

RESULTADOS DE UMA IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA PARA A AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTACAS DE BAMBU NA ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS

Leonardo Augusto Lobato Bello*¹.

Euripedes A. Vargas e Tácio M. P. De Campos.*²

RESUMO: Esta pesquisa propõe uma metodologia numérica para contabilizar o efeito de inclusões verticais de elementos constituídos de um sistema de bambu-cal, atuando como reforço passivo na estabilização de encostas. Durante a determinação dos esforços internos contrários ao movimento de massa, contabiliza-se, além dos deslocamentos translacionais dos pontos nodais da malha de elementos finitos, o efeito das rotações. Um estudo paramétrico simplificado é realizado com o intuito de gerar subsídios para a compreensão do comportamento destas estacas no contexto da estabilização de encostas e suas possíveis limitações.

INTRODUÇÃO

O emprego de estacas na estabilização de encostas, seja como uma ou múltiplas linhas, ainda não é bastante difundido no Brasil como em outros países. Broms (1972), descreve o uso nos Estados Unidos de estacas de madeira e estacas moldadas in loco, com diâmetros elevados (1-1,5 m), com o intuito de aumentar a estabilidade global de taludes instáveis. No Japão, Ito et. al. (1981;1982), apresentam resultados significativos do emprego de linhas de estacas tubulares metálicas na prevenção de movimentos de massa. Na Alemanha, Winter & Gudehus (1983), Lipman & Gudehus (1989) e Gudehus & Schwarz (1985) apresentam estudos e metodologia desenvolvida para o uso de estacas em taludes com "creep".

São poucos, no entanto, os trabalhos que se referem a estacas de bambu no contexto da estabilização de taludes. Poorooshab et al. (1988) e Lima (1995) apresentam estudos experimentais e analíticos para avaliar, de forma aproximada, o efeito de estacas constituídas de bambu e uma mistura de cal e areia, para a estabilização dos

movimento de massa em taludes instáveis. Neste sistema, a mistura tem como função principal a preservação da estaca contra a deterioração orgânica para uso a longo prazo (Lima,1995). Infelizmente, no que se refere a resistência do sistema, a mistura não proporciona um ganho percentual elevado (cerca de 10%), devido a pequena magnitude do seu módulo de elasticidade.

O presente trabalho é parte de uma pesquisa ampla no DEC/PUC-Rio sobre o emprego de estacas de bambu como elementos estabilizantes em taludes. Nele, apresenta-se o desenvolvimento de uma metodologia numérica que avalia o efeito deste tipo de inclusão em um meio discretizado, por elementos finitos planos. Para tanto, implementações foram realizadas em um programa de elementos finitos já existente (Figueiredo, 1991), desenvolvido no DEC/PUC-Rio, programa este que faz uso da técnica da Relaxação Dinâmica (Otter, 1966) para resolução das equações de equilíbrio governantes.

*Mestre em Engenharia Civil, na área de Geotecnia pela PUC/Rio, onde atuou no contexto ambiental, enfocando os problemas de Escorregamento de Encostas.

* Engenheiros Cívís, Doutores em Engenharia Civil na área de Geotecnia pela University of London Inglaterra, atualmente são professores adjuntos da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC, onde atuam a nível de Graduação e Pós - Graduação

Após o desenvolvimento da ferramenta numérica foi possível realizar alguns estudos simplificados para a compreensão das condicionantes e limitações associadas a técnica do “bambu-cal”. Alguns resultados serão apresentados e discutidos a seguir.

MODELAGEM DO SISTEMA ESTACA MALHA

A interação estaca-solo constitui um problema cuja simulação numérica merece atenção especial. O problema é em princípio tridimensional. Não é ainda factível, hoje em dia, fazer uso corriqueiro de análises deste tipo. Assim sendo, a simulação do problema a duas dimensões, pelo menos de maneira aproximada, é desejável. A forma comum de se fazer esta simulação em condições de deformação plana é de determinar a espessura de uma chamada “placa equivalente” às linhas de estacas. No presente trabalho, optou-se por um tipo de implementação mais adequada ao processo de relaxação dinâmica utilizado no cálculo. Nele, o comportamento da estaca é considerado separadamente da malha de elementos finitos, que representa a massa de solo. Durante a seqüência de cálculo, os deslocamentos e rotações da estaca são compatibilizados nos elementos planos até que o sistema estaca-solo entre em equilíbrio.

