

Técnicas de modelagem numérica de escavações de taludes em solo grampeado

Gerscovich, D. M. S.

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, deniseg@uerj.br

Sieira, A. C. C. F.

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, sieira@uerj.br

Lima, A. P.

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, aplima@civ.puc-rio.br

Sayão, A. S. F. J.

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, sayao@civ.puc-rio.br

Resumo: A técnica de estabilização com solo grampeado consiste na introdução de elementos semi-rígidos na massa de solo. Os grampos podem ser cravados ou introduzidos em furo pré-executado, com posterior injeção de nata de cimento. Durante o processo construtivo, os grampos vão sendo mobilizados a partir da descompressão lateral causada pela escavação sucessiva do solo. O presente trabalho tem como objetivo comparar resultados de simulações numéricas de uma escavação vertical de 10,5m de altura, utilizando os programas computacionais FLAC (método das diferenças finitas) e PLAXIS (método de elementos finitos). Foram consideradas diferentes alternativas para simulação do grampo e da interface solo-grampo. Os resultados em termos de deslocamento horizontal da parede da escavação e de transferência de carga entre o solo e o grampo indicaram diferenças em função do tipo de modelagem e do programa adotado. Em termos práticos, a magnitude dessas diferenças pode ser considerada desprezível.

Abstract: Soil Nailing is a reinforcing technique that consists of installing semi-rigid elements in the soil mass. The nails can be driven or introduced in pre-drilled holes, followed by injection of cement mortar. The soil-nail system is mobilized by the lateral decompression caused by successive soil excavation stages. This paper presents the results of numerical simulations of a 10.5m deep soil nailing vertical excavation. The numerical analyses were performed with a finite differences method program (FLAC) and a finite element computer program (PLAXIS). Different numerical alternatives were used for simulating nails and soil-nail interface conditions. The horizontal displacement of the face of the excavation and the soil-nail load transfer mechanism indicated differences depending on the type of simulation and adopted program. However, in practical terms the magnitude of those differences may be disregarded.

1. INTRODUÇÃO

Na maioria das obras, a técnica de estabilização de encostas com solo grampeado envolve a seguinte seqüência de etapas: escavação, colocação e injeção dos grampos em furo pré-executado e execução de parede. A parede é feita normalmente com um

revestimento delgado de concreto projetado, sem função estrutural, com o objetivo de proteger o talude quanto a processos localizados de erosão superficial, causados principalmente pela ação da chuva e outras intempéries naturais.

Em taludes naturais, pode-se executar o reforço desprezando-se a etapa de escavação. Uma outra

alternativa, menos comum, é a simples cravação do grampo, sem injeção em furo pré-executado.

O descarregamento lateral gerado pela escavação mobiliza a resistência no contato solo-grampo. Como as inclusões trabalham basicamente à tração, quanto maior for o atrito entre os dois materiais, melhor será o desempenho do reforço.

Existem diversas alternativas de conexão da extremidade superior do grampo à parede de concreto projetado. A Figura 1 mostra diferentes alternativas de execução do grampo. Dependendo da opção escolhida, esta conexão pode ser considerada rígida o suficiente para garantir a compatibilidade dos deslocamentos ou livre, possibilitando deslocamento relativo muro-grampo (Springer et al., 2001a).

Projetos de obras em solo grampeado requerem a definição dos seguintes parâmetros relativos ao grampo: comprimento (L), ângulo de instalação (α) e espaçamentos vertical (S_v) e horizontal (S_h). A prática de dimensionamento baseia-se em metodologias de equilíbrio limite, em que fatores de segurança são obtidos em superfícies de ruptura pré-estabelecidas. O dimensionamento da estrutura reforçada depende, portanto, da magnitude dos parâmetros de resistência do solo e da resistência ao atrito lateral no contato solo/grampo (q_s), além de variáveis ambientais que eventualmente venham a alterar as características mecânicas do grampo.

Não há, entretanto, uma metodologia globalmente aceita por projetistas. Diferentes enfoques conceituais quanto ao mecanismo de ruptura do conjunto solo-grampo, assim como quanto à forma da superfície potencial de ruptura e natureza das forças atuantes, têm sido apresentados em vários trabalhos publicados na literatura (Stocker et al., 1979; Shen et al., 1981; Schlosser, 1983; Juran et al., 1988; Bridle, 1989; Anthoine, 1990).

Figura 1. Cabeças dos grampos (GeoRio, 1999).

De forma geral, para paramentos verticais, o comprimento médio dos grampos instalados em pré-furo tem variado entre $0,8H$ a $1,2H$ (H =altura total da escavação), com densidade aproximada de um grampo por $2,5$ a $6m^2$ de face ($S_v \times S_h$ variando de $1,5 \times 1,5m$ a $2,5 \times 2,5m$) e com inclinações com a horizontal (α) variando de 5° a 20° .

Por não prever deformações no interior da massa reforçada, análises por equilíbrio limite não incorporam a redistribuição de esforços nos grampos ao longo das etapas de construção e, portanto, fornecem um fator de segurança global que não reproduz corretamente o comportamento da estrutura.

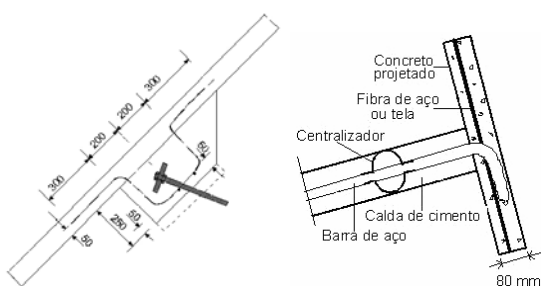
Resultados experimentais e programas de instrumentação em estruturas de solo grampeado ajudaram a definir a ordem da magnitude das deformações (Clouterre, 1991). Segundo observações de campo, no estágio final de construção, os deslocamentos horizontais no topo da escavação variam entre $0,10\%H$ e $0,30\%H$, sendo reduzidos à medida que se distanciam da face. Variações de $0,07\%H$ a $3,0\%H$ foram observadas em obras nos Estados Unidos e entre $0,25\%H$ a $0,30\%H$ na Alemanha (Schlosser et al., 1992).

