

Análise numérica de uma escavação grampeada: Obra instrumentada em Hong Kong

Jéssica Pontes Seabra

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: jessicaseabra@yahoo.com.br

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: sieira@eng.uerj.br

André Pereira Lima

Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: andre.pereira@uva.com.br

RESUMO: A técnica de solo grampeado vem sendo cada vez mais utilizada em obras de estabilização de taludes. Com isso, o uso de modelos computacionais em projetos de obras de solo grampeado vem se tornando cada vez mais presente nas empresas de Geotecnia. Este trabalho apresenta um estudo de caso de uma obra instrumentada em Hong Kong, que consiste de uma escavação de 13,50 metros de altura em um solo residual granítico. Inicialmente, foi realizada a calibração do modelo, comparando-se os resultados da instrumentação de campo com as previsões numéricas fornecidas pelo Programa PLAXIS, de elementos finitos. Posteriormente, foram realizadas análises para diferentes espessuras de revestimento da face, avaliando-se a sua influência na magnitude dos deslocamentos horizontais máximos. Foi possível, também, executar uma análise dos esforços máximos nos grampos através da modelagem e comparar com os resultados experimentais. A análise dos resultados possibilitou confirmar a capacidade e utilidade do programa Plaxis no desenvolvimento e elaboração de projetos de solo grampeado. A espessura do revestimento da face não mostrou influência na deformabilidade da estrutura, confirmando sua finalidade de conter possíveis rupturas localizadas com o andamento dos serviços, não atuando ativamente para diminuição dos deslocamentos da face.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Grampeado, Revestimento da face, Modelagem computacional.

1 INTRODUÇÃO

Em 1945, o Professor Landislau Von Rabcewicz desenvolveu uma técnica para avanço de escavações em túneis rochosos (Mitchell e Villet, 1987). A partir deste procedimento, originou-se a técnica de reforço de solos através de grampos. Após a execução da técnica em rochas, novos experimentos foram realizados em locais com menores resistências, como rochas alteradas e posteriormente em solos. Desde então, esta técnica antes chamada de NATM (“New Austrian Tunnelling Method”) passou a ser

chamada de Solo Pregado ou Solo Grampeado (“Soil Nailing”).

A partir de 1975, a utilização da técnica de solo grampeado teve grande avanço na França, Alemanha e EUA e em 1979 passou a ser tema de congressos internacionais, quando se iniciou sua divulgação a nível mundial.

O solo grampeado é um método de reforço “in situ” utilizado para a estabilização de taludes naturais ou escavados. É constituído a partir da introdução de elementos passivos (hastes semi-flexíveis, resistentes a flexão composta) nos solos e revestidos por uma camada que garanta a proteção da face do

talude, seja concreto projetado, telas metálicas de alta resistência ou, até mesmo e somente a proteção vegetal. Esses elementos passivos, comumente chamados de grampos, podem ser barras ou tubos de aço e/ou barras sintéticas de seção cilíndrica ou retangular. São posicionados horizontalmente, ou inclinados no maciço, de forma a introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento (Ortigão, 1993).

O processo executivo, em taludes de corte, consiste, basicamente, em fases sucessivas de escavação, procedidas pela perfuração, instalação do grampo e injeção. Finalmente, procede-se à execução da face, comumente feita com concreto projetado e tela metálica eletrosoldada. Alternativamente, outros elementos estão sendo utilizados na superfície do talude, tais como: telas metálicas de alta resistência e proteção com geomanta com posterior revegetação, etc.

A técnica utilizada para contenção de cortes deve ser executada de forma descendente, a fim de garantir a estabilização do trecho do maciço escavado conforme o avanço do restante do corte, até que atinja a cota recomendada em projeto. Paralelamente a estes serviços, são executados os elementos de drenagem. As Figuras 1 a 3 ilustram as diferentes etapas do processo executivo. Detalhes sobre a execução de escavações grampeadas podem ser obtidos em Lima (2007).



Figura 1. Escavação em bermas (Seabra, 2015).