A contabilização da estaca no meio discretizado deve simular o efeito reativo que a mesma exerce sobre o movimento de massa instável localizado acima de uma possível superfície de ruptura. Em termos numéricos, este efeito pode ser resumido pela determinação de um vetor de forças internas, as quais atuam contrariamente às deformações dos elementos da malha provocadas pelas forças de massa e/ou aplicadas.

Neste procedimento, proposto por Bello (1997), a estaca é incluída na análise através da determinação dos elementos da malha de elementos finitos que são atravessados por uma reta representativa da estaca. Para isto são identificados os pontos dos elementos que a estaca intercepta, como mostrado na Figura 1.

Os deslocamentos (horizontal, vertical) e rotação destes pontos de interceptação (pontos A e B da Figura 1) da estaca com a malha são determinados em função dos deslocamentos nodais que influenciam no trecho específico da estaca. Dentro do processo iterativo inerente aos cálculos na Relaxação Dinâmica, isto é feito pela matriz $[MT]$ (Equação 1). Esta matriz relaciona os dois sistemas envolvidos (estaca e elemento) através da interpolação linear dos deslocamentos horizontal e vertical dos nós que influenciam no trecho da estaca analisado, e pela média da variação angular (rotação) das arestas que concorrem para o ponto.

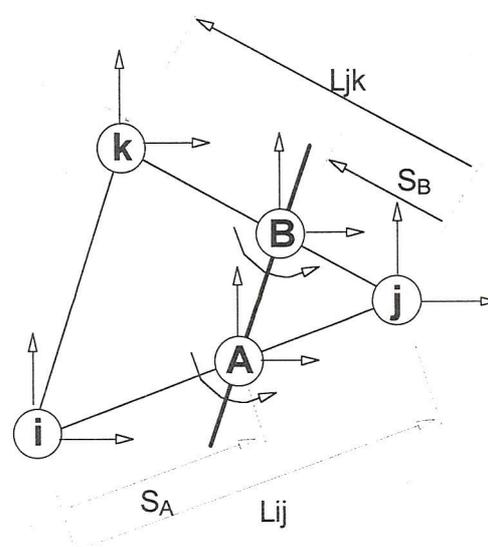


Figura 1. Elemento CST interceptado por uma estaca

$$\{u_e\} = [MT] \cdot \{u_n\} \quad (1)$$

A partir da obtenção do vetor de deslocamentos da estaca $\{u_e\}$ (6x6 - três graus de liberdade por nó), pode-se calcular as forças internas segundo a rigidez associada de um elemento de barra com um elemento de viga ($[k_e]$) (Cook et al., 1989).

A extrapolação para os nós influenciados é feito através de um processo de condensação estabelecido na Equação 2. Obtém-se desta forma um novo sistema de forças (Equação 3) que agrega tanto as informações de rigidez do meio discretizado quanto as da estaca.

$$[MT]^T \cdot \{f_c\} = [MT]^T \cdot [k_e] \cdot [MT] \cdot \{u_n\} \quad (2)$$

$$\{f^*\} = [k^*] \cdot \{u_n\} \quad (3)$$

A matriz $[k^*]$ representa a matriz de rigidez do sistema estaca-solo e o vetor $\{f^*\}$ as forças a serem transferidas para os nós do elemento finito a partir da inclusão da estaca. O efeito reativo do elemento estaca é então contabilizado através do acréscimo de uma parcela de forças internas contrárias no sistema original, sendo repetido em todos os intervalos de cálculo.

O leitor deve referir-se ao trabalho de Bello (1997) para maiores detalhes da montagem da matriz $[MT]$, bem como para resultados de exemplos de validação da formulação proposta. Estes foram alcançados através de modelagem numérica de ensaios com vigas bi-apoiadas e de resultados comparativos com as formulações, semi-analíticas, propostas por Poorooshasb et al. (1988) e Ito et al. (1981) para o emprego de estacas na estabilização de taludes.

RESULTADOS OBTIDOS

O Talude Estudado em Condições Iniciais (sem estaca)

O objetivo principal do estudo realizado é a compreensão do efeito que as inclusões de estacas de bambu exercem em um talude hipotético na iminência da instabilidade. Para isto empregou-se a geometria e as características de um talude estudado por Zou (1995) constituído de um a argila homogênea ($E = 200 \text{ MPa}$, $\nu = 0.25$, $\phi = 20^\circ$, $\gamma = 2,0 \text{ kN/m}^3$), cuja discretização em elementos finitos está apresentada na Figura 2.

