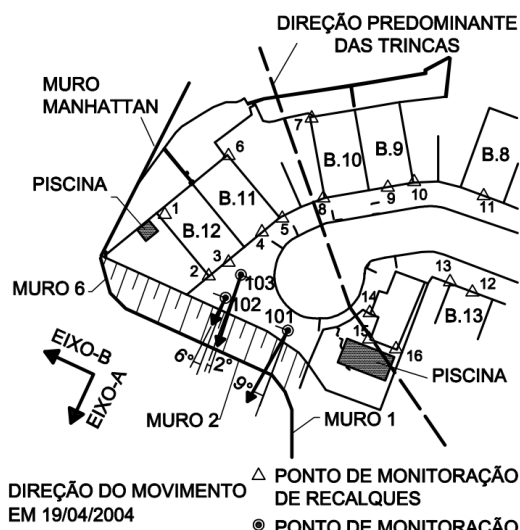


Figura 2 - Localização da instrumentação a montante. Observar a direção final de movimentação dos inclinômetros (Moura *et. al.*, 2023).

3.1 Modelo constitutivo

Silva (2017) analisando um caso de obra similar na região, indicou a importância de se considerar o comportamento hiperbólico do solo residual e utilizou o modelo constitutivo hiperbólico de Duncan e Chang (1970) para modelar o caso. O modelo de *Hardening Soil* (HS) é bastante utilizado para simular a degradação

da rigidez com as deformações (Zhang et al., 2015; Harahap e Ou, 2020; Ying et al., 2022). Por ser uma escavação de grande altura, o modelo constitutivo mais indicado para simular as condições de trabalho deve considerar também a degradação da rigidez com as pequenas deformações, Hardening Soil small Strain (HSs) (Likitlersuang *et al.*, 2013). A camada reliquiária, por sua vez, foi modelada com o modelo constitutivo de ruptura Mohr-Coulomb com a rigidez dependente do eixo y . A face de concreto armado foi modelada como região com modelo constitutivo linear-elástico. O concreto projetado do topo como “plate” com modelo constitutivo linear-elástico. As ancoragens foram modeladas com o modelo elástico-plástico.

A obtenção dos parâmetros geotécnicos para tais modelos não é simples e direta, e precisa passar por observações descritas a seguir.

4.1 Parâmetros geotécnicos

Nas amostras retiradas do campo foi possível identificar três camadas diferentes de solo, mas foi impossível separá-la individualmente para a realização de ensaios triaxiais. Uma amostra para o ensaio triaxial envolveria as diversas camadas de solo, resultando em uma ruptura conjunta. Enquanto a direção e mergulho das camadas condicionam uma ruptura plana por apenas uma camada. Considerações precisaram ser feitas para a resolução deste problema.

4.1.1 Parâmetros de ruptura

Ensaio de cisalhamento direto são mais indicados para a obtenção de parâmetros de ruptura, pois com esse ensaio podemos direcionar a ruptura para a direção do plano das camadas reliquiárias e assim obter os dados para camadas únicas.

O estado plano de deformações na ruptura tem o efeito de aumentar a resistência do solo (Kulhawy e Mayne, 1990) comparado à resistência obtida pelo ensaio de cisalhamento direto. Para considerar esse fenômeno foi utilizada a expressão proposta por Rowe (1969). O ângulo de dilatação foi obtido com as recomendações de Bolton (1986).

4.1.2 Parâmetros de deformabilidade

Ensaio de cisalhamento são inúteis para a obtenção dos parâmetros de deformabilidade, nesse caso devemos usar os ensaios triaxiais. Correlacionando o E_{50} com a tensão confinante (σ_3) foi possível montar uma nuvem de pontos com os ensaios triaxiais disponíveis. Como início da validação foi admitido que a reta superior da nuvem de pontos corresponderia à rigidez da matriz de solo, e a reta inferior da nuvem de pontos seria a rigidez das camadas reliquiárias. A curva validação do solo residual e da camada reliquiária ficaram quase coincidentes e cruzando a estimativa da rigidez inferior. Os ensaios disponíveis em Lima (2007) e Silva (2017) foram ensaios triaxiais drenados de carregamento axial (CID) e de descarregamento lateral (CID-E).

O mesmo efeito de estado plano de deformação ocorre na rigidez, uma majoração com um fator de 2,2 foi introduzido nos ensaios triaxiais disponíveis através da Teoria da Elasticidade.

