CONSIDERAÇÃO DE DETALHES EXECUTIVOS NO PROJETO DE TALUDES COM SOLO GRAMPEADO

Considerations on execution details in soil nailing slope design

Denise Maria Soares Gerscovich* Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão** André Pereira Lima*** Cauê Antonio Barreto Rosa****

RESUMO – A técnica de estabilização com solo grampeado, ou pregado, consiste na instalação de elementos de reforço semirrígidos na massa de solo. O processo construtivo é realizado em etapas sucessivas de escavação, abertura de um furo para execução do grampo normal à face com a instalação da barra de aço, envolvida com calda de cimento, por gravidade ou por injeção em uma ou mais vezes. Ao final a face da escavação é protegida com tela metálica e revestida com concreto projetado. Os grampos são mobilizados em decorrência do desconfinamento induzido pela escavação progressiva do solo. Junto à parede, o grampo poderá ter deslocamento restringido ou livre, dependendo do tipo de acabamento. O projeto baseia-se, em geral, em análises de equilíbrio limite, sendo necessário o conhecimento da resistência ao cisalhamento (q_s) mobilizada no contato solo-grampo. O valor de q_s adotado no projeto deve ser confirmado em ensaios de arrancamento durante a obra. Há sugestões, na literatura, de correlações empíricas para estimar q_s em função do índice de resistência à penetração (N_{SPT}). Este trabalho tem como objetivo ressaltar influência dos aspetos construtivos na estimativa de parâmetros de projeto e no comportamento da obra, em termos de deslocamento e tensões transmitidas aos grampos. É apresentada uma nova proposta de correlação entre os valores de q_s e N_{SPT} , para solos típicos brasileiros. Adicionalmente, recomenda-se cautela ao se fazer uma previsão numérica do comportamento tensão-deformação de taludes grampeados, de modo a incorporar os aspetos executivos.

ABSTRACT – The soil nailing technique consists on the installation of semi-rigid reinforcing elements in the soil mass. Construction is carried out in successive excavation stages, drilling a hole normal to the face, for positioning the reinforcing steel bar surrounded by cement grout, inserted by gravity or multiple pressure injections. After that, the excavation face is protected with wire mesh and shotcreted. The soil-nail shear interaction is mobilized by the lateral decompression caused by successive soil excavation stages. At the excavation face the nail may be free to move or fixed to the concrete layer, depending on its ending details. The design is based on the limit equilibrium approach, and requires estimation of the unit strength at soil-nail interface (q_s) . This value shall be preferably obtained by in situ pullout tests. However, the literature offers several empirical correlations for estimating q_s from standard penetration test values (N_{SPT}). This paper highlights the influence of construction aspects in estimating soil nailing design parameters and in predicting the reinforced slope behavior in terms of displacement and stresses. As a result, a new q_s *vs.* N_{SPT} correlation

^{*} Professora Associada, Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. E-mail: deniseg@uerj.br

^{**} Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio. E-mail: sayao@puc-rio.br

^{***} Professor Titular, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Veiga de Alemida. E-mail: andre.pereira@uva.br

^{****} Auxiliar de Pesquisa em Engenharia Civil, Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. E-mail: caueanrosa@yahoo.com

is suggested for Brazilian soils. Additionally, caution is recommended for the prediction of the stress-strain behavior of soil nailed slopes, if the numerical tool does not adequately address execution details.

PALAVRAS CHAVE – Solo pregado, solo grampeado, tipos de grampos, ensaio de arrancamento, N_{SPT} .

1 – INTRODUÇÃO

A técnica de grampeamento (ou pregagem) tem se mostrado prática e eficiente para a estabilização (provisória ou permanente) de taludes e escavações em solos. Os projetos são em geral elaborados utilizando métodos de equilíbrio limite, onde as tensões cisalhantes no maciço são confrontadas com a resistência ao cisalhamento mobilizada, obtendo-se o valor do fator de segurança (FS) na superfície potencial de ruptura. O resultado considera que as deformações no maciço são desprezíveis, ou ficam restritas a níveis aceitáveis para o projeto. O cálculo dessas deformações requer o uso de ferramentas numéricas capazes de reproduzir as etapas construtivas.

Independente da metodologia adotada, é necessário conhecer a resistência unitária no contato solo-grampo (q_s). Na fase inicial de projeto, a prática brasileira tem sido estimar o valor de q_s com base em correlações com a resistência à penetração (N_{SPT}), obtida em sondagens à percussão. Na fase de projeto executivo, ensaios de arrancamento no campo devem ser executados para confirmar os valores especificados no projeto básico. Na ausência de norma específica, recomenda-se a realização de ensaios de arrancamento em um número equivalente a 1% do total de grampos, ou, pelo menos, dois ensaios para cada linha de grampos (Ortigão e Sayão, 2004).

Este trabalho tem como objetivos sugerir alternativas para a consideração de aspectos executivos em projetos de contenção com solo grampeado. Em particular, são abordados aspectos relacionados ao tipo de fixação da extremidade do grampo na face da escavação e às correlações empíricas para estimativa da resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo (q_s).

2 - CONTENÇÃO EM SOLO GRAMPEADO

O solo grampeado originou-se da técnica de execução de suporte de galerias e túneis, denominada NATM (*New Austrian Tunneling Method*). O método NATM consiste no uso de um sistema flexível de suporte, ao invés do revestimento rígido, usualmente adotado. O revestimento rígido impede os deslocamentos do maciço e mobiliza esforços muito elevados no maciço, gerando uma solução de maior custo.

A técnica NATM permite que o terreno se deforme, plastificando o maciço no entorno da escavação, a qual é reforçada com chumbadores (grampos) e estabilizada com um revestimento flexível de concreto projetado (com espessura usual entre 10 e 30cm).

O sucesso das aplicações da técnica NATM em rochas duras serviu como incentivo para experiências em maciços menos resistentes, como rochas brandas (arenitos), e solos (siltes, argilas e areia). Com isso, a técnica de solo pregado, ou solo grampeado, estabeleceu-se na prática geotécnica (Lima *et al.*, 2002).

Assim, a técnica de grampeamento (ou pregagem) consiste basicamente na inserção de elementos semirrígidos (barras ou tubos de aço) no maciço de solo. O grampo pode ser introduzido por cravação direta do elemento metálico no terreno a ser reforçado. A alternativa (grampo injetado) consiste na execução de um pré-furo, com pequena inclinação (com ou sem limpeza prévia), seguido pela instalação do elemento metálico, com o uso de anéis centralizadores. O furo é a seguir preenchido com calda de cimento, sob ação da gravidade, ou sob pressão em uma ou mais fases de injeção. A Fig. 1 mostra esquematicamente um corte do terreno reforçado com grampo injetado, muito utilizado em obras de reforço de escavações no Brasil e em Portugal, pois o

processo executivo e os equipamentos são idênticos aos utilizados para instalação de tirantes. Além disso, grampos injetados apresentam resistência no contato solo-grampo superior à obtida com grampos cravados (Guilloux *et al.*, 1982).