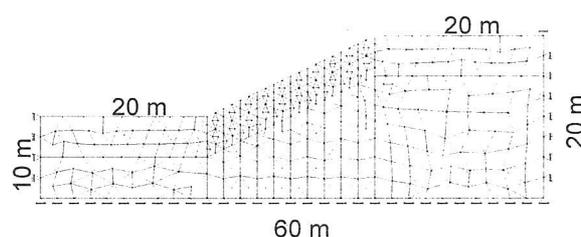


Figura 2. Talude discretizado

Inicialmente realizou-se um estudo paramétrico para estabelecer o efeito da coesão nos deslocamentos do talude, medidos pelos deslocamentos superficiais. Nesta etapa não são consideradas as estacas nas análises. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos. Pode-se perceber que a partir de 20 kPa de coesão os deslocamentos passam a ser influenciados significativamente por este parâmetro. O valor de 3 kPa é um valor crítico para o qual está associado um fator de segurança de aproximadamente 1 (Zou, 1995; Nguyen, 1985).

A possível localização da superfície de ruptura pode ser inferida da Figura 4 a qual apresenta a variação dos deslocamentos em profundidade na região central do talude para diversos valores de coesão. A superfície de ruptura parece localizar-se a aproximadamente 4 metros de profundidade.

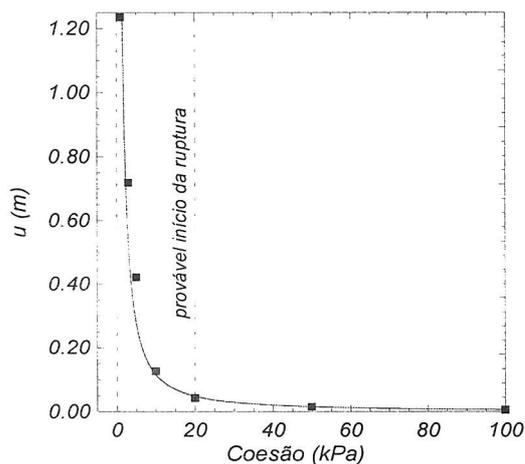


Figura 3. Efeito da coesão nos deslocamentos

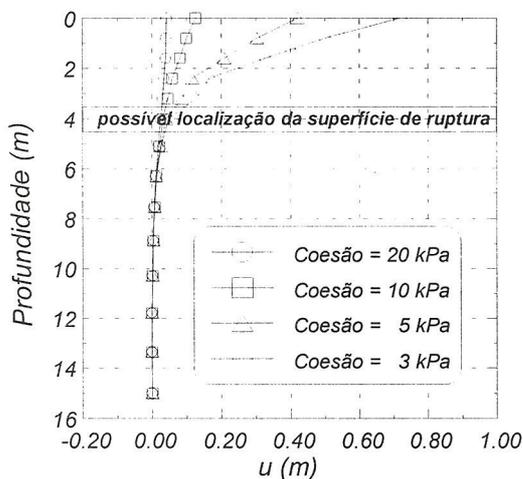


Figura 4. Variação dos deslocamentos em relação a coesão ao longo da profundidade

Uma análise por equilíbrio limite, através do método de Jambu, foi realizada revelando a mesma localização da superfície de ruptura que havia sido verificada anteriormente com a análise por elementos finitos. A Figura 5 apresenta a localização geométrica da SR no talude.

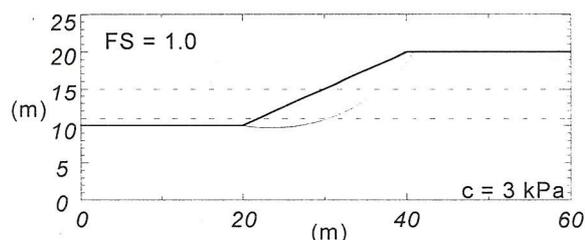


Figura 5. Localização da superfície de ruptura por Equilíbrio Limite

Efeito do número de linhas de estacas no fator de segurança

A partir da definição da geometria do talude e associação com parâmetros críticos, procurou-se observar o efeito da inclusão de linhas de estacas, dispostas desde o topo do talude até o seu pé, sobre o fator de segurança global obtido.