A previsão das deformações em maciços grampeados torna-se possível a partir da utilização de ferramentas numéricas, capazes de simular seqüências construtivas e incorporar modelos constitutivos, que reproduzam o comportamento dos materiais envolvidos neste tipo de obra (Lima, 2002).

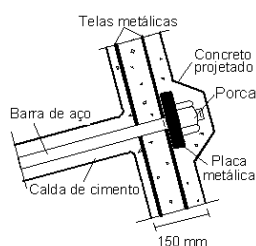
Vários autores têm empregado técnicas numéricas para realização de estudos paramétricos de obras de solo grampeado (Ehrlich et al., 1996; Cardoso e Gonçalves, 1997; Borja et al., 1999; Springer et al., 2001a, 2001b; Gerscovich et al., 2002; Lima et al., 2002a, 2003a, 2003b; 2004).

Estudos comparativos entre resultados de modelagem numérica e instrumentação de campo também têm sido realizados. Em alguns casos observou-se razoável concordância entre os valores medidos no campo e os previstos numericamente (Cardoso e Carreto, 1989; Lorig, 1991; Unterreiner et al., 1995). Por outro lado, outros autores demonstraram a grande influência do tipo de tratamento numérico utilizado para representar não só os elementos presentes no modelo (Caliendo et al., 1995), mas também a influência das condições de contorno (geometria da malha) em análises tensão-deformação de estruturas grampeadas (Briaud e Lim, 1997).

Este trabalho teve como objetivo comparar a previsão do comportamento tensão-deformação de taludes em solo grampeado, a partir do uso do programa computacional FLAC (baseado no método das diferenças finitas) e do programa computacional



(a) embutida ou dobrada



(b) com placa e porca.

PLAXIS (baseado no método dos elementos finitos).

O estudo abordou a modelagem numérica de uma escavação, em diferentes estágios, com face vertical e superfície do terreno horizontal, estabilizada com grampos injetados. Uma comparação entre os deslocamentos horizontais a 1,0m da face de escavação e os esforços axiais desenvolvidos ao longo dos grampos, na última etapa de escavação, foi realizada para os diferentes programas computacionais utilizados.

2. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

2.1 PLAXIS

O programa de elementos finitos, PLAXIS, foi desenvolvido para análises de problemas bi-dimensionais, (Brinkgreve e Vermeer, 1998).

O programa dispõe de pré e pós-processadores. Em análises bi-dimensionais, podem ser adotados elementos triangulares de 6 ou 15 nós. Na versão utilizada no presente trabalho (versão 7), não há limitação quanto ao número de elementos. No entanto, ressalta-se que elementos de 15 nós exigem esforço computacional relativamente alto.

O PLAXIS possui cinco modelos constitutivos para representação de relações tensão-deformação lineares ou não-lineares.

O programa não possui elemento específico para representar o grampo. No entanto, alguns elementos geométricos podem ser utilizados; como por exemplo, elementos de barra ou geotêxteis.

Os elementos de barra permitem a modelagem de estruturas esbeltas, que apresentam rigidez à flexão e axial, e são representados por 4 parâmetros: módulo de rigidez à flexão (EI), módulo de rigidez axial (EA), coeficiente de Poisson (ν) e o peso relativo (w).

No meio contínuo, o elemento de barra se superpõe ao solo; como consequência, o cálculo de w é feito através da equação:

$$w = (\gamma_c - \gamma_s) \times e \quad (1)$$

onde γ_c e γ_s são, respectivamente, o peso específico do concreto e do solo, e e é a espessura da barra.

Os geotêxteis são elementos esbeltos, que não apresentam rigidez à flexão. Estes elementos são capazes de suportar altos esforços de tração, mas não possuem resistência à compressão. No PLAXIS, os geotêxteis são representados apenas pela rigidez axial (EA).

No caso de interfaces solo-elemento, o programa disponibiliza um elemento específico (Elemento de Interface), regido pelo modelo elasto-plástico. Os níveis de tensão correspondentes aos comportamentos elástico e plástico são definidos a

partir do critério de resistência de Mohr-Coulomb. As propriedades dos elementos de interface são estimadas a partir dos parâmetros de resistência do solo (c_{solo} e ϕ_{solo}), através das equações:

$$c_{inter} = R \times c_{solo} \quad (2)$$

$$\tan \phi_{inter} = R \times \tan \phi_{solo} \leq \tan \phi_{solo} \quad (3)$$

onde, R representa o fator de redução de resistência nas interfaces. More (2003) sugere valores de R entre 0,5 e 1,0, dependendo do tipo de solo e do tipo de material do elemento em contato.

Para evitar descontinuidades na distribuição de tensões e deformações, o programa sugere a adoção de elementos de interface em regiões de mudança abrupta de condições de contorno.

Cabe ressaltar que, para representar trechos ancorados de tirantes, o programa PLAXIS recomenda a utilização de elementos tipo geotêxtil, acrescidos de interface. Esta sugestão pode ser estendida aos grampos, face à semelhança entre o comportamento desses elementos.