Fig. 1 – Esquema de grampo injetado (modificado de GeoRio, 2013).

O processo executivo envolve etapas sucessivas de escavação, execução dos grampos e proteção do talude, para evitar processos localizados de erosão superficial, causados principalmente pela ação da chuva e intempéries naturais. Em taludes escavados em solo, esta proteção é feita normalmente com um revestimento delgado de concreto projetado, armado com tela ou fibras de aço, sem função estrutural. A Fig. 2 ilustra o procedimento construtivo.



Fig. 2 - Processo executivo de contenção com solo grampeado (Sayão et al., 2005).

A altura máxima de escavação depende do tipo do solo e da inclinação da face. Esta face deverá manter-se estável durante o período crítico que ocorre entre as fases de escavação e de aplicação do revestimento. Geralmente, a altura de cada etapa de escavação varia entre 1,0m e 2,0m, e o revestimento de concreto projetado apresenta espessura na faixa entre 60 e 120mm.

À medida que evolui o processo de escavação do talude e instalação dos grampos, o maciço sofre descarregamento lateral e o elemento de reforço (grampo) passa a ser solicitado. O principal aspecto de interação solo-grampo é, portanto, a resistência mobilizada no contato entre os dois materiais. Como as inclusões são solicitadas basicamente à tração, o desempenho do reforço será tanto melhor quanto maior for a resistência ao cisalhamento entre o solo e o grampo. O valor de q_s depende não só das características do solo, mas também do processo executivo do grampo.

A experiência tem mostrado a necessidade de se proceder pelo menos um estágio de reinjeção. Souza *et al.* (2005) exumaram 12 grampos e verificaram que, quando executados com apenas injeção de preenchimento do furo (bainha, sem reinjeção), os grampos apresentavam vazios ao longo do comprimento.

Existem diversas alternativas para conexão da extremidade externa da barra metálica, que pode ser rosqueada, com placa metálica e porca, ser dobrada, ou simplesmente embutida na parede de concreto projetado, como mostra a Fig. 3. No primeiro caso, é possível aplicar uma pequena carga de incorporação, para garantir o contato com a parede de concreto projetado.

Dependendo da opção escolhida, a conexão pode ser considerada fixa, impondo a compatibilidade dos deslocamentos do grampo e da parede, ou livre, possibilitando o deslocamento relativo entre os dois elementos (Springer *et al.*, 2001).



Fig. 3 – Alternativas de conexão das cabeças dos grampos (adaptado de GeoRio, 2013).

A disposição dos grampos é feita, em geral, em linhas com inclinação entre 5° e 20° em relação à horizontal. Os espaçamentos horizontal e vertical, entre grampos, costumam variar entre 1,0m e 2,0m, podendo ser iguais ou não.

Na prática, o reforço de maciços com grampos tem projeto semelhante ao adotado para muros de gravidade. Como tal, devem-se definir os parâmetros geométricos dos grampos (espaçamentos vertical e horizontal, diâmetro, comprimento e inclinação) e proceder as avaliações das estabilidades externa (escorregamento ou tombamento) e interna. Com a abordagem por equilíbrio limite, obtem-se o valor do fator de segurança em uma superfície de rutura pré-estabelecida. Diversos métodos de análise estão disponíveis na literatura (Stocker *et al.*, 1979; Schlosser, 1983; Juran *et al.*, 1988; Bridle, 1989; Anthoine, 1990) As diferenças entre essas proposições retratam as incertezas que ainda existem sobre o mecanismo de ruptura do conjunto solo-grampo, a forma da superfície potencial de ruptura, e a natureza das forças atuantes.

De modo diferente ao preconizado na teoria clássica de empuxos de terra, os termos ativo e passivo referem-se à mobilização dos esforços no grampo. O limite entre as regiões ativa e passiva é definido pela posição, em cada grampo, do ponto de força axial máxima, como ilustra a Fig. 4.



Fig. 4 - Definição das zonas ativa e passiva em escavações grampeadas (Lima et al., 2002).

Na abordagem por equilíbrio limite, considera-se que, uma vez que a estrutura é estável, os deslocamentos são de pequena magnitude e não interferem na viabilidade do projeto. Por não considerar deformações no interior da massa reforçada, as análises por equilíbrio limite não incorporam a redistribuição de esforços nos grampos ao longo das diversas etapas de construção e, portanto, fornecem um fator de segurança global que não reproduz corretamente o comportamento da estrutura durante a execução.

Os valores máximos de deslocamentos vertical e horizontal ocorrem em geral no topo da escavação grampeada. Resultados de observações experimentais com instrumentação em escavações 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 0,1 a 0,5% H, sendo H a altura total do talude (Guilloux *et al.*, 1982; Cartier e Gigan, 1983; Gässler e Gudehus, 1981; Shen *et al.*, 1981; Plumelle, 1986; Mitchell e Villet, 1987; Juran e Elias, 1987).

Os deslocamentos no topo dependem de diversos fatores, como: altura da escavação; sequência construtiva; espaçamento, inclinação e comprimento dos grampos; razão entre comprimento dos grampos e altura do talude; e capacidade de suporte do solo de fundação.

Quando são previstos valores elevados para os deslocamentos laterais no topo do maciço grampeado, recomenda-se o uso de uma linha de tirantes no topo, formando uma estrutura mista (grampeada e ancorada). As barras de ancoragem devem ter comprimentos superiores aos dos grampos, pois os bulbos de ancoragem devem ser locados em posição distante do maciço grampeado.

A previsão das deformações em maciços grampeados torna-se possível com o uso de ferramentas numéricas, capazes de simular a sequência executiva, incorporando modelos constitutivos que reproduzam o comportamento dos materiais envolvidos na obra. Vários autores têm reportado estudos paramétricos de obras de solo grampeado com base em técnicas numéricas, e, com isso, contribuído para a seleção de parâmetros geométricos apropriados para uso em projeto (Cardoso, 1987; Cardoso e Carreto, 1989; Springer, 2006, Springer *et al.*, 2001; Gerscovich *et al.*, 2002; Lima *et al.*, 2005; Gerscovich *et al.*, 2005).