A Figura 6 apresenta a disposição das linhas em planta e corte. No caso, foram utilizadas estacas com 8 m de comprimento e 0,20 m de diâmetro.

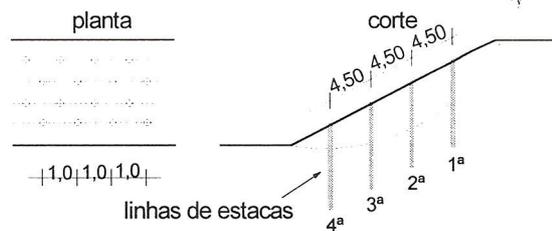


Figura 6. Disposição das estacas em linhas

O ganho percentual no FS (Figura 7) é de pequena magnitude (cerca de 11% para 4 linhas), o que equivale, aproximadamente, a um valor de coesão de 9 kPa. Apesar de reduzido, este acréscimo pode ser suficiente para garantir a estabilidade de um talude dadas as circunstâncias. É evidente no entanto a necessidade de estudos mais aprofundados para uma melhor avaliação do aumento da rigidez relativa (relação entre a rigidez e o comprimento da estaca). O aumento desta rigidez introduz variações importantes no fator de segurança (Bello, 1997). Assim sendo, deve-se

esperar uma maior eficiência das estaca para superfícies mais rasas de ruptura.

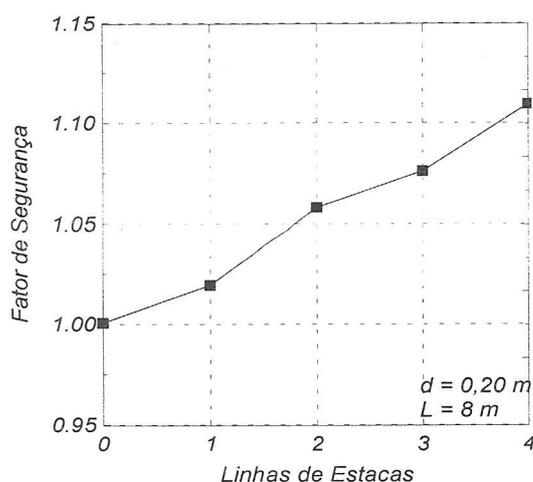


Figura 7. Efeito do número de linhas de estacas no FS

Efeito do comprimento de embutimento da estaca

Do ponto de vista financeiro é de extrema importância conceber uma estaca que apresente a maior resistência ao menor custo. Uma maneira de minorar este ônus é determinar o comprimento ótimo das estacas para a situação. Realizou-se, então, um procedimento de investigação para compreensão do efeito do comprimento da parcela da estaca inserida na camada estável de solo (comprimento de embutimento), isto é, abaixo da superfície de ruptura, nos resultados obtidos pela mesma.

Neste contexto, estudou-se a variação do comprimento de embutimento (C_e), normalizado em relação ao comprimento ativo (C_a) - acima da superfície de ruptura. Nestas análises foi introduzida uma estaca com $d = 0,20 \text{ m}$ na porção mediana do talude, isto é, com $C_a = 4 \text{ m}$.

A Figura 8 mostra a influência de C_e no fator de segurança obtido. Pode-se perceber que a partir de uma relação C_e/C_a de uma a uma vez e meia, o efeito em FS é praticamente desprezível, não se justificando embutir mais a estaca.

A Figura 9 mostra o efeito de C_e nos deslocamentos laterais encontrados (u). Pode-se

perceber que o aumento de C_e a partir de 3,5 m não apresenta alteração pontual acentuada em u .