2.2 FLAC

FLAC (“Fast Lagrangian Analysis of Continua”) é um programa computacional bidimensional de diferenças finitas que simula o comportamento de estruturas constituídas de solo, rocha ou outros materiais que possam ser submetidos ao escoamento plástico quando seus limites de resistência são atingidos.

Os materiais são representados por elementos que se comportam de forma linear ou não linear segundo a lei tensão-deformação imposta, em resposta às forças aplicadas. O programa possui nove modelos constitutivos para reproduzir o comportamento tensão-deformação e resistência dos materiais prescritos.

O FLAC utiliza palavras-comando que permitem ao usuário a rápida identificação de suas aplicações. Deste modo, as seqüências construtivas podem ser facilmente simuladas através de uma série de comandos de entrada. Cada etapa executiva pode ser armazenada em arquivo independente, facilitando a análise final dos resultados (Itasca, 1996).

O FLAC utiliza, para a simulação dos grampos, elementos unidimensionais que trabalham por tração, não apresentando resistência à flexão. A resistência no contato solo-grampo é representada pela relação entre a força axial, normalizada em função do comprimento do grampo, (F_s^{\max} / L), a qual pode ser descrita pela equação (4).

$$\frac{F_s^{\max}}{L} = s_{bond} + p' \times \text{perímetro} \times \tan (S_{friction}) \quad (4)$$

onde, S_{bond} representa um intercepto de “coesão” no contato solo-grampo; p' a tensão normal efetiva média; $S_{friction}$ o parâmetro de atrito no contato solo-grampo.

O comportamento cisalhante da injeção em função dos deslocamentos relativos entre o solo e o grampo é representado pelo parâmetro de rigidez k_{bond} (Lima et al., 2005).

A introdução dos elementos de reforço na malha pode ser feita de duas maneiras. Os grampos podem ser ancorados em uma região específica na malha (Grampo Fixo) e ter o deslocamento de uma de suas extremidades compatibilizado com o deslocamento da malha. Neste caso, a deformabilidade do modelo é governada pela malha e não há transferência de esforços para o elemento estrutural. Os pontos de máxima força axial em cada grampo ocorrem próximo à face de escavação (Cardoso e Gonçalves, 1997; Jewell, 1990).

Alternativamente, os grampos podem funcionar independentemente da malha; os esforços são desenvolvidos ao longo do seu comprimento à medida que a malha se deforma (Grampo Livre) e os pontos de máxima força axial ocorrem afastados da face (Juran e Elias, 1990; Plumelle e Schlosser, 1990).

3. CASO ESTUDADO

3.1 Geometria

A análise numérica considerou uma escavação vertical de 3,0m de largura e 10,5m de profundidade, sem a consideração de nível d'água.

O processo construtivo foi simulado através de 7 etapas, considerando-se, em cada uma delas, escavação de 1,5m de altura, e posterior introdução da barra e injeção do grampo, e concretagem da face escavada.

Os grampos consistiram em barras de aço de 25mm de diâmetro e 6,0m de comprimento, introduzidos em pré-furos de 75mm de diâmetro. Com exceção da primeira linha de grampo, situada a 1,0m do topo de escavação, o espaçamento vertical e horizontal foi mantido constante e igual a 1,5m. Os grampos foram introduzidos com uma inclinação de 10° com a superfície horizontal. Em cada etapa da escavação do talude, os grampos foram introduzidos simultaneamente com a consideração de uma parede de concreto com espessura de 100mm.

As malhas adotadas com os programas FLAC e PLAXIS foram constituídas, respectivamente, de 138 divisões horizontais e 84 verticais, e 8877 elementos triangulares de 6 nós (Lima et al., 2005).

3.2 Parâmetros Adotados

O solo foi representado pelo modelo Elasto-Plástico, delimitado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, o qual requer o conhecimento de 5 parâmetros: módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e ângulo de dilatância (ψ) do solo. Os valores adotados foram selecionados a partir de casos de obra observados na literatura (Lima, 2002) e encontram-se listados na Tabela 1.

Os parâmetros mecânicos dos elementos de barra utilizados no programa FLAC estão descritos na Tabela 2.

Tabela 1. Parâmetros do solo

| Parâmetro | Valor |
|--|-----------------------|
| Módulo de Young (E) | 45MPa |
| Coeficiente de Poisson (ν) | 0,25 |
| Peso específico natural (γ) | 18,5kN/m ³ |
| Coesão efetiva (c') | 10kPa |
| Ângulo de atrito (ϕ') | 32° |
| Ângulo de dilatância (ψ) | 7,5° |
| Coeficiente de empuxo no repouso (k_0) | 0,5 |

Tabela 2 . Parâmetros mecânicos - FLAC

| Material | Parâmetro | Valor |
|----------|----------------|--------|
| Grampo | $\sigma_{aço}$ | 500MPa |
| | $E_{aço}$ | 205GPa |
| | $G_{injeção}$ | 9GPa |
| | q_s | 150kPa |
| Parede | E_{parede} | 24GPa |

Nota: $\sigma_{aço}$ = tensão de escoamento do aço, E = módulo de Young, G = Módulo cisalhante, q_s = resistência ao arrancamento do grampo.

O programa PLAXIS não dispõe de elemento específico para simulação do grampo. As alternativas de uso do elemento de barra ou geotêxtil requerem a definição do módulo de elasticidade. No presente trabalho, o módulo de elasticidade foi calculado em função da média ponderada das áreas relativas ao aço e à injeção, conforme mostra equação (5).

$$\bar{E} = \frac{(E_{injeção} \times A_{injeção}) + (E_{aço} \times A_{aço})}{A} \quad (5)$$

onde, $E_{injeção}$ e $E_{aço}$ são, respectivamente, o módulo de elasticidade da injeção e do aço, $A_{injeção}$ é a área da seção correspondente ao trecho injetado, $A_{aço}$ é a área da seção da barra de aço e A é a área total. Os parâmetros mecânicos utilizados pelo programa PLAXIS estão listados na Tabela 3.