Os parâmetros para o modelo HSs do solo residual foram obtidos a partir dos trabalhos de Biarez e Hicher (1994) para o G_0^{ref} e Vucetic e Dobry (1991) para $\gamma_{0.722}$. Os parâmetros de solo e da estrutura foram resumidos na Tabela 2.

4.2 Geometria do modelo

A geometria do modelo é de suma importância, pois efeitos numéricos indesejáveis podem afetar os resultados. As análises de sensibilidade das condições de contorno são apresentadas a seguir na Figura 3.b, considerando a distância entre o muro e a fronteira direita e esquerda e a fundação do modelo. O uso de interfaces para modelar as camadas reliquiárias é intensivo computacionalmente falando, então um mínimo de interfaces deve ser utilizado, mas sem prejuízo nos resultados.

Tabela 2 - Resumo dos parâmetros geotécnicos e estruturais utilizados.

Identificação	Solo Residual	Camada Reliquiar	Concreto Projetado			
Modelo Constitutivo	HS small	Mohr–Coulomb	Linear Elástico			
Tipo	Região	Interface	Espessura, d (m)	0,15		
Drenagem	Drenado	Drenado	Peso específico, γ (kN/m ³)	25		
Peso Específico			E (GPa)	18		
γ_{umid} (kN/m ³)	20,0	20,0	Peso Linear, w (kN/m/m)	1,05		
γ_{sat} (kN/m ³)	21,0	21,0	Face de Concreto Armado [Grelha/Muro Itapuca / Muro 2]			
Parâmetros de Ruptura			Modelo Constitutivo	Linear Elástico		
c (kPa)	20,0	20,0	Espessura, d (m)	0,19/0,20/0,30		
ϕ (°)	44,0	30,0	Peso esp., γ (kN/m ³)	25		
ψ (°)	14,0	0,0	E (GPa)	18		
Parâm. de Rigidez	Parâm. de Ruptura Avançados		Anchors (Trecho Livre) [Grelha/Muro Itapuca/Muro 2]			
E_{50}^{ref} (MPa)	38	c'_{inc} (kPa)	0,0	Modelo Constitutivo	Elastico-plástico	
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (MPa)	36	y_{ref} (m)	31,40	Φ_{steel} (cm)	3,2	
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (MPa)	114	Parâm. de Rigidez		E (GPa)	210	
m	0,7	E' (MPa)	17,0	$L_{\text{esp,horizontal}}$ (m)	2,24/1,75/2,24	
G_0^{ref} (MPa)	116.425	ν	0,30	Carga Máxima, $F_{\text{máx}}$ (kN)	844,4	
$\gamma_{0,7}$	0,0001	Parâm. de Rigidez Avançados		Anchors (Trecho fixo) [Grelha/Muro Itapuca/Muro 2]		
Parâmetros Avançados			E'_{inc} (MPa)	1,5	$\Phi_{\text{aço}}$ (cm)	3,2
ν_{ur}	0,2	y_{ref} (m)	31,4	Φ_{furo} (cm)	10	
p_{ref} (kPa)	100	σ_{tension} (kPa)	0,0	E (GPa)	21,5	
k_0^{nc}	0,305			$L_{\text{esp,horizontal}}$ (m)	2,24/1,75/2,24	
R_f	0,7			Peso Linear, w (kN/m/m)	0,12	
σ_{tension} (kPa)	0,0					

O modelo deve seguir as características das camadas reliquias como, espaçamento, persistência, direção e mergulho. Foi necessário identificar o local onde ocorriam camadas reliquias, no caso de estudo, as camadas reliquias foram encontradas por todo o talude. O espaçamento identificado em campo foi de aproximadamente 25 cm, sendo essa distância reproduzida no modelo. A direção e mergulho no campo estava desfavorável à escavação e com um mergulho de 60°, representado no modelo. As camadas reliquias foram modeladas até a região dos bulbos dos tirantes. A persistência na fundação, no entanto, foi um obstáculo quanto ao processamento computacional, sendo necessário realizar um estudo de sensibilidade. Foi preciso estudar a influência que a profundidade da camada reliquiar abaixo da cota de escavação teria no modelo (Figura 3a), a profundidade F de 12 metros foi a escolhida.

O número total de elementos do modelo validado foi de 22.853. A Figura 4 apresenta a rede de elementos finitos utilizada junto com as dimensões.