2.1 – Pré-dimensionamento

A concepção de uma obra em solo grampeado envolve a escolha de vários parâmetros dos grampos: comprimento (L), ângulo de inclinação (α), espaçamento (S_v e S_h) e resistência, de modo a garantir as condições de estabilidade interna e externa. A seleção destes valores depende de muitos fatores, como a altura da escavação (H), ângulo de inclinação do talude (β), tipo de grampo utilizado (do qual depende o valor da resistência lateral unitária solo/grampo, q_s) e eventuais restrições impostas pela legislação.

A experiência adquirida pelo projeto de investigação do governo francês (Clouterre, 1991) resultou numa proposta de dimensionamento resumida na Quadro 1.

Parâmetro	Valor
Comprimento dos grampos (L)	0,8 a 1,2H
Número de grampos por m ² de paramento	0,15 a 0,40
Diâmetro dos grampos	20 a 25mm
Resistência à tração da barra de aço (T_G)	100 a 600kN
Densidade do grampeamento (d)	0,13 a 0,60
Ângulo de inclinação de grampo (α) com a horizontal	0° a 20°
Inclinação do paramento com a vertical (ŋ)	0° a 10°
Inclinação da superfície do terreno (θ_T)	0° a 5°

Quadro 1 – Valores típicos (H \leq 5m) (Clouterre, 1991).

Para pré-dimensionamento, Clouterre (1991) recomenda o emprego de ábacos de estabilidade (Fig. 5), em função do ângulo de atrito do solo (ϕ), da relação entre comprimento do grampo e altura do talude (L/H), da densidade do grampeamento (d) e do fator de estabilidade (N), definidos como:

$$N = \frac{c}{\gamma H}$$
(1)

$$d = \frac{\pi \phi_{aço} \, q_s}{\gamma S_v S_h} \tag{2}$$

c- coesão,

 γ – peso específico do solo,

 ϕ_{aco} – diâmetro do grampo,

- q_s resistência no contato solo-grampo,
- S_v e S_h espaçamentos vertical e horizontal,

H – altura da escavação.



Fig. 5 – Ábaco de estabilidade para pré-dimensionamento de talude grampeado com L/H=0,6 (Clouterre, 1991).

Com isso, o fator de segurança fica determinado a partir da utilização dos ábacos, conforme indica a sequência a seguir:

- i. Seleciona-se o ábaco em função do valor L/H;
- ii. Determina-se o ponto M (tan , N);
- iii. Seleciona-se a densidade de grampeamento (d);
- iv. A interseção da curva de densidade (d) com a reta OM define o ponto A;
- v. FS (estabilidade interna) = OM/OA.

Na elaboração de projetos, uma das questões mais complexas refere-se à estimativa da resistência unitária no contato solo-grampo, pois o comportamento do solo e do grampo dependem do modo de deformação do sistema solo-reforço.

3 - RESISTÊNCIA UNITÁRIA NO CONTATO SOLO-GRAMPO (qs)

Durante a construção, devido à descompressão lateral do solo, os grampos são solicitados por esforços de tração. A transferência de tensões entre o solo e o reforço envolve um mecanismo de resistência ao cisalhamento entre os dois materiais.

São vários os fatores que interferem no valor de q_s : estratigrafia, processo executivo (atributos do grampo, método de perfuração e limpeza do furo, características da calda de cimento e o emprego de aditivos), etc. Desta forma, o valor de q_s deve ser obtido experimentalmente em ensaios de arrancamento no campo (*pullout tests*). Uma vez determinada a força normal que leva o grampo à ruptura por cisalhamento com o solo (T_N), o valor de q_s (expresso em kPa), é relacionado ao deslocamento da extremidade externa do grampo, pela expressão:

$$q_s = \frac{T_N}{\pi . \phi_{furo} L_a} \tag{3}$$

φ_{furo} – diâmetro do furo,

L_a – comprimento injetado do grampo.

3.1 – Correlações empíricas: q_s vs. N_{SPT}

Bustamante e Doix (1985) relacionaram o valor de q_s com a pressão limite (p_1) em ensaio de pressiômetro Ménard e com o índice N_{SPT} . Os resultados estão apresentados na Fig. 6, em função do tipo de solo. As propostas de correlação consideram o número de injeções da calda de cimento (um estágio de injeção - IGU; vários estágios de injeção – IRS).

Com base nos resultados de ensaios de arrancamento em obras realizadas no Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília, Ortigão (1997) propôs uma correlação em função do valor de N_{SPT}, mostrada na Fig. 7.



Fig. 6 – Correlação q_s, p₁ e N_{SPT} (Bustamante e Doix, 1985).



Fig. 7 – Correlação entre q_s e N_{SPT} (Ortigão, 1997).

Nestes casos, os grampos foram executados em furos com diâmetro (ϕ_{furo}) entre 75 e 150mm, com introdução de calda de cimento sem pressão. Apesar da dispersão dos resultados, causada pela diversidade de procedimentos de execução dos grampos, o autor sugeriu a seguinte correlação:

$$q_s(kPa) = 50 + 7,5 N_{SPT} \tag{4}$$

N_{SPT} - índice de resistência à penetração.

Posteriormente, com a introdução de novos resultados, a proposta foi revisada por Ortigão e Sayão (2004), que propuseram a definição de limites superior e inferior, como indica a Fig. 8.



Fig. 8 – Correlação entre q_s e N_{SPT} (Ortigão e Sayão, 2004).

Ehrlich e Silva (2012) realizaram um levantamento bibliográfico de ensaios de arrancamento em obras executadas no Brasil, objetivando identificar possíveis correlações entre q_s , N_{SPT} e o número de injeções. Foram analisados solos com características distintas: solos colapsíveis de Brasília, porosos de São Paulo, e solos residuais gnáissicos do Rio de Janeiro (Feijó e Ehrlich, 2001). Os autores reforçaram a vantagem de se executar grampos com a reinjeção do furo, para garantir um maior valor de q_s , como sugerido por Springer (2001), e também reportaram a dificuldade de estabelecer correlações entre q_s e N_{SPT}.

Goldbach *et al.* (2012) realizaram dois ensaios de arrancamento em grampos injetados por gravidade e, mesmo sem a re-injecção de calda de cimento, obtiveram valores de q_s superiores aos previstos com as correlações empíricas propostas por Bustamante e Doix (1985) e Ortigão e Sayão (2004).