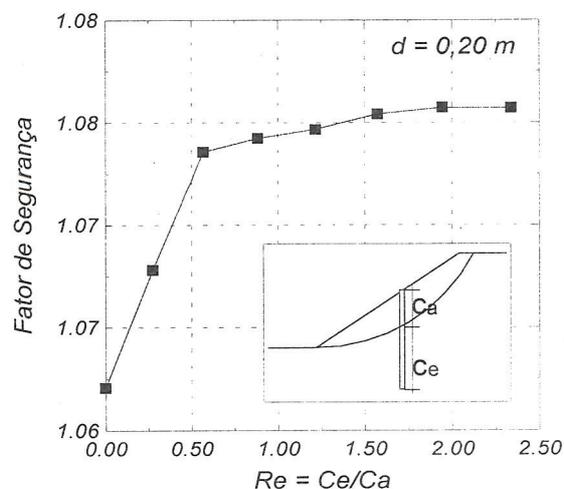


Figura 8- Efeito do embutimento no FS

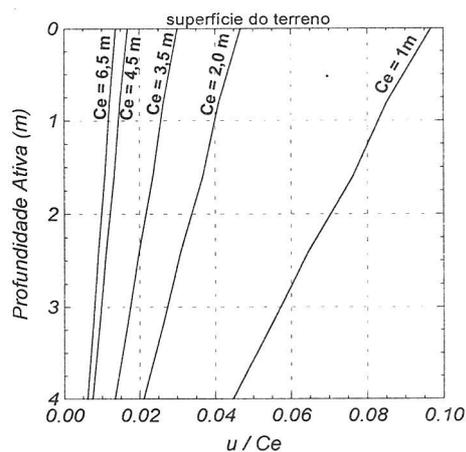


Figura 9 - Efeito do embutimento nos deslocamentos

Efeito da variação diametral

Considerando que a técnica associada ao uso do bambu como estaca prevê a retirada da região interna (septos) das peças, bem como o preenchimento da mesma com uma mistura de cal e areia, devidamente balanceada (Lima, 1995),

os resultados obtidos para uma estaca com $L=8m$.

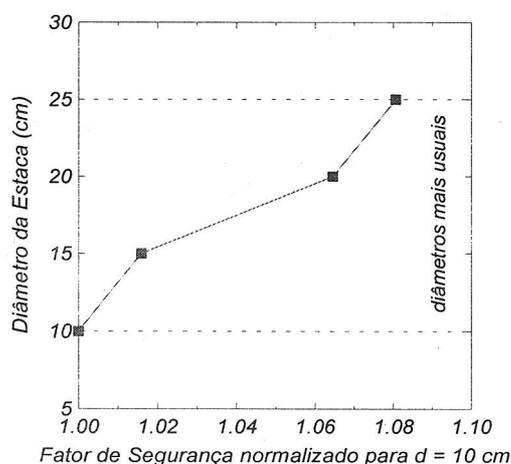


Figura 10 - Efeito do diâmetro no FS

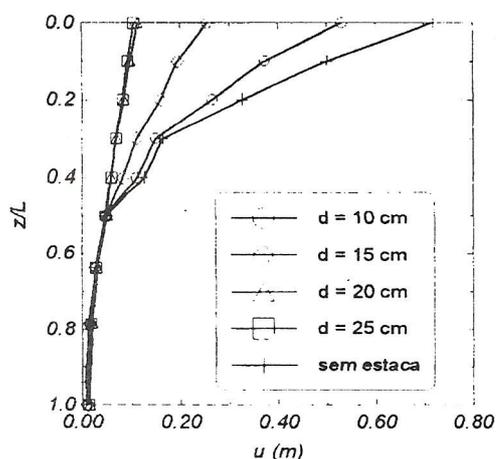


Figura 11- Efeito do diâmetro da estaca nos deslocamentos

Na Figura 10 observa-se que o efeito da variação do diâmetro não apresenta muita influência para uma linha de estacas, mostrando-se mais evidente na Figura 11 em termos de deslocamentos horizontais calculados, onde percebe-se o inadequado uso de peças com diâmetros muito reduzidos devido a sua grande esbeltez no problema.

A justificativa pela pequena variação dos valores obtidos pode ser dada devido ao aumento do diâmetro causar conseqüente acréscimo na área ocupada pela mistura de cal e areia, que apresenta módulo de elasticidade muito pequeno (cerca de 20 MPa), não contribuindo em nada na resistência final.

CONCLUSÃO

O trabalho apresentou uma técnica especial para a introdução em uma análise plana de um talude por elementos finitos, de estacas de bambu. Apresentou, também, resultados de análises em um talude hipotético utilizando o procedimento desenvolvido. No exemplo exposto, o ganho percentual alcançado pela inclusão de algumas linha de estacas obtido não foi expressivo. Isto pode ser explicado devido ao fato de estar-se empregando na análise peças de grande comprimento, configurando uma esbeltez elevada e alta susceptibilidade de deformações devido aos esforços fletores. Isto, de certa forma, pode ser compreendido como indicação de limitação no uso desta técnica, apresentando-se mais indicada para o uso em casos onde haja superfícies mais rasas de escorregamento, onde se possa empregar peças de comprimento mais reduzido. Associado a esta conclusão, indica-se um comprimento de embutimento na camada mais firme de cerca de uma vez a uma vez e meia o comprimento da camada ativa. O efeito da variação diametral nos resultados apresentados somente será de extrema relevância se for possível utilizar-se uma mistura protetora com um módulo de elasticidade mais elevado que possa coadjuvar na rigidez do sistema bambu-cal.