Figura 2. Perfuração e instalação do grampo para posterior injeção: Duplicação da Serra do Cafezal, Rodovia Regis Bittencourt, km 353 (Seabra, 2015).



Figura 3. Revestimento: Concreto projetado sobre tela metálica. Desemboque do novo túnel da nova subida de Petrópolis (Seabra, 2015)

O revestimento da face do talude não possui função estrutural, por absorver apenas pequenos carregamentos, mas é responsável pela estabilização da face, evitando as rupturas localizadas e protegendo a face dos processos erosivos causados pelas chuvas e intempéries.

Com o avanço da técnica de solo grampeado, estudos vêm sendo realizados visando a melhoria na relação custo x benefício x agilidade nas obras. Atualmente, existem diferentes tipos de revestimento da superfície do talude escavado: concreto projetado com armação comum (tela eletrosoldada), concreto projetado com fibras metálicas ou de polipropileno adicionadas diretamente na betoneira, revestimento vegetal, revestimento com tela metálica, blocos pré-moldados de concreto, revestimento com tela metálica em combinação com geomanta, etc. As Figuras 4 a 6 ilustram alguns tipos de revestimento utilizados.



Figura 4. Revestimento da face em concreto projetado sobre tela metálica (Seabra, 2015).



Figura 5. Revestimento da face com tela metálica e biomanta (Maccaferri, 2011).



Figura 6. Revestimento da face com concreto projetado e fibras metálicas (Seabra, 2015).

O objetivo do presente trabalho consiste na avaliação da influência da espessura do paramento nas deformações do talude escavado.

2 CASO ESTUDADO

2.1. Introdução

A obra estudada consiste em uma escavação com 13,50 m de altura, executada em Hong Kong, para a construção de uma grande estação de bombeamento (Wong et al, 1997). O local

onde a obra foi executada está situado no extremo de um declive natural, com inclinação média de 33°, na parte Norte de Hong Kong. Com base em informações obtidas a partir de uma investigação detalhada do local, a geologia da área compreende uma camada de granito completamente decomposto, que recobre uma camada de granito moderadamente decomposto, com profundidades de 12 m e 20 m. A escavação foi realizada no trecho de granito completamente decomposto.

O corte realizado foi executado com inclinação de até 80°. Os espaçamentos horizontal e vertical dos grampos foram 1,0 m e 1,5 m, respectivamente. O comprimento dos grampos variou entre 6 m e 11 m. Os grampos das linhas 1 a 4 possuem 10 m de comprimento. As outras linhas são formadas por grampos de 11 m. Os grampos foram executados com inclinações de 10° com a horizontal, e as barras de aço galvanizado possuíam diâmetros de 32 mm a 40 mm. Para o revestimento da face, foi executado um concreto projetado reforçado com camada de tela de aço com 10 cm de espessura.

A escavação em solo grampeado foi instrumentada, para monitoramento dos deslocamentos horizontais e carga nos grampos.

A instrumentação consistiu em:

(a) Inclínometria (Figura 7): Um inclinômetro foi instalado na parte mais crítica da encosta grampeada para acompanhamento dos deslocamentos horizontais durante e após a construção. O inclinômetro foi instalado a um metro da crista do talude;

(b) Extensometria (Figura 8): Na seção mais crítica da encosta, 9 grampos foram instrumentados para medida da distribuição das cargas nos mesmos. Ao longo de cada grampo, 6 extensômetros foram instalados na barra de aço. O monitoramento foi realizado no período de Abril de 1993 a Julho de 1994, com leituras semanais antes e após a execução da obra.

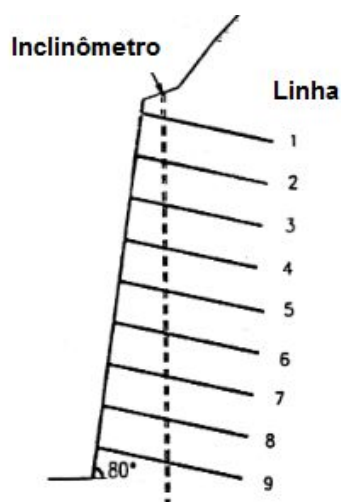


Figura 8. Seção crítica: posicionamento do inclinômetro (Wong et al, 1997).