Pitta *et al.* (2003) apresentaram resultados de ensaios de arrancamento, realizados em cinco obras distintas na cidade de São Paulo, onde foram observados os efeitos decorrentes das fases sucessivas de injeção. Os dados de campo confirmaram o aumento da resistência ao arrancamento (q_s) com o número de injeções. Os valores de N_{SPT} apresentados no presente trabalho correspondem à média dos valores localizados na faixa de instalação dos grampos.

3.1.1 – Levantamento de dados de obras no Brasil

Com objetivo de ampliar o banco de dados correlacionando a resistência ao arrancamento (q_s) com valores de N_{SPT}, realizou-se levantamento bibliográfico da experiência prática de obras em solo grampeado. Os resultados estão listados abaixo.

- Gotlieb e Alonso (1997) executaram um projeto de estabilização de talude no pátio de uma indústria na cidade de Embu, São Paulo, nas cercanias da Rodovia Regis Bittencourt (BR116). A obra envolveu a realização de seis ensaios de arrancamento (dois ensaios próximos a cada sondagem com medição de torque), com ancoragem de 3 metros de grampo.
- Hlenka *et al.* (2010) realizaram ensaios de arrancamento na obra de um prédio comercial em Joinville (Brasil), em solo residual de gnaisse. O ensaio foi interrompido quando se atingiu a carga de arrancamento prevista para o local; isto é, não se atingiu a carga de ruptura no campo.
- Medeiros *et al.* (2010) realizaram ensaios de arrancamento de quatro grampos em solo argilo-arenoso de Brasília.

- Moraes e Arduino (2003) apresentaram o relato de uma obra com dois ensaios de arrancamento na Zona Franca de Manaus, AM, em uma região de solos argilo-arenosos. Foram também obtidas oito amostras na sondagem à percussão para caracterizar o solo.
- Ortigão *et al.* (1992) apresentaram resultados de solo pregado em uma encosta com solo de residual arenoso do Morro da Formiga (Rio de Janeiro). Durante a obra foram executados três ensaios de arrancamento com 3 metros de grampo ancorado.
- Silva (2005) reportou uma campanha com oito ensaios de arrancamento no Morro do Palácio (Museu II), em solo residual de gnaisse em Niterói, próximo ao Rio de Janeiro. Os ensaios foram realizados aos pares em quatro cotas diferentes ao longo da encosta, sendo alguns grampos instrumentados com *strain gages*.
- Souza *et al.* (2005) executaram ensaios de arrancamento no campo de provas da empresa Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda, em São Paulo, com 12 grampos, em solo residual, caracterizado como silte arenoso. Eles concluíram que não se deve deixar de executar uma perfuração sem que a cavidade permaneça estável até a conclusão da injeção e, principalmente, as injeções devem ser realizadas em três fases, para garantir o aumento de resistência ao cisalhamento solo-grampo.

3.2 - Proposta de correlação q_s vs. N_{SPT} incorporando o número de fases de injeção

A partir dos dados coletados, foi elaborada uma planilha contendo informações sobre o tipo de solo, geometria do grampo (diâmetro do furo, diâmetro da barra, etc.), número de injeções, carga de tração máxima no arrancamento, valor do índice de resistência à penetração N_{SPT} e energia correspondente.

Alguns fatores influenciam o valor do N_{SPT} , em especial a energia transmitida ao amostrador. No Brasil, o uso de sistemas manuais, para permitir a queda do martelo de cravação, resulta em perda da eficiência do processo. A prática internacional sugere normalizar o número de golpes com base no padrão americano, correspondente a uma eficiência média de 60% (N_{60}). A experiência atual brasileira recomenda (Freitas *et al.*, 2012):

$$N_{60} = 1,37 N_{SPT}$$
 (5)

 N_{60} – índice de resistência à penetração normalizado, N_{SPT} – índice de resistência à penetração.

Como as informações coletadas na literatura eram imprecisas quanto à correção da energia do ensaio N_{SPT} , no presente trabalho adotou-se a correção expressa na equação 5.

Em casos de solos de elevada resistência, é comum que o ensaio de penetração dinâmica não consiga ser executado plenamente, sendo fornecido um valor parcial indicativo do número de golpes e a distância penetrada. Alguns autores, com base nesses resultados, extrapolam o resultado para estimar o número de golpes N_{SPT} . Com isso, chega-se a valores de N_{SPT} muito elevados, gerando incertezas na análise. Neste trabalho, optou-se por limitar N_{SPT} a um valor máximo de 50 golpes.

A Fig. 9 resume os valores de q_s em relação a N_{SPT} , obtidos no levantamento bibliográfico, sem considerações sobre o tipo de solo, processo executivo do grampo, ou correção da energia. Nesta figura procurou-se incluir na legenda o local do ensaio e a referência da literatura. Com isso, há casos em que a referência é a mesma, mas o local do ensaio de arrancamento é diferente.



Fig. 9 – Correlação entre $q_s e N_{SPT}$.

Ainda na Fig. 9, foram traçadas as diferentes propostas para estimativa de q_s sugeridas por vários autores. De uma forma geral, há uma dispersão significativa dos resultados, o que dificulta o estabelecimento de qualquer correlação empírica.

Observa-se que a proposta de Ortigão e Sayão (2004) representa um limite superior dos resultados dos ensaios e mostra-se mais adequada para valores de N_{SPT} acima de 30 golpes, quando comparada com a proposta brasileira anterior de Ortigão (1997). Por outro lado, os dados de Springer (2006) representam um limite inferior.

As curvas originadas da proposta de Bustamante e Doix (1985) posicionam-se aproximadamente na média, com tendência a fornecer valores mais altos de q_s para N_{SPT} acima de 40 golpes.

Dada a influência do número de fases de injeção no valor da resistência unitária ao arrancamento, os resultados foram discriminados quanto a este aspecto. Considerando os ensaios de arrancamento em que a instalação do grampo foi feita com reinjeção, verifica-se, na Fig. 10, a tendência de uma curva média, representada pela equação 6, associada a um coeficiente de correlação (r²) relativamente baixo, de 0,52.

$$q_s(kPa) = 47,4 \ln N_{SPT} + 33,8 \tag{6}$$



Fig. 10 – Correlação entre q_s e N_{SPT} em ensaios com mais de uma fase de injeção.

Por outro lado, os grampos executados sem reinjeção (Fig. 11) indicaram uma curva média dada pela equação 7 com valor de r^2 na mesma ordem de grandeza que o anterior (0,49). Adicionalmente, quando as curvas são comparadas, verifica-se uma diferença de 125kPa no valor de q_s , pela simples alteração no processo executivo.

$$q_s(kPa) = 38,94 \ln N_{SPT} - 7,2 \tag{7}$$



Fig. 11 – Correlação entre q_s e N_{SPT} em ensaios de grampos sem reinjeção, comparada com a curva média de ensaios com reinjeção.