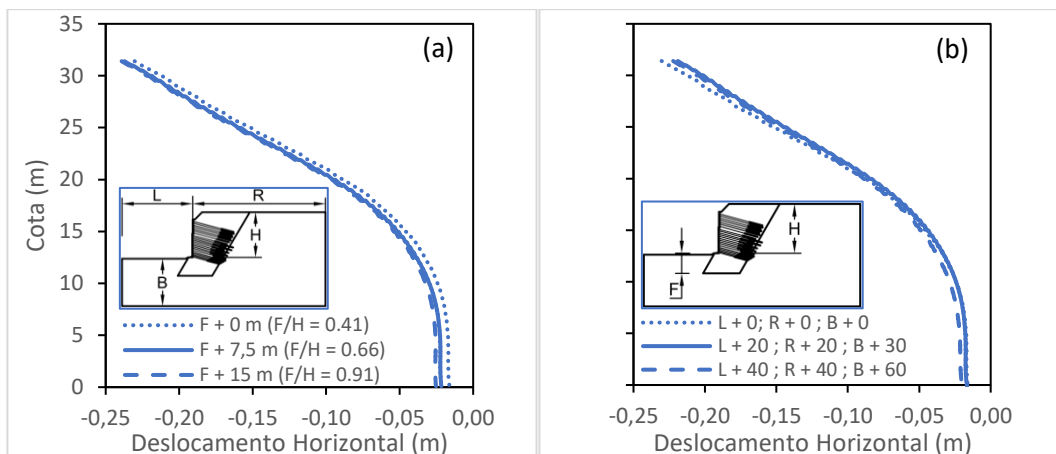


Figura 3 - Análise de sensibilidade: (a) condições de contorno (b) fundação das camadas reliquias fracas.

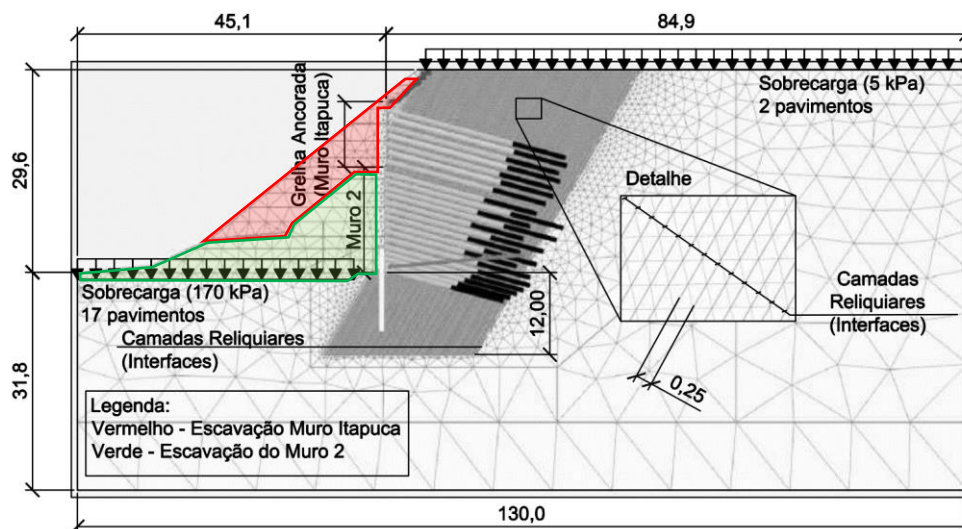


Figura 4 – Modelo de elementos finitos validado (Moura *et. al.*, 2023). Dimensões em metros.

4 RESULTADOS

Os resultados do modelo numérico foram comparados com os dados obtidos dos inclinômetros, marcos superficiais à montante e cargas nos tirantes (Figura 5).

Os inclinômetros foram instalados no momento em que a cota de escavação estava em +5,3 m. A primeira leitura se refere ao momento em que a escavação estava na cota +3,6 m com as respectivas ancoragens instaladas. A segunda leitura corresponde a escavação na cota de +1,8 m e as respectivas ancoragens. E a última leitura com a escavação na cota +0,8 m e o edifício construído. Houve uma discrepância entre as leituras do I102 comparado ao I101 e I103, fato atribuído a um malfuncionamento do mesmo por estar próximo a região dos bulbos de ancoragem. No geral, o modelo representou o comportamento medido pelos inclinômetros. As diferenças relativas das medidas de deslocamentos máximos horizontais entre o medido e o modelo foram (I101) +27%, (I102) +69% e (I103) -15%.

Os marcos superficiais foram bem reproduzidos pelo modelo, com a forma da curva análoga ao medido, com uma pedição acima média de 1 mm no marco B12.