Nos dois programas, a característica tridimensional do solo grampeado é transformada em condição bidimensional, através da divisão de alguns parâmetros do grampo (módulo de elasticidade, carga de escoamento, rigidez no

contato, etc) pelo espaçamento horizontal entre grampos.

| Material | Parâmetro | Valor |
|----------|-----------|--|
| Grampo | EA | 185MN |
| | EI | 130kN.m ² |
| | w | 0,74kN/m |
| Parede | EA | $1,6 \times 10^9$ KN/m |
| | EI | $1,3 \times 10^6$ KN.m ² /m |
| | w | 0,65kN/m |
| | v | 0,2 |

Nota: EA = módulo de rigidez axial, EI = módulo de rigidez a flexão, w = peso relativo. v =coeficiente de Poisson.

4. RESULTADOS

Diferentes alternativas de modelagem foram testadas no presente trabalho, sendo os resultados focados na comparação entre os deslocamentos horizontais previstos, a cerca de 1,0m de distância da parede, e as distribuições de esforços axiais nos grampos.

4.1 Influência do tipo de fixação do grampo à parede

A Figura 2 apresenta as distribuições de deslocamentos horizontais, ao final da escavação, previstas pelos programas FLAC e PLAXIS, para diferentes condições de conexão entre o grampo e a parede (Grampo fixo e Grampo livre). Os deslocamentos horizontais, quando o grampo tem ambas as extremidades livres, são significativamente maiores, como resultado da condição de punçãoamento do grampo (Springer et al., 2001a; Lima et al., 2003).

Para superar a limitação do programa PLAXIS, que fixa o mesmo deslocamento para o grampo e a parede, foi realizada uma análise em que foi introduzido um elemento de mola entre a parede e o grampo, na tentativa de permitir a ocorrência de deslocamentos relativos. Os resultados, também apresentados na Figura 2, mostram concordância com relação à simulação do FLAC com grampo fixo. A introdução do elemento de mola mostrou-se eficaz, considerando-se valores de rigidez da mola cerca de 500 vezes menores que a rigidez do grampo.

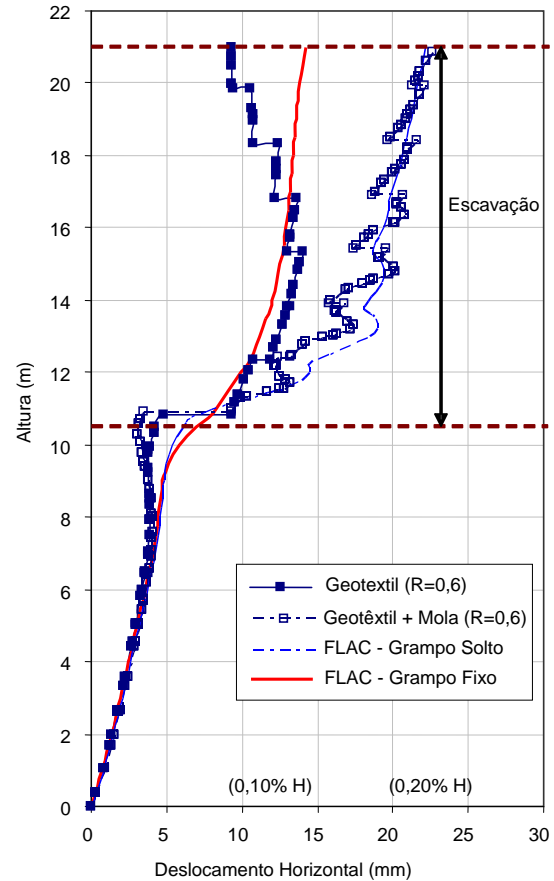


Figura 2. Distribuição dos deslocamentos horizontais (PLAXIS x FLAC).

As distribuições dos esforços axiais nos grampos estão apresentadas na Figura 3 e na Figura 4. O programa PLAXIS fornece as cargas nos grampos em kN/m, entretanto, como os parâmetros de deformabilidade das inclusões estão divididos pelo espaçamento horizontal, o resultado do programa já incorpora a condição tridimensional dos grampos. Como resultado, o valor da carga foi interpretado como sendo dado em kN.

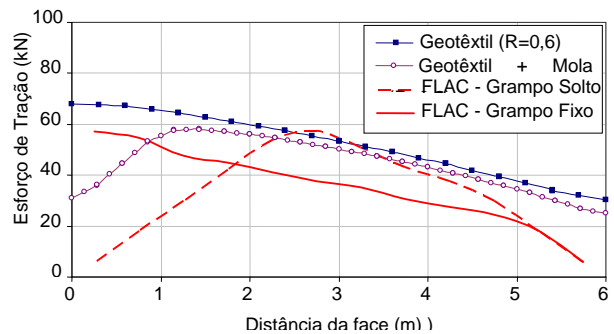


Figura 3. Distribuição de esforços axiais ao longo do grampo 5 (PLAXIS x FLAC).