Observa-se, ainda, a elevada dispersão para valores baixos de N_{SPT} entre 5 e 10 golpes. Cabe ressaltar que a dispersão verificada para N_{SPT} =50 decorre da hipótese adotada neste trabalho, de se limitar N_{SPT} máximo de 50 golpes.

Quanto a possíveis influências da existência de diferenças entre processos executivos praticados nos diversos Estados Brasileiros, os resultados foram subdivididos em dados coletados no Rio de Janeiro e em outros estados, como mostra a Fig. 12. Verifica-se que há uma razoável concordância com a equação proposta neste trabalho, para os casos do Rio de Janeiro (Fig. 12a) sem desmerecer a grande variabilidade dos resultados. Curiosamente, no banco de dados de outros estados, coletado para este trabalho, os valores de N_{SPT} não ultrapassam 10 golpes (Fig. 12b) e,

portanto, os valores de q_s concentram-se na faixa onde os resultados se encontram mais dispersos. Por outro lado, a proposta representada pela equação 6 aparentemente superestima os valores de q_s . Assim sendo, sugere-se que a curva média seja deslocada para um limite inferior dado por:



$$q_s(kPa) = 47,4 \ln N_{SPT} - 38,3$$
 (8)

Fig. 12 – Correlação entre q_s e N_{SPT}.

Ainda com relação à influência do processo executivo, procurou-se também identificar os efeitos da existência ou não da pré-lavagem. Para os casos em que foi explicitada a existência de limpeza do furo observou-se não haver, aparentemente, qualquer influência no valor de q_s com o uso desta alternativa de execução do grampo.

4 – INFLUÊNCIA DA CONEXÃO ENTRE GRAMPO E PAREDE

A influência no comportamento de estruturas grampeadas de se adotar a consideração de grampo solidário à parede ou grampo livre foi avaliada a partir de simulações numéricas de taludes escavados em solo com face vertical.

No caso da extremidade do grampo ser embutida ou dobrada (Fig. 3), é possível haver um puncionamento do grampo em relação à face da escavação. Seria, portanto, recomendável simular o grampo como livre. Por outro lado, quando a extremidade é fixada por placa metálica e porca (Fig. 3), considera-se mais apropriado introduzir o grampo na malha solidarizando-o à parede da face (grampo fixo).

Dois programas comerciais foram utilizados nesse estudo: FLAC 2D e PLAXIS 2D. O programa FLAC apresenta vantagem de dispor de elemento específico para representação do grampo. Por outro lado, como não apresenta módulo de pré-processamento, a montagem da geometria é bastante complexa. Já o programa PLAXIS 2D tem uma plataforma amigável, mas é limitado em termos de elementos disponíveis.

4.1 – Programa FLAC

O programa FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua – ITASCA, 1996) é baseado no método de diferenças finitas e simula o comportamento bidimensional e as etapas construtivas de

obras de engenharia, incluindo estruturas constituídas de solos e/ou rochas. No programa estão incorporados diversos modelos constitutivos, elástico ou elasto-plásticos, além de modelos de junta (para interfaces entre materiais de comportamentos distintos).

A simulação do grampo é feita através de elementos unidimensionais que trabalham à tração, não apresentando resistência à flexão. A resistência no contato solo-grampo é representada pela relação entre a força axial normalizada pelo comprimento do grampo, (F_s^{max} / L) (Fig. 13a), a qual pode ser descrita pela equação 8. O comportamento cisalhante da injeção em função dos deslocamentos relativos entre o solo e o grampo é representado pelo parâmetro de rigidez *kbond*, mostrado na Fig. 13b.

$$\frac{F_s^{\max}}{L} = S_{bond} + p' \times perimetro \times \tan\left(S_{friction}\right) \tag{9}$$

 S_{bond} – intercepto de coesivo no contato solo-grampo,

p'-tensão normal efetiva média,

 $S_{friction}$ – parâmetro de atrito no contato solo-grampo.

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), sendo o deslocamento da malha compatibilizado com o deslocamento de uma das extremidades do grampo. Neste caso, a deformabilidade é governada pela malha e não há transferência de esforços para o elemento estrutural. Os pontos de força axial máxima em cada grampo ocorrem próximo à face de escavação (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 (Plumelle e Schlosser, 1990).

A resistência no contato solo-grampo é definida pelas componentes de adesão e atrito.



(a) Resistência ao cisalhamento da injeção

(b) Força cisalhante na injeção × deslocamento

Fig. 13 – Modelo de comportamento da injeção.

4.2 – Programa PLAXIS

O programa PLAXIS 2D foi desenvolvido especificamente para análises de problemas geotécnicos, com base no método dos elementos finitos (Brinkgreve e Vermeer, 1998).

Neste programa, os materiais são representados por elementos ou zonas de tal forma que a malha gerada pode se adequar perfeitamente às condições de contorno do problema em questão. São incorporados 5 modelos constitutivos.

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. Assim sendo, sugere-se o emprego do elemento de 6 nós, uma vez que elementos de 15 nós exigem esforço computacional relativamente alto.

Ao contrário do FLAC, 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. Já os geotêxteis são elementos esbeltos, que não apresentam rigidez à flexão; são capazes de suportar altos esforços de tração, mas não possuem resistência à compressão.

No caso de interfaces solo-elemento, o PLAXIS disponibiliza um elemento característico (Elemento de Interface), o qual é 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, cujas propriedades são estimadas a partir da resistência do solo, através das equações:

$$c_{inter} = R \times c \tag{10}$$

$$tan\phi_{inter} = (\mathbf{R} \times tan\phi) \le tan\phi \tag{11}$$

 $c e \phi$ – parâmetros de resistência do solo,

R – 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.

O PLAXIS recomenda que trechos ancorados de tirantes sejam representados por elementos tipo geotêxtil acrescido de interface. Esta sugestão pode ser estendida aos grampos, face à semelhança entre o comportamento desses elementos.

4.3 - Caso estudado

A análise numérica considerou uma escavação vertical de 3,0m de largura e 10,5m de profundidade. Não foi considerado nível d'água. Os grampos foram compostos por barra de aço de 25mm de diâmetro e 6m de extensão, 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. O processo construtivo foi simulado em 7 etapas, considerando-se cada uma delas a escavação de 1,5m de altura, seguida da introdução do grampo, simultaneamente à ativação de parede de concreto com espessura de 100mm.