Finalmente, pode-se dizer que a técnica do bambu-cal pode ser empregada no contexto Geotécnico. Entretanto, a sua aplicação está limitada a casos cuja quantidade de massa de solo envolvida não é demasiadamente expressiva. Nesses casos, a sensibilidade do engenheiro projetista é peça chave para o sucesso do empreendimento. A cidade do Rio de Janeiro

apresenta inúmeros locais, em especial favelas cujo espaço disponível para a realização de obras de contenção é reduzido ou é impossível a retirada das habitações, que agrega condições ideais para o emprego da técnica. Muitos dos casos de escorregamentos observados nesses locais apresentaram superfícies de ruptura rasas. Pesquisas, atualmente em andamento na UNAMA, deverão produzir resultados futuros mais esclarecedores com relação à técnica discutida neste trabalho e sua aplicabilidade no contexto regional. No Pará o emprego do bambu-cal estaria afeto, por exemplo, a indústria da mineração e em canais da obra de macrodenagem.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BELLO, L. A. L. *Estudo numérico sobre o uso de estacas de bambu-cal na estabilização de encostas*. Rio de Janeiro: DEC/PUC, 1997. (Dissertação de Mestrado)
- BROMS, B. B. **Stability of Flexible Structures (Piles and Pile Groups)**. *Proc. 5th Eur. Conf. Soil Mech. Fndn. Eng.*. Madrid, vol. 2, 1972. P. 239-269.
- COOK, R. D.; Malkus, D. S.; Plesha, M. E. 1989. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. 3rd ed John Wiley & Sons - 113 - 114, 215 - 216.
- FIGUEIREDO, R. P. *Aplicação da técnica de relaxação dinâmica à solução de problema geotécnicos*. Rio de Janeiro: DEC/PUC, 1991. Dissertação de Mestrado. p.13 - 17.
- GUDHEUS, G.; Schwarz, W. **Stabilization of Creeping Slopes by Dowels**. *Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Fndn. Eng.*, vol. 3, 1985. 1697-1700
- ITO, T.; Matsui, T; Hong, W. P. **Design Method for Stabilizing Piles Against Landslide - One Row of Piles**. *Soils and Foundations*. Vol. 21, 1, 1981. p. 21-36.
- ITO, T.; Matsui, T; Hong, W. P. **Extended Design Method for Multi-Row Stabilizing Piles Against Landslide**. *Soils and Foundations*. V. 22, nº. 1, 1982. 1-13.
- LIMA, R. R. S. *Estudo sobre o uso de bambu como técnica alternativa de estabilização de encostas*. Rio de Janeiro: DEC/PUC, 1995.(Dissertação de Mestrado).
- LIPPMANN, R.; Gudehus, G. **Dowelled Clay Slopes: Recent Examples**. *Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech Fndn. Eng.*, V.2, p.1989.1269-1272.
- NGUYEN, V. U. **Determination of critical slope failure surfaces**. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, v.111, 1985. 230-251.
- OTTER, J. R. H; Cassel, A. C.; Hobbs R. E. **Dynamic relaxation**. *Proc. Instn. Civ. Engrgs*. V. 35, 1966. P. 633-665.
- POOROOSHASB, H. B.; Azevedo, R; Ghavami, K. **Analysis of slopes reinforced with bambo dowels**. *Int. Geo. Sym. on Theory and Practice of Earth Reinforcement*. Fukuoka, Japan, p. 1988. 196-201.
- ZOU, J; Wiliams, D. J; Xiong, W. **Search for Critical Slip Surfaces Based on Finite Element Method**. *Can. Geotech. J.*v. 32, 1995, p. 233-246
- WINTER, H.; Schwarz, W; Gudehus, G. **Stabilization of Clay Slopes by Piles**. *Proc. 8th Eur. Conf. Soil Mech. Fndn. Eng.*, v. 2, 1983. p.1269-1272.