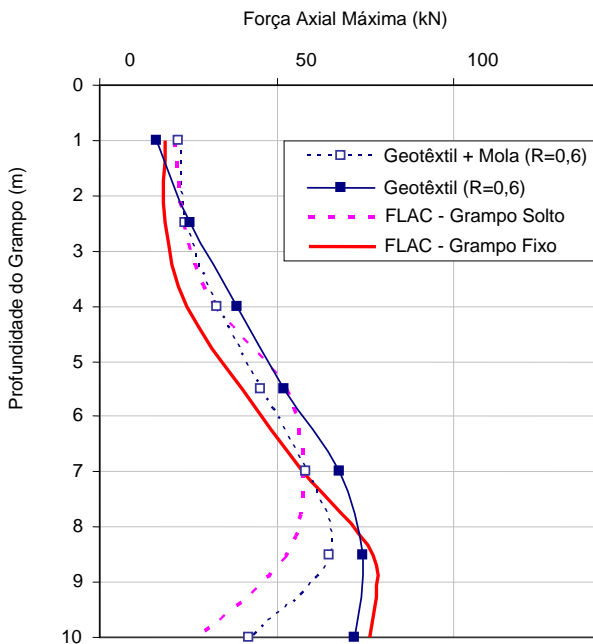


Figura 4. Distribuição de força máxima de tração nos grampos (PLAXIS x FLAC).

Os resultados mostram que o tipo de fixação dos grampos interfere não só na forma da distribuição dos esforços, mas também na intensidade de mobilização do grampo. Quando o deslocamento do grampo é mantido igual ao deslocamento da face da escavação, os grampos inferiores são os mais solicitados. Paralelamente, a hipótese de mecanismo de ruptura envolvendo duas regiões, ativa e passiva (Clouterre, 1991), só ocorre em estruturas grampeadas quando o método executivo permite o deslocamento relativo entre o grampo e a face do talude (Springer et al., 2001).

4.2 Influência do tipo de elemento para simulação do grampo

A Figura 5 apresenta além das distribuições de deslocamento horizontal, ao final da escavação, previstas pelo FLAC, as previstas pelo programa PLAXIS, considerando-se 3 alternativas de simulação de grampo: elemento de barra com interface, geotêxtil com interface e geotêxtil sem interface. Nas interfaces adotou-se um fator de redução de 0,6. O manual do PLAXIS sugere valores da ordem de 0,3 para interfaces areia-aço a 0,7 para interfaces areia-concreto.

Os resultados indicam que a presença da interface introduz descontinuidades nos deslocamentos, coincidentes com a posição dos grampos. Essas descontinuidades foram observadas, independente da escolha do tipo de elemento (6 nós ou 15 nós). Por outro lado, a interface torna a região reforçada menos rígida, conseqüentemente, os deslocamentos

máximos ocorrem aproximadamente a meia altura da escavação.

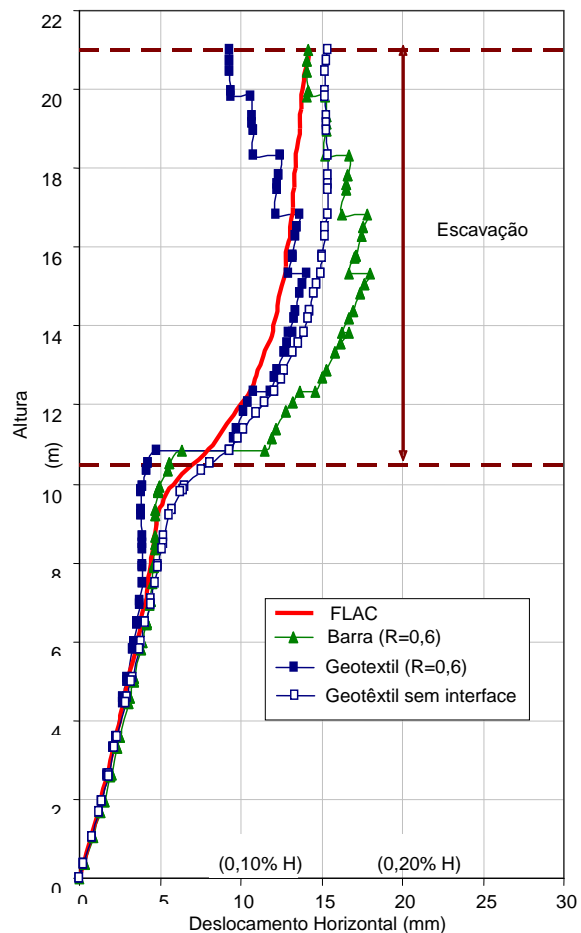


Figura 5. Influência do tipo de elemento na distribuição de deslocamento horizontal.

Comparando-se os resultados obtidos com o elemento de barra e o geotêxtil, verifica-se que a parcela da rigidez à flexão, existente apenas no elemento de barra, não promove influência significativa no que diz respeito ao escoamento do solo. Como as deformações ao longo da face da escavação se mantêm pequenas, sob o estado de utilização da estrutura ($\delta < 0,2\%H$), a resistência à flexão dos grampos é pouco mobilizada. Somente numa situação próxima à ruptura, momentos fletores irão aparecer ao longo de uma possível região de plastificação e não devem ser desprezados (Schlosser e Unterreiner, 1990). Adicionalmente, nota-se que, com a consideração da rigidez à flexão (elemento de barra), há um pequeno acréscimo das tensões máximas em cada grampo (Figura 6). Comportamento similar foi reportado por Lima (1996), em modelagens numéricas de escavações grampeadas.

A distribuição dos deslocamentos horizontais, estimada pelo FLAC, mostrou-se semelhante à encontrada com o PLAXIS, sem a consideração da interface. Ressalta-se que, independente do tipo de simulação, os valores máximos de deslocamento

foram inferiores a 0,2%H. Este limite é sugerido para o caso de solos arenosos (Clouterre, 1991).

As distribuições dos esforços máximos nos grampos, ao final da escavação, estão apresentadas na Figura 6. Em todos os casos, os valores máximos de força ocorrem no terço inferior da escavação. Adicionalmente, os maiores esforços estão diretamente relacionados aos casos que geraram maiores deslocamentos.