As malhas adotadas nos programas FLAC e PLAXIS foram constituídas, respectivamente, de 138 divisões horizontais e 84 verticais (Fig. 14a) e 8877 elementos triangulares de 6 nós (Fig. 14b). A definição das condições de contorno foi discutida por Briaud e Lim (1997).



Fig. 14 – Discretização da malha.

Os parâmetros geomecânicos dos materiais envolvidos nas simulações estão descritos no Quadro 2 e Quadro 3. Vale ressaltar que todos os parâmetros foram selecionados a partir de casos de obra observados na literatura (Springer, 2001).

Quadro 2 – Parâmetros mecânicos – FLAC.

Material	Parâmetro	Valor
Grampo	Tensão de escoamento do aço ($\sigma_{aço}$)	500 MPa
	Módulo de elasticidade do aço (E _{aço})	205 GPa
	Módulo cisalhante da injecão (G _{injeção})	9 GPa
	Resistência unitária ao arrancamento do grampo (q _s)	150 kPa
Parede	E _{parede}	24 GPa

No programa PLAXIS, o grampo foi simulado como geotêxtil. O módulo de elasticidade (\overline{E}) foi calculado em função da média ponderada das áreas relativas ao aço e ao material de injeção, conforme a equação (12). Os parâmetros mecânicos utilizados pelo programa PLAXIS estão descritos no Quadro 3.

$$\overline{E} = \frac{(E_{injeq\tilde{a}o} \times A_{injeq\tilde{a}o}) + (E_{aqqo} \times A_{aqo})}{A}$$
(12)

E - módulo de Young,

Ainiecão - área da seção correspondente ao trecho injetado,

Aaco - área da seção da barra de aço,

A – área total.

Material	Parâmetro	Valor		
Grampo	$\overline{E}A$	185 MN		
	$\overline{E}I$	130 kN.m ²		
	W	0,74 kN/m		
Parede	EA	1,6×10° kN/m		
	EI	1,3×10 ⁶ kN.m ² /m		
	W	0,65 kN/m		
	ν	0,20		
Nota - EA = módulo de rigidez axial, EI = módulo de rigidez à flexão, v = coeficiente de Poisson, w = peso relativo				

Quadro 3 – Parâmetros geomecânicos – PLAXIS.

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.

Nos dois programas, a característica tridimensional do solo pregado foi adaptada à condição bidimensional, através da divisão de alguns parâmetros do grampo pelo espaçamento horizontal.

4.4 - Resultados obtidos

4.4.1 – Programa FLAC

A Fig. 15 mostra os perfis de deslocamento horizontal, obtidos pelo FLAC a uma distância de 1,75m da face do talude. Os resultados referem-se a diferentes etapas da escavação, uma vez que a razão entre comprimento do grampo (L = 6m) e altura do talude (H) varia de 1,00 a 0,57, correspondendo, respectivamente, a alturas de 6,0m a 10,5m.

Para valores de L/H superiores a 0,67 (isto é, H < 9m), nota-se que os resultados independem da forma de introdução do grampo. Já para razões L/H < 0,67 (ou seja, H > 9m), os deslocamentos horizontais são significativamente maiores quando o grampo tem ambas as extremidades livres, como resultado da condição de puncionamento do grampo (Springer *et al.*, 2001; Lima *et al.*, 2002). Este comportamento é atribuído à ocorrência de um deslocamento relativo entre a extremidade do grampo e a face da escavação, gerando uma condição de puncionamento da parede.

A Fig. 16 mostra os deslocamentos verticais observados na superfície do terreno. Da mesma forma do observado nos perfís de deslocamento horizontal, a influência do tipo de fixação do grampo afeta exclusivamente taludes escavados com altura superior a 9m; isto é, L/H < 0,67. Para menores alturas, a superfície do terreno apresenta uma ligeira expansão, cuja magnitude pode ser considerada desprezível (< 3mm).

Observa-se, ainda na Fig. 16, uma distribuição de deslocamentos verticais variáveis em função da distância à face do talude, em particular no intervalo entre 4 e 6m. Como os grampos possuem 6m de comprimento e estão inclinados de 10° com a horizontal, este intervalo corresponde aproximadamente ao limite entre a região reforçada com grampos e a região não reforçada. Na região junto à face do talude escavado, o solo reforçado deforma-se como um monolito em direção à face, fazendo com que a região posterior sofra um recalque adicional.



Fig. 15 – Comparação entre os deslocamentos horizontais a uma distância de 1,75m da face de escavação (FLAC).



Fig. 16 - Comparação entre os deslocamentos verticais na superfície do terreno (FLAC).

A Fig. 17 mostra que o ponto de força axial máxima varia significativamente em função da forma de fixação do grampo. No caso de grampo fixo, os maiores esforços ocorrem junto à face. Em contrapartida, se o grampo desloca-se livremente, o ponto de força axial máxima é mais interno. Com isto, o mecanismo de ruptura baseado na existência de duas regiões, ativa e passiva, só ocorre em estruturas grampeadas quando o método executivo permite o deslocamento relativo entre o grampo e a face do talude.



Fig. 17 – Distribuição das forças axiais ao longo dos grampos para H = 10,5m (L/H = 0,57) (FLAC) onde Fmax = força axial máxima em cada grampo; Fesc = força de escoamento da barra de aço.

Adicionalmente, observa-se 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 grampo é fixado à parede, os grampos inferiores são os mais solicitados. Por outro lado, quando o grampo está solto, a mobilização ocorre aproximadamente à meia altura do talude da escavação.

Por fim, verifica-se que os grampos mais próximos à superfície contribuem menos na contenção do solo do que os grampos inferiores. As forças axiais máximas desenvolvidas nos grampos inferiores são inicialmente pequenas, porém crescem rapidamente nos estágios subseqüentes da escavação, contribuindo significativamente na estabilização do talude (Springer, 2001).

4.4.2 – PLAXIS vs. FLAC

A Fig. 18 compara as distribuições de deslocamentos horizontais, ao final da escavação (L/H=0,57), para diferentes condições de conexão entre grampo e parede (Grampo fixo e Grampo livre). Os resultados mostram boa concordância com relação à simulação do FLAC.

A introdução do elemento de mola mostrou-se eficaz em permitir o deslocamento relativo entre o grampo e a parede, considerando-se valores de rigidez da mola cerca de 500 vezes menores que a rigidez do grampo. Conclui-se, portanto, que a simulação com o programa PLAXIS só será válida caso o processo executivo garanta a compatibilidade de deslocamentos entre grampo e parede.