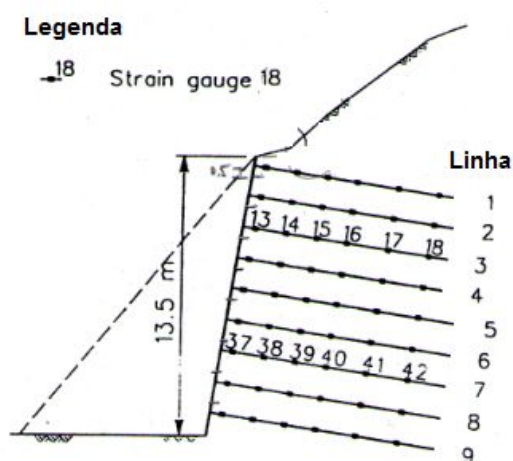


Figura 8. Seção crítica: posicionamento dos extensômetros (Wong et al, 1997).

2.2. Metodologia

As análises numéricas foram executadas com o programa computacional PLAXIS, baseado no método dos elementos finitos (Brieggreve, 2002), e consistiram na reprodução da escavação de Hong Kong. Uma vez calibrado o modelo, a partir da reprodução numérica dos resultados da instrumentação de campo, procedeu-se ao estudo da influência da espessura da face na deformabilidade da escavação em solo grampeado. A geometria adotada nas análises numéricas está apresentada na Figura 9. Observa-se que a escavação foi totalmente realizada na região onde o granito encontrava-se completamente decomposto.

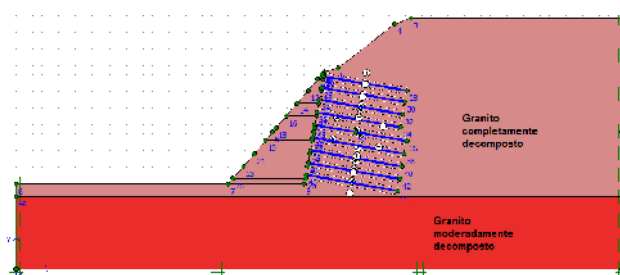


Figura 9. Geometria adotada nas análises numéricas (Seabra, 2015).

Os materiais envolvidos (granito completamente e moderadamente decomposto) foram representados pelo modelo elastoplástico, com critério de resistência de Mohr Coulomb. Os parâmetros adotados estão apresentados na Tabela 1. Os parâmetros coesão e ângulo de atrito do material granito totalmente decomposto foram obtidos através da investigação geotécnica detalhada realizada na obra e descrito por Wong et al. (1997). Os demais parâmetros foram obtidos a partir de uma pesquisa realizada para construção de um túnel na cidade de Porto, Portugal, que apresentava as mesmas características que o caso analisado neste trabalho: solo residual de granito (granito totalmente decomposto) situado acima de uma camada de granito moderadamente decomposto.

Tabela 1. Parâmetros geomecânicos.

Granito	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	c kPa	ϕ
Totalmente decomposto	19,0	60	0,30	16	37°
Moderadamente decomposto	25,0	6.000	0,20	20	37°

Legenda: γ = peso específico do material; E = módulo de deformabilidade; ν = coeficiente de Poisson; c = coesão; ϕ = ângulo de atrito;

Para a representação do grampo, foi utilizado o elemento de barra, com os parâmetros listados na Tabela 2. De forma a avaliar a influência da espessura do paramento nas deformações da escavação, procedeu-se à análise com 3 diferentes valores de espessura. O paramento foi simulado por um elemento de barra de concreto, com rigidez axial e à flexão. Os parâmetros correspondentes às 3 diferentes espessuras da face também estão reunidos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do grampo e da face.