As cargas medidas foram bem representadas na Grelha e no Muro 2. Em ambos os casos durante a primeira escavação, houve um aumento da carga média. No momento dos reforços, o modelo reproduziu a queda de carga média, junto ao que foi medido no campo. Após o reinício da escavação, a carga medida decresceu ligeiramente no Muro 2, e no modelo permaneceu constante, enquanto que na Grelha, a carga medida apresentou uma queda. Fato esse não representado pelo modelo. A queda da carga pós fim da obra foi atribuída a mudança da umidade do solo ao longo do ano que pode ter alterado a coesão aparente do solo.

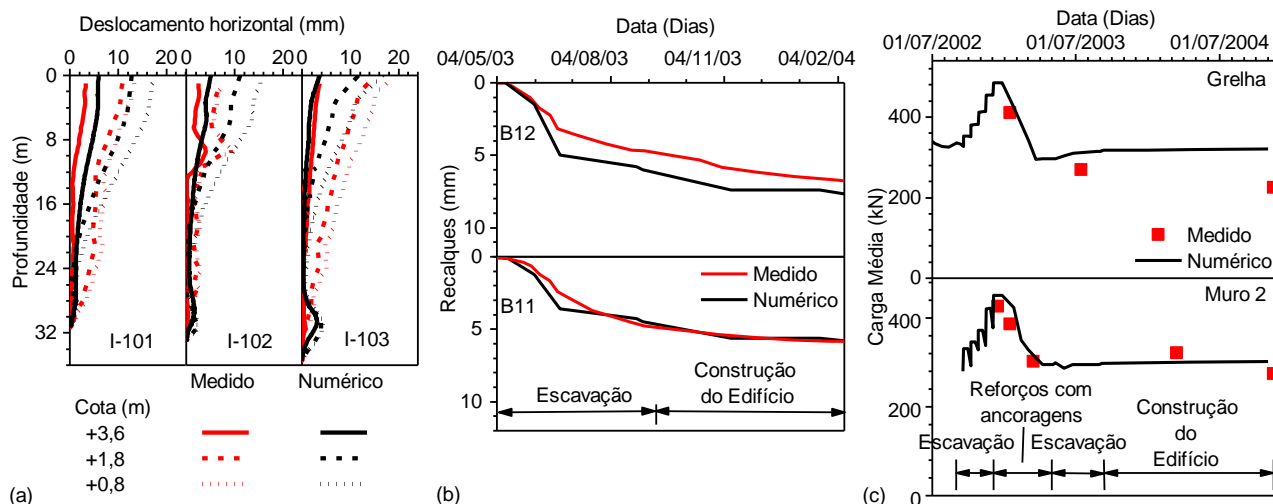


Figura 5 - Dados de instrumentação validados: (a) inclinômetros, (b) marcos superficiais à montante e (c) cargas nas ancoragens (Moura *et. al*, 2023).

5 CONCLUSÕES

Escavações em solos com camadas reliquiarias podem ser problemáticas se as camadas reliquiarias forem desfavoráveis a escavação. Métodos tradicionais de sondagem à percussão são insuficientes para detectar e avaliar a resistência de tais camadas, sendo necessário a observação visual em campo e ensaios de laboratório para determinação de parâmetros geotécnicos. Os ensaios triaxiais, no entanto, não são úteis para determinar os parâmetros de ruptura adequados, pois pela característica de camadas reliquiarias finas do solo, é provável que em uma amostra de ensaio triaxial contenha diversas camadas e a forma de ruptura passe pelo conjunto. Dependendo da direção e mergulho das camadas reliquiarias com a geometria da obra, a ruptura em campo passa apenas pela camada mais fraca de solo. O ensaio indicado para essa situação é o de cisalhamento direto, onde é possível forçar a ruptura no plano da camada reliquiaria. No entanto, o ensaio triaxial ainda foi útil para determinar a deformabilidade do solo, sendo necessário utilizar uma bateria de ensaios.

A consideração da degradação da rigidez do solo com as deformações também foi importante para a validação do modelo. As camadas reliquiarias fracas, por sua característica de serem finas, logo se distorcem e atingem a plastificação, sendo assim o modelo de ruptura Mohr-Coulomb com rigidez apenas dependente da profundidade foi suficiente para modelar o caso. As camadas mais resistentes, por sua vez, no geral ficam mais distantes da ruptura, assim foi necessário modelar a degradação da rigidez. O modelo constitutivo Hardening Soil small Strain foi utilizado, pois graças a grande altura da escavação, até mesmo a simulação da degradação da rigidez de pequenas deformações foi necessária.

