

ESTABILIZAÇÃO DE MURO EM SOLO REFORÇADO – ESTUDO DE CASO

STABILIZATION OF A GEOTEXTILE REINFORCED WALL – CASE STUDY

Dell'Avanzi, Eduardo, *Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, Brasil, avanzi@ufpr.br*
Nascimento, Ney. A., *Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, Brasil, neyan@ufpr.br*
Tosta da Silva, Ernesto, *Tosta da Silva Engenharia, Curitiba-PR, Brasil*

RESUMO

Estruturas de contenção em solos reforçados têm sido apresentadas como soluções extremamente interessantes de serem empregadas, em especial do ponto de vista econômico. A percepção de bom desempenho em vista da facilidade executiva, aliada ao forte apelo comercial, induz um engenheiro menos experiente ao falso senso da dispensa de projeto geotécnico detalhado para a segurança necessária. Embora em alguns casos o sucesso da obra não adequadamente projetada possa ter sido aparentemente alcançado, isto não é regra. Apresenta-se neste trabalho um estudo de caso sobre muro em solo reforçado que atingiu estado de equilíbrio limite. Fatores intervenientes no processo de instabilização são discutidos, análise de reforço é realizada e solução estabilizadora apresentada.

ABSTRACT

Geotextile reinforced walls have been presented as an interesting designing alternative for retaining structures layout, specially, considering economical aspects. The perception of satisfactory performance before the construction procedure feasibility, allied to the strong commercial appeal of the geosynthetic industry, can lead inexperienced engineers to the false cense of non-necessity of a detailed geotechnical design in order to ensure the proper degree of safety of the retaining structure. Although in some cases this performance success can be achieved apparently, this is not the rule. The paper presents a case study about a geotextile reinforced wall, not properly designed, that yielded limit equilibrium. The intervenient factors that lead to the instabilization process observed are discussed, the stability analysis considering soil reinforcement are presented, and the reclamation solution necessary to stabilize the wall is shown.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de muros reforçados com geossintéticos como solução de engenharia para situações nas quais a construção de aterros é necessária tem crescido consideravelmente nos últimos anos. Quer seja pela rapidez de execução, reduzida complexidade técnica executiva ou pelo apelativo baixo custo financeiro quando comparado à outras alternativas de projeto, as estruturas em solo reforçado têm sido empregadas gradativamente em um espectro de obras de engenharia envolvendo aterros para edificações residenciais ou comerciais.

Dentre as diversas metodologias de dimensionamento desenvolvidas para este tipo de estrutura (e.g. Broms 1978; Lee et al. 1973; Koerner 1998) a comumente adotada envolve a avaliação da estabilidade interna e externa da estrutura, considerando fatores de segurança mínimos quanto à ruptura da fundação, tombamento, deslizamento, e estabilidade global da estrutura quanto à superfícies potenciais de ruptura passando em parte pela massa de solo reforçado, em parte pelo maciço de solo *in loco*. Visando considerar efeitos de fluência, danos por instalação, alterações

químicas e ataques biológicos sobre os reforços geossintéticos, adota-se, para efeito de projeto, o critério de resistência de trabalho do geossintético. Objetiva-se com isto, garantir o desempenho com segurança da estrutura em solo reforçado à longo prazo (em geral, 30 anos). Esta resistência, calculada a partir da divisão produtória de fatores de redução parciais para a fluência e demais efeitos potencialmente nocivos (Koerner 1998), atinge em geral, valores da ordem de 1/4 a 1/6 da resistência última à tração do geossintético adotado. A estimativa preliminar de espaçamento entre camadas de reforço é realizada considerando-se uma distribuição vertical de tensões horizontais na massa de solo avaliada no estado ativo para o efeito do peso próprio do solo, e no repouso para o efeito de sobrecargas acidentais ou permanentes (Koerner 1998, Elias et al. 2001). Para fins de layout final da estrutura em solo reforçado, o espaçamento entre reforços bem como o comprimento necessário de ancoragem devem ser definidos somente após a análise da estabilidade global do conjunto objeto de análise, considerando superfícies potenciais de ruptura passando parcialmente pelo solo reforçado. O projeto executivo de uma obra em solo reforçado envolve, obrigatoriamente, a definição do tipo e do procedimento de compactação do material de retroaterro, procedimentos de controle e garantia da qualidade de execução, incluindo detalhamento de sistemas de drenagem e monitoramento da estrutura. Embora de fácil execução, as estruturas em solo reforçado necessitam de uma supervisão rigorosa no campo, pois o desempenho deste tipo de estrutura depende fundamentalmente da qualidade do processo executivo adotado.

O objetivo principal do presente trabalho é apresentar e discutir o estudo de caso sobre os fatores indutores do processo de instabilização de um muro em solo reforçado construído na cidade de Curitiba, estado do Paraná, Brasil. O objetivo secundário é apresentar a solução de engenharia necessária para a estabilização do muro de modo a garantir a segurança do local.

2. DESCRIÇÃO DO LOCAL E HISTÓRICO

O local objeto de estudo é um terreno em talude localizado ao longo de uma encosta natural com declividade variando de 20% próximo à rua de acesso, à 80% na região de sopé do talude. O desnível original do terreno, compreendido entre o nível da rua de acesso ao lote e à divisa do terreno é da ordem de 11m de altura. O formato em planta do terreno assemelha-se a um trapézio irregular. Os lados paralelos maior e menor deste trapézio medem, aproximadamente, 27m e 22m de comprimento respectivamente. O comprimento do lado perpendicular aos lados paralelos do trapézio é aproximadamente igual a 30m. O lado irregular do trapézio é formado por um segmento com comprimento aproximado igual a 35m. As divisas de fundos e lateral são caracterizadas por áreas não edificantes, com a presença de um curso d'água perene, distante 8m horizontalmente da divisa do terreno. Visando a construção de uma residência multipavimentos em seu interior, foi projetado originalmente, um talude em solo reforçado com 9m de altura. Visando proporcionar melhores acessos laterais, foi requisitado posteriormente ao consultor, uma transição do talude em solo reforçado para um muro em solo reforçado no terço superior do talude. Dessa maneira, a concepção final de projeto ficou constituída por um talude em solo reforçado com ângulo de inclinação aproximado igual a 50°, subjacente a um muro em solo reforçado de face