Grampo	ϕ barra (mm)	E (MPa)	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)
	32,00	210.000	168.806,40	10,80
Face	H parede (cm)	E (MPa)	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)
	10	25.000	2.500.000,00	8.333,33
	15	25.000	3.750.000,00	28.125,00
	20	25.000	5.000.000,00	66.666,67

As análises numéricas procuraram reproduzir fielmente as etapas de escavação e instalação dos grampos. O programa Plaxis permite inserir, na fase de cálculo, as diferentes etapas de escavação, a ativação dos grampos e da interface solo-grampo, e a ativação da parede, em tempos pré-definidos. As etapas consistiram em escavação, instalação do grampo e execução do revestimento, em intervalos de 24 horas entre uma etapa e outra. A Figura 10 apresenta a simulação da última fase de escavação, com as diferentes etapas introduzidas no Plaxis.

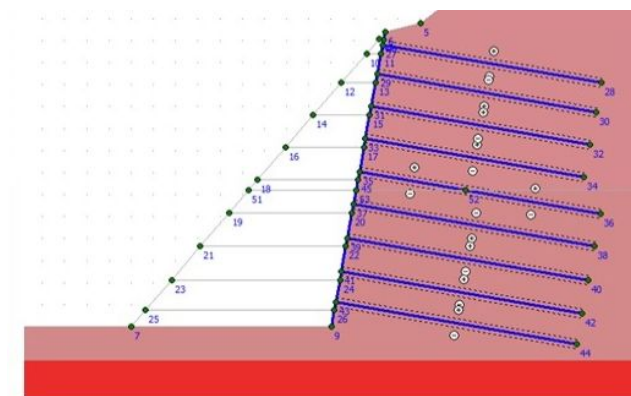


Figura 20. Simulação numérica da última fase de escavação com o Plaxis.

2.3. Calibragem do modelo numérico

De forma a calibrar o modelo e validar os resultados numéricos, procedeu-se, inicialmente, à comparação entre as previsões numéricas de deslocamentos horizontais e esforços nos grampos com os resultados experimentais (instrumentação de campo).

A força em cada nível de escavação/instalação do grampo foi representada como um parâmetro adimensional F_n na profundidade relativa z/H , onde:

$$F_n = \frac{T_{max}}{\gamma \cdot H \cdot S_v \cdot S_h} \quad (1)$$

Onde: $T_{m\acute{a}x}$ = esforço máximo no grampo
 γ = peso específico
 S_v e S_h = espaçamento vertical e horizontal, respectivamente.

A Figura 11 confronta os esforços previstos numericamente com os fornecidos pela extensometria, em termos de forças e profundidade normalizadas. Observa-se que os esforços variam com a profundidade, com um crescimento praticamente linear no trecho central (em ambos os casos). Em alguns pontos, os esforços medidos e previstos foram coincidentes, indicando uma boa confiabilidade dos resultados numéricos.

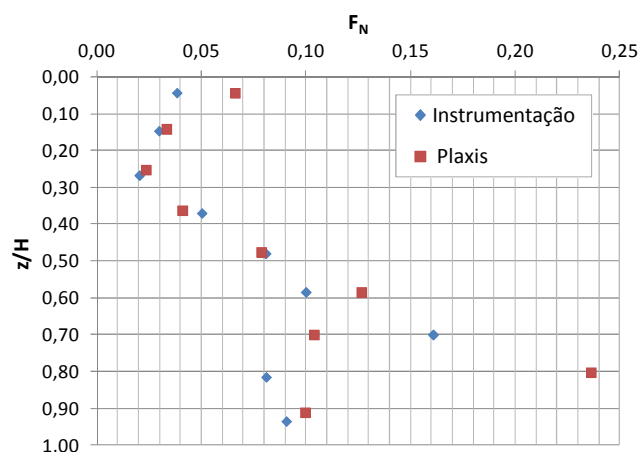


Figura 11. Distribuição da força normalizada: Plaxis x Extensometria

2.4. Influência da espessura da parede no desempenho da obra em solo gramepado

As análises numéricas iniciais foram executadas para a espessura do revestimento executada na obra ($h_{parede} = 10$ cm). Posteriormente, outras modelagens foram realizadas para avaliação da influência da espessura do revestimento da face, de acordo com as espessuras comumente utilizadas nas obras de concreto projetado. O abatimento adequado do concreto projetado via

úmida deve variar entre 7 cm e 15 cm sendo executado em sucessivas camadas de aproximadamente 50 mm cada, enquanto para via seca são executadas camadas com até 10 cm de espessura. Neste caso, foi feito um estudo com espessuras de 6 cm, 7 cm, 8 cm, 15 cm e 20 cm.

Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que a adoção de espessuras entre 6 cm e 20 cm não produz diferenças nas deformações horizontais na estrutura. O revestimento da face é responsável pela estabilização de possíveis rupturas pontuais, não influenciando de forma significativa nos valores de deformação.

Tabela 3. Deslocamentos máximos previstos para diferentes espessuras da face.

Espessura do Revestimento (cm)	Deslocamentos máximos (mm)
6	16,6
7	16,6
8	16,6
10	16,5
15	16,4
20	16,2

A Figura 12 apresenta a distribuição de deslocamentos horizontais prevista numericamente considerando uma espessura de revestimento igual a 8 cm. O mesmo perfil de deslocamentos foi obtido para as demais espessuras de revestimento.

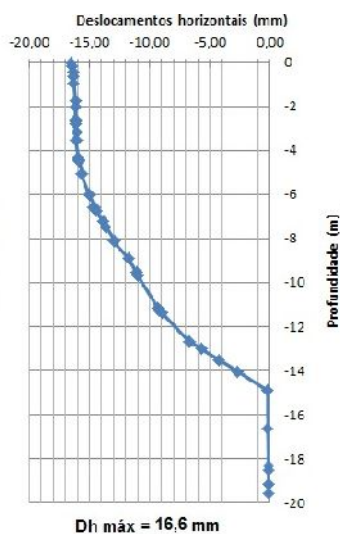


Figura 12. Distribuição dos deslocamentos horizontais (espessura = 8 cm)

3 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal realizar uma retroanálise de uma obra instrumentada para validação do programa PLAXIS e avaliar a influência do revestimento da face na magnitude dos deslocamentos. As análises realizadas permitiram as seguintes conclusões:

- O comportamento da curva deslocamento horizontal x profundidade foi próximo ao encontrado na instrumentação, com valores de deslocamentos máximos semelhantes.
- Os esforços nos grampos foram satisfatoriamente reproduzidos nas análises numéricas, confirmando a confiabilidade das previsões.
- A espessura do revestimento da face não mostrou influência na deformabilidade da estrutura, confirmando sua finalidade de conter possíveis rupturas localizadas com o andamento dos serviços, não atuando ativamente para diminuição dos deslocamentos da face.
- O PLAXIS mostrou ser um software capaz de reproduzir o comportamento de estruturas em solo grampeado. Com os parâmetros de solo bem definidos e a escolha adequada dos modelos constitutivos, os valores previstos podem corresponder aos valores observados no campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Engegraut, pelo apoio ao projeto de pesquisa, representado pela execução dos aterros experimentais e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ORTIGÃO, J. A. R., 1997, "Ensaio de Arrancamento para Projetos de Solo Grampeado", Nota Técnica, Solos e Rochas, ABMS, v. 20, n. 1 (Abr), pp. 39-43.
- LIMA, A. P., 2007, Comportamento de uma Escavação Grampeada em Solo Residual de Gnaiss, Tese de D.Sc.,

DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MITCHELL, J. K. & VILLET, W. C. B. (EDITORS,1987), "Reinforcement of Earth Slopes and Embankments", NCHRP Report 290, USA Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.

SEABRA, J. P. Análise Numérica de uma Escavação Grampeada. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 99p.

WONG, I. H.; LOW, B. K.; PANG, P. Y.; RAJU, G. V. R. Field performance of nailed soil wall in residual soil, Journal of Performance of Constructed Facilities, v. 11, no 3, 1997, pp. 105-112.