As camadas reliquiarias fracas tiveram o potencial de comandar o comportamento geral da escavação, sendo determinantes nas cargas das ancoragens e nas movimentações do talude. No caso de estudo, foram suficientes para transformar um caso de análise que à primeira vista era de 3 dimensões, em um caso de 2 dimensões. De tal forma, os parâmetros de ruptura e deformabilidade foram corrigidos para considerar o efeito do estado plano de deformação de acordo com trabalhos disponíveis na literatura.

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

- Biarez, J., Hicher, P.Y. (1994). *Elementary Mechanics of Soil Behaviour*. A A Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Bolton, M. D. (1986). *The strength and dilatancy of sands*. *Geotechnique* 36(1):65–78.

- CPRM (2017). *Carta Geomorfológico – Município de Niterói/RJ – 1:30.000*. Relatório do Serviço Geológico do Brasil.
- Duncan, J.M. e Chang, C.Y. (1970). *Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils*. Journal of Soil mechanics and Foundation Division, ASCE, SM5, pp. 1629-1653.
- Ehrlich, M. (2004). *Performance of a 25m high anchored wall for stabilization of an excavation in gneiss saprolite. Landslides: Evaluation and stabilization*. Proc. IX Int. Symp. on Landslides, Rio de Janeiro, Vol. 2, p.1561-1568.
- Ehrlich, M. e Silva, R.C. (2015). *Behavior of a 31 m high excavation supported by anchoring and nailing in residual soil of gneiss*. Engr. Geology, 91, p. 48-60.
- Ehrlich, M., Moura, M. V. S., Silva, R. C., (2017). *Escavações em Solo Residual com Camadas Reliquiarias*. In: XII COBRAE, Florianópolis/SC, Brasil.
- Gomes Silva, A. M. B. (2006), *Condicionantes Geológico-Geotécnicos de escavação grampeada em solo residual*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Harahap, S., Ou, C., (2020). *Finite element analysis of time-dependent behavior in deep excavations*. Comput Geotech 119:103300.
- Kulhawy, F. H., Mayne, P. W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA, Report EL-6800
- Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowski, D., Oh, E., Balasubramaniam, A., (2013). *Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT*. Soils and Foundation 53(5):756-773.
- Lima, A. P., (2007). *Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss*. Tese de D.Sc., PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Marques E. A. G., Barroso E. V., Menezes Filho A. P., Vargas E. D. A. Jr (2010) *Weathering zones on metamorphic rocks from Rio de Janeiro—Physical, mineralogical and geomechanical characterization*. Eng Geol 111(1-4):1-18.
- Moura, M. V. S., (2018). *Avaliação do comportamento de contenções em Niterói/RJ*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Moura, M. V. S., Ehrlich, M., Mirmoradi, S. H., (2023). *Effects of reliquiaie layer and excavation procedure on the behaviour of anchored structures*. Acta Geotechnica 18:6111-6122.
- Rowe, P.W. (1969). *The relation between the shear strength of sands in Triaxial compression, plane strain and direct shear*. Geotechnique 19(1):75-86.
- Saramago, R. P., Ehrlich, M., Silva, L. J. R. O. B, Mendonça, M. B., Ferreira Jr, J. A., (2010). *Características Geotécnicas de uma Escavação em Região de Falha Geológica*. In: Proceedings of the XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, RS, Brasil.
- Silva, R.C. (2017). *Comportamento de uma Escavação com Cortina Ancorada e Grampeamento em Solo Residual com Camadas Reliquiarias*, D.Sc., COPPE/UFRJ, 210 p.
- UFF (2004). *Projeto Avaliação das encostas de Niterói com Vista aos Fenômenos de Deslizamentos – Setor 1 (Zonas Centro, Norte e Sul)*. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 2004.
- Vucetic, M., Dobry, R. (1991) *Effect of soil plasticity on cyclic response*. J Geotechn Eng ASCE 117(1):89-107
- Ying, H., Cheng, K., Liu, S., Xu, R., Lin, C., Zhu, C., Gan, X., (2022). *An efficient method for evaluating the ground surface settlement of Hangzhou metro deep basement considering the excavation process*. Acta Geotechnica 17:5759-5771.
- Zhang, W., Goh, A. T. C., Xuan, F. (2015) *A simple prediction model for wall deflection caused by braced excavation in clays*. Comput Geotech 63:67-72.