A Fig. 19 compara as distribuições de esforços axiais ao longo do grampo nº.5, localizado cerca de 7m de profundidade. Independente das condições de conexão do grampo, os programas mostram razoável concordância. Tal comportamento é observado em todos os níveis de grampos, como mostra a Fig.20.



Fig. 18 - Distribuição dos deslocamentos horizontais (PLAXIS vs. FLAC).



Fig. 19 - Distribuição de esforços axiais ao longo do grampo a 7m de profundidade (PLAXIS vs. FLAC).



Fig. 20 - Distribuição de força máxima de tração nos grampos (PLAXIS vs. FLAC).

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo teve como propósito não só alertar sobre a influência de aspectos executivos na previsão do comportamento de taludes em solo pregado, mas também propor alternativas de projeto. Foram estudadas questões relativas à estimativa preliminar da resistência unitária no contato solo-grampo em função de N_{SPT} e do número de fases de injeção. Adicionalmente, abordou-se a influência do tipo de acabamento do grampo junto à parede no desenvolvimento dos deslocamentos e esforços transmitidos aos grampos.

Quanto à relação q_s vs. N_{SPT} foram observados os seguintes pontos:

- i. Dificuldade de se estabelecer uma correlação confiável, face à dispersão dos resultados.
- ii. As propostas antecedentes tendem a fornecer limite superior (Ortigão, 1997; Ortigão e Sayão, 2004) e inferior (Springer, 2006).
- iii. Foi sugerida nova proposta de correlação, para estimativa de q_s em solos brasileiros, identificando os casos de grampos com e sem reinjeção.
- iv. A limpeza prévia do furo pouco afeta o valor de q_s.

As análises também mostram que há diferenças significativas no comportamento do sistema solo-grampo quando a extremidade do grampo é fixa ou livre, em relação à face escavada. Quanto aos deslocamentos previstos para a massa de solo pregado estes dependem claramente da razão L/H (comprimento do grampo/altura do talude); a saber:

- i. Para L/H < 0,67, os deslocamentos horizontais e verticais da massa grampeada são menores quando os grampos são fixados à face.
- ii. Para L/H > 0,67, o processo construtivo (grampo fixo ou livre) não tem influência significativa nos deslocamentos da massa grampeada.

Com relação à distribuição dos esforços nos grampos, 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; a saber:

- i. No caso de grampo fixo, o ponto de tração máxima ocorre junto à face.
- ii. No caso de grampo livre, a tração máxima ocorre no interior do maciço, em consonância com a hipótese de mecanismo de ruptura envolvendo duas regiões, ativa e passiva.
- iii. Os grampos mais próximos à superfície contribuem menos do que os grampos inferiores.

Por fim, o uso do programa PLAXIS permite simulação de obras com solo pregado somente quando o deslocamento do grampo é solidário ao da parede. Em casos de grampos livres, recomenda-se adotar um elemento de mola unindo a parede ao grampo com rigidez cerca de 500 vezes menor que a do grampo.

6-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. Os autores agradecem a todos os colegas que de certa forma contribuiram para esta pesquisa.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anthoine, A. (1990). Une méthode pour le dimensionnement à la rupture des ouvrages en sols renforcés. Revue Française de Géotechnique, (50), pp.5-17.
- Briaud, J.L.; Lim, Y. (1997). Soil-nailed wall under piled bridge abutment: simulation and guidelines. J. Geotechnical Geoenviron. Eng., Vol.123, pp.1043-1050.
- Bridle, R.J. (1989). Soil nailing analysis and design, Ground Engineering. September, pp. 52-56.
- Brinkgreve, R.B.J.; Vermeer, P.A. (1998). *Plaxis, Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*. A.A. Balkema, P.O. Rotterdam, Netherlands.
- Bustamante, M.; Doix, B. (1985). Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux *injectés*. Bulletin de Liaison des LPC, nº 140, França.
- Cardoso, A.J.M.S. (1987). *A Técnica das Pregagens em Solos Aplicada em Escavações*. Tese de Doutoramento, FEUP, Universidade do Porto, Portugal, 495p.
- Cardoso, A.S.; Carreto, A.P. (1989). *Performance and analysis of a nailed excavation*. Proc. 12th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 2, Rio de Janeiro.
- Cartier, G.; Gigan, J.P. (1983). *Experiments and Observations on Soil Nailing Structures*. Proc. 8th European Conf. on S.M.F.E, Helsinki, vol. 2, pp.473-476.
- Clouterre (1991). Soil Nailing Recommendations Project National Clouterre. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Presses de l'ENPC. Paris, France, 301p.
- Ehrlich, M.; Silva, R.C. (2012). Resistência ao arrancamento de grampos análise da influência do NSPT e da injeção da bainha nos resultados. XVI Congr. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. Geotécnica, ABMS, CD-ROM.