Considerando um fator de majoração de 1,4 para carga de trabalho e limitando as cargas à condição de 90% da carga de escoamento, o limite máximo de carga admissível para o aço é $F_{adm} = 158kN$. Assim sendo, em todos os casos analisados a carga máxima prevista se encontra abaixo desse limite.

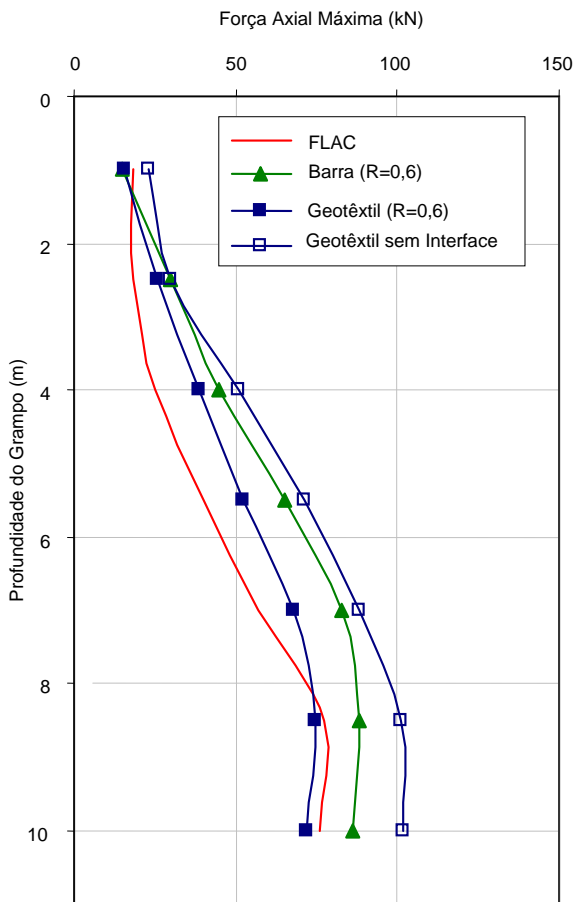


Figura 6. Influência do tipo de elemento na distribuição de Força máxima nos grampos.

4.3 Influência do tipo de elemento para simulação da interface

A Figura 7 e a Figura 8 apresentam, respectivamente, a distribuição de deslocamento horizontal e força máxima nos grampos, ao final da escavação, previstas pelo FLAC e pelo programa PLAXIS, para diferentes condições de interface.

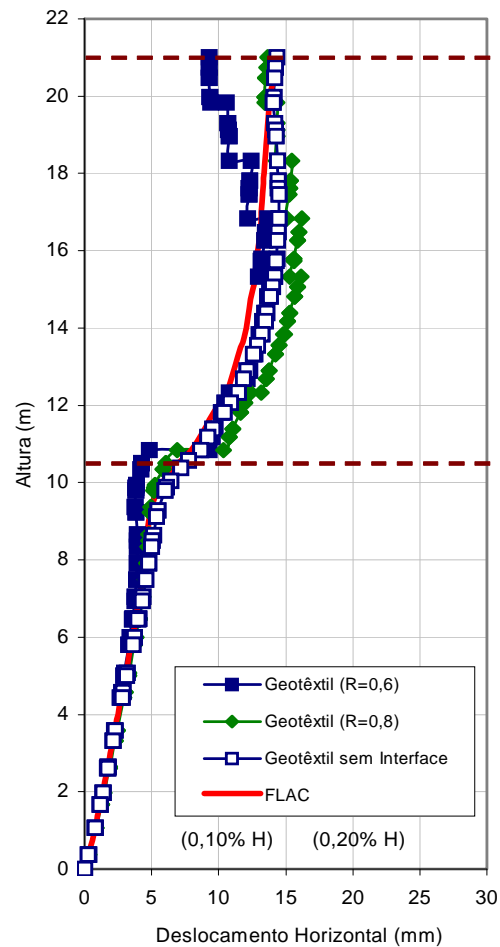


Figura 7. Influência da Interface na distribuição de deslocamento horizontal (PLAXIS).

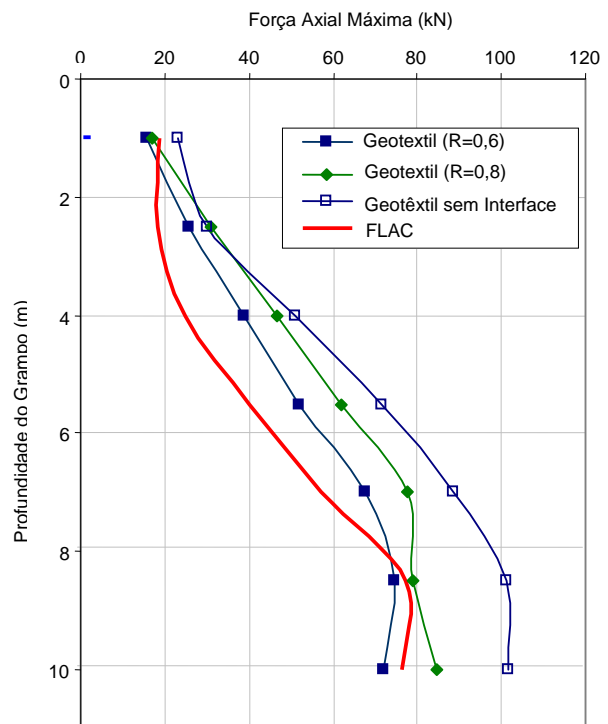


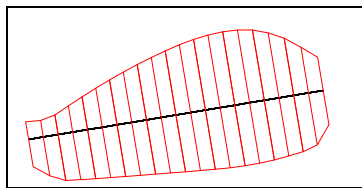
Figura 8. Influência da Interface na distribuição de força máxima nos grampos.

Os menores deslocamentos e valores de força máxima na ruptura foram observados na simulação realizada com o menor valor de fator de redução ($R=0,6$). A redução da resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo, desfavorece as condições para transferência de esforços entre o solo e o grampo. A comparação entre diagramas de tensão cisalhante para as 3 condições estudadas, mostrada na Figura 9 ilustra esta resposta do modelo, visto que maiores valores de tensão cisalhante foram verificados na ausência da interface.

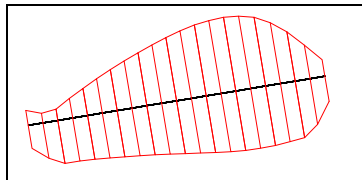
Por outro lado, menores valores de resistência na interface acarretam numa ampliação da região de plastificação, conforme se observa na Figura 10.

A inexistência da interface não alterou o padrão de deslocamentos. Entretanto, as cargas foram cerca de 1,5 vezes maiores do que as registradas nas demais análises.

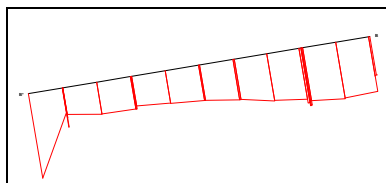
Por outro lado, a diferença entre resultados é muito pequena, sugerindo que, para fins práticos, a influência da interface possa ser considerada desprezível.



(a) Geotêxtil ($R=0,6$) - $\tau_{\text{máx}} = 8,5$ kPa

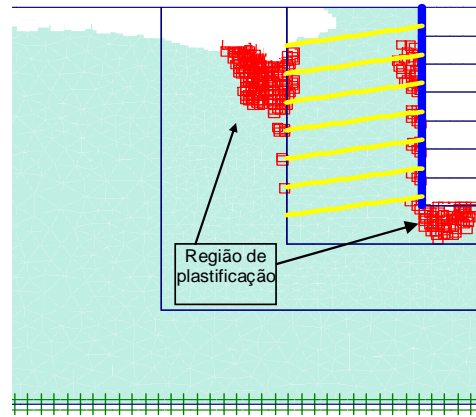


(b) Geotêxtil ($R=0,8$) - $\tau_{\text{máx}} = 10,2$ kPa

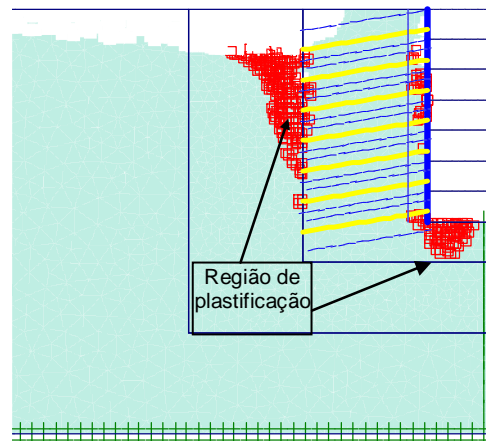


(c) Geotêxtil sem interface - $\tau_{\text{máx}} = 17,9$ kPa

Figura 9. Diagrama de tensão cisalhante - grampo mais superficial.



(a) Sem interface



(b) Geotêxtil ($R=0,6$)

Figura 10. Região de Plastificação.

5. CONCLUSÕES

Do ponto de vista prático, a comparação entre simulações numéricas de uma escavação vertical utilizando os programas de diferenças finitas FLAC e de elementos finitos PLAXIS indicaram os seguintes pontos:

- influência significativa do tipo de conexão do grampo junto à parede;
- no caso do PLAXIS, possibilidade de simulação do grampo solto através do elemento de mola;
- pouca influência da introdução do elemento de interface;
- pouca influência da rigidez à flexão (barra x geotêxtil) para níveis de deformação inferiores à condição de ruptura.