- Feijó, R.L.; Ehrlich, M. (2001). Resultados de ensaios de arrancamento em grampos injetados em dois pontos do município do Rio de Janeiro. III COBRAE, Conf. Bras. sobre Estabilidade de Encostas, ABMS, Rio de Janeiro, pp.517-524.
- Freitas, A.; Pacheco, M.E.; Danziger, B. (2012). *Estimating Young Moduli in Sands from the Normalized* N₆₀ *Blow Count*. Soils & Rocks, v. 35, no. 1 pp.89-98.
- Gässler, G.; Gudehus, G. (1981). Soil Nailing Some Aspects of a New Technique. Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. and Foundation Eng., Stockholm, Sweden, vol. 3, Session 12, pp.665-670.
- GeoRio (2013). *Manual Técnico de Encostas*. A. Ortigão e A. Sayão (Eds.), Fundação Geo-Rio, Prefeitura do Rio de Janeiro.
- Gerscovich, D.M.S.; Springer, F.O.; Sayão, A.S.F.J.; Lima, A.P. (2002). Deformabilidade de escavações com solo pregado. 8º Cong. Nac. de Geotecnia, Portugal, SPG, vol. 3, pp.1579-1588.
- Gerscovich, D.M.S.; Sieira, A.C.; Lima, A.P; Sayão, A.S.F.J. (2005). Técnicas de modelagem numérica de escavações de taludes em solo grampeaado. IV COBRAE, Conf. Bras. sobre Estabilidade de Encostas, ABMS, vol. 2, pp. 671-680.
- Goldbach, R.; Mendonça, M.B.; Becker, L.D.B. (2012). Análise da correlação entre a resistência ao arrancamento de grampos e o índice de resistência à penetração do ensaio SPT aplicada a um projeto de solo pregado. XVI Cong. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. Geotécnica, ABMS, CD-ROM.
- Gotlieb, M.; Alonso, U.R. (1997). *Estabilização de um talude sem alterar a estética*. II COBRAE, Conf. Bras. sobre Estabilidade de Encostas, ABMS, Rio de Janeiro, pp.603-612.
- Guilloux, A; Notte G.; Schlosser, F. (1982). Soil Nailing: Practical Applications. Symp. on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, pp. 389-397.
- Hlenka, L.; Odebrecht, E.; Silva, T.P. (2010). Determinação da Resistência ao Arrancamento de Grampos. XV Cong. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. Geotécnica, CD-ROM.
- 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*. Proc. Int. Reinforced Soil Conference, British Geotechnical Society, A. McGown, K.C. Yeo and K.Z. Andrawes (Eds.), London.
- Juran, I.; Elias, V. (1987). Soil Nailed Retaining Structures: Analysis of Case Histories. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE Geotech. Special Publication no. 12, N. York, pp.232-244.
- Juran, I.; Baudrand, G.; Farag, G.; Elias, V. (1988). Kinematical limit analysis approach for the design of nailed soil retaining structures. Int. Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement. Fukuoka, Japan, pp. 301-306.
- Lima, A.P.; Gerscovich, D.M.S.; Sayão, A.S.F.J. (2002). Modelagem Numérica de Escavações Grampeadas. XII Cong. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. Geotécnica, I Cong. Luso-Bras. de Geotecnia, ABMS/SPG, S. Paulo, v. 1, pp.447-457.
- Lima, A.P.; Gerscovich, D.M.S.; Sieira, A.C.C.F.; Sayão, A.S.F.J. (2005). Avaliação de programas computacionais para simulação de escavação de taludes em solo pregado. V INFOGEO,

Simp. Bras. de Aplicações de Informática em Geotecnia, ABMS, Belo Horizonte, vol. 1, pp.309-314.

- Medeiros, A.G.B.; Cobucci, R.A.; Cunha, R.P.; Cortopassi, R.S.; Bezerra, J.E.; Silva, C.M. (2010). Simulação Numérica e Estudo do Comportamento de Estruturas de Contenção no Distrito Federal – Estudo de Caso. XV Cong. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. Geotécnica, ABMS, CD-ROM.
- Mitchell, J.K.; Villet, W.C.B. (1987). Reinforcement of Earth Slopes and Embankments. NCHRP Report 290, USA Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- Moraes, L.J.; Arduino, E.G.A. (2003). *Estabilização de talude por solo pregado em Manaus AM*. Workshop de Solo Grampeado, ABMS, S.Paulo, pp.121-125.
- More, J.Z.P. (2003). Análise Numérica do Comportamento de Cortinas Atirantadas em Solos. Dissertação de Mestrado, Depto. Eng. Civil, PUC-Rio.
- Ortigão, J.A.R.; Sayão, A.S.F.J. (2004). *Handbook of Slope Stabilization*, Ed. Springer Verlag, Alemanha, 478p.
- Ortigão, J.A.R. (1997). *Ensaios de arrancamento para projetos de solo pregado*. Nota Técnica, Revista Solos e Rochas, ABMS, vol. 20:1, pp.39-43.
- Ortigão, J.A.R.; D'Avila, C.J.R.; Silva, S.P.; Maia, H.S. (1992). Solo pregado no Morro da Formiga, RJ. 1ª COBRAE, Conf. Bras. sobre Estabilidade de Encostas, ABMS, Rio de Janeiro, v. 01, pp.47-56.
- Pitta, C.A.; Souza, G.J.T.; Zirlis, A.C. (2003). Solo pregado: alguns detalhes executivos: ensaios e casos de obras. Workshop Solo Grampeado, ABMS, São Paulo, pp. 01-20.
- Plumelle, C. (1986). Full Scale Experimental Nailed Soil Retaining Structures. Revue Française de Géotechnique, nº. 40, pp.45-50.
- Sayão, A.S.F.J.; Lima, A.P.; Springer, F.O.; Nunes, A.L.L.S.; Dias, P.H.V.; Gerscovich, D.M.S. (2005). Design and instrumentation aspects of a 40m high nailed slope, 16th ICSMGE – International Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Engineering, Osaka, Japan, 4p.
- Schlosser, F. (1983). Analogies et différences dans le comportement et le calcul des ouvrages de soutènement en Terre Armée et par clouage du sol. Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publiques, n. 418, pp.8-26.
- Shen, C.K.; Bang, S.; Romstad, K.M.; Kulchin, L.; Denatale J.S. (1981). Field Measurements of Earth Support System. Journal of the Geotechnical Eng. Division, ASCE, vol. 107, No. 12, pp.1625-1642.
- Silva, T.P. (2005). *Resistência ao Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaisse*. Dissertação de Mestrado, Depto. Eng. Civil, PUC-Rio, 144p.
- Soares, J.E.S.; Gomes, R.C. (2003). Um caso de obra de solo pregado na encosta da BR 101 em Angra dos Reis – RJ. Workshop: Solo Pregado ABMS, S.Paulo, pp.49-56.
- Souza, G.J.T.; Pitta, C.A.; Zirlis, A.C. (2005). Solo Pregado aspectos executivos do chumbador. IV COBRAE, Conf. Bras. sobre Estabilidade de Encostas, ABMS, Salvador, BA, v. 2, pp.835-844.

- Springer, F.O.; Gerscovich, D.M.S.; Sayão, A.S.F.J. (2001). Deformabilidade de taludes com solo pregado. III COBRAE, Conf. Bras. sobre Estabilidade de Encostas, ABMS, Rio de Janeiro, pp.483-490.
- Springer, F.O. (2001). Estudos da Deformabilidade de Escavações com Solo Pregado. Dissertação de Mestrado, Depto. Eng. Civil, PUC-Rio.
- Springer, F.O. (2006). Ensaios de Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaisse. Tese de Doutoramento, Depto. Eng. Civil, PUC-Rio, 310p.
- Springer F.O.; Gerscovich, D.M.S.; Sayão, A.S.F.J.; Lima, A.P.; Ortigão, J.A.R. (2001). Uso do programa FLAC para modelagem numérica de estruturas grampeadas. IV Encontro sobre Modelagem Computacional, IPRJ-UERJ, Nova Friburgo, R.J., pp.240-250.
- Stocker, M.F.; Korber, G.W.; Gassler, G.; Gudehus, G. (1979). Soil nailing: Cloutage du sol. Proc. International Conf. on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, vol.2, pp.469-474.