O programa PLAXIS não incorpora um elemento que simule especificamente a inclusão de grampos na massa de solo. Por outro lado, o programa é de fácil utilização. Apesar da aparente limitação do PLAXIS, comparada a complexidade de uso do programa FLAC, a comparação entre os resultados indicou uma concordância razoável entre os 2 programas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FAPERJ (Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) pelo auxílio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Anthoine, A. (1990). “Une méthode pour le dimensionnement à la rupture des ouvrages en sols renforcés”, *Revue Française de Géotechnique*, (50): 5-17.
- Borja, R. I.; Lai, T. Y; Regueiro, R. A. e Sama, K. (1999). “Modeling Strain Localization in Soil - Nailed Excavations”, *Proc. XI Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Briaud, J. L. e Lim, Y. (1997). “Soil-nailed wall under piled bridge abutment: simulation and guidelines”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 123, no 11, pp. 1043-1050.
- Bridle, R. J. (1989). “Soil nailing – analysis and design”, *Ground Engineering*, September, pp. 52-56.
- Brinkgreve, R. B. J. e Vermeer, P. A. (1998). “Plaxis, Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”. A.A. Balkema, P.O. Rotterdam, Netherlands.
- Cardoso, A. S. e Gonçalves, M. (1997). “Behavior of excavations supported by nailing”, *Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering*, Balkema, Rotterdam, pp. 281-291.
- Clouterre (1991). “Soil Nailing Recommendations Project National Clouterre”, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Presses de l'ENPC. Paris, France, 301p.
- Caliendo, J. A.; Womack, K. C.; Anderson, L. R. e Nham, H. S. (1995). “Finite Element Analysis of a Soil Nailed Wall”, *Proc. X Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, Guadalajara, México.
- Ehrlich, M.; Almeida, M. S. S. e Lima, A. M. (1996). “Parametric numerical analyses of soil nailing systems”, *Earth Reinforcement*, Balkema, Rotterdam.
- GeoRio (1999). “Manual Técnico de Encostas: Vol. IV - Ancoragens e Grampos”, Fundação GeoRio; Editores: J.A.R. Ortigão e A.S.F.J Sayão, 184p.
- Gerscovich, D. M. S.; Sayão, A. S. F. J. Springer, F. O. e Lima, A. P. (2002). “Deformabilidade de Escavações com Solo Pregado”, VIII Congresso Nacional de Geotecnia: A Geotecnia Portuguesa e os Desafios do Futuro. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, v. 3, p. 1579-1588.
- Itasca (1996). “FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua”, Version 3.3, User's Manual, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.
- Jewell, R. A. (1990). “Review of theoretical models for soil nailing”, *Proceedings of the International Reinforced Soil Conference*, British Geotechnical Society, edited by A. McGown, K. C. Yeo and K. Z. Andrawes, London.
- Juran, I.; Baudrand, G.; Farag, K. e Elias, V. (1988). “Kinematical limit analysis approach for the design of nailed soil retaining structures”, *International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement*. Fukuoka Japan, pp. 301-306.
- Juran, I. e Elias, V. (1990). “Behavior and working stress design of soil nailed retaining structures”, *Proceedings of the International Reinforced Soil Conference*, British Geotechnical Society, edited by A. McGown, K. C. Yeo and K. Z. Andrawes, London.
- Lima, A. M. L. (1996). “Análise numérica do comportamento de solos grampeados”, *Dissertação de Mestrado*, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 85p.
- Lima, A. P. (2002). “Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado”, *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 176p.
- Lima, A. P.; Gerscovich, D. M. S. e Sayão, A. S. F. J. (2002a). “Modelagem Numérica de Escavações Grampeadas”. I Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia (I CLBG), São Paulo. v. 1, pg. 447-457.
- Lima, A. P.; Gerscovich D. M. S.; Sayão, A. S. F. J. (2003a). “Deformability Analysis of Nailed Soil Slopes”, *12th Panamerican Conference for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, ISSMGE, Boston, USA, Session 4.4, pp. 2127-2132.
- Lima, A. P.; Sayão, A. S. F. J. Gerscovich, D. M. S. (2003b). “Considerations on the Numerical Modeling of Nailed Soil Excavations”. *4th International Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering*, Ouro Preto. v. 1, p. 143-152.
- Lima, A. P.; Gerscovich, D. M. S.; Sayão, A. S. F. J. (2004). “Considerations on the soil nailing technique for stabilizing excavated slopes”. *International Symposium on Landslides - Landslides: Evaluation and Stabilization*, Rio de Janeiro. Netherlands: A.A. Balkema, v. 2, pg. 1671-1676.
- Lima, A. P.; Gerscovich, D. M. S.; Sieira, A. C. C. F. Sayao, A. S. F. J. (2005). Avaliação de programas computacionais para a simulação de escavação de taludes em solo grampeado. 5o Simpósio Brasileiro de Aplicação de Informática

- em Geotecnia (INFOGEO). ABMS. Belo Horizonte, Maio. 6p. Artigo submetido.
- Lorig, L. J. (1991). "Analysis of novel retaining structures using explicit finite difference codes", *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 157-164.
- More, J. Z. P. (2003). "Análise Numérica do Comportamento de Cortinas Atirantadas em Solos", *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 136p.
- Plumelle, C. e Schlosser, F. (1990). "A French national research project on soil nailing: CLOUTERRE", *Proc. International Reinforced Soil Conference*, Glasgow.
- Schlosser, F. (1983). "Analogies et differences dans le comportement et le calcul des ouvrages de soutènement en terre armée et par clouage du sol", *Annales de L'Institut Technique de Batiment et des Travaux, Publiques*, no. 418, 473 pp., *Sols et Fondations* 184, 8-23.
- Schlosser, F. e Unterreiner, P. (1990). "Soil nailing in France – Research and Practice", *Proceeding of first international seminar on soil mechanics and foundation engineering of Iran*, Iranian Geotechnical Society, v. 2, pp. 436-468, Iran.
- Shen, C. K.; Bang, S.; Romstad, K. M.; Kulchin, L. e DeNatale J. S. (1981). "Field Measurements of Earth Support System", *ASCE*, Vol. 107, GT 12, pg. 1625-1642.
- Springer F. O.; Gerscovich, D.M.S. e Sayão, A. S. F. J. (2001a). "Deformabilidade de taludes com solo grampeado", *III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE)*, ABMS, Rio de Janeiro, pp. 483-490.
- Springer F.O.; Gerscovich, D.M.S.; Sayão, A.S.F.J. Lima, A. P. e Ortigão, A (2001b). "Uso do Programa FLAC para modelagem Numérica de Escavações Grampeadas", *IV Encontro sobre Modelagem Computacional*. Instituto Politécnico do Rio de Janeiro – UERJ, Friburgo, pg.240-250.
- Stocker, M. F.; Korber, G. W.; Gassler, G. e Gudehus, G. (1979). "Soil Nailing: Cloutage du Sol", *Proc. Int. Conf. on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques*, Ecole des Ponts et Chaussées, Paris, France, Vol. 2, pp. 469-474.
- Unterreiner, P.; Schlosser F. e Benhamida, B. (1995). "Calculation of the displacements of a full scale experimental soil nailed wall – French National Research Project Clouterre", *The Practice of Soil Reinforcing in Europe: a symposium held under the auspices of the IGS at the Institution of Civil Engineers*, 18th. May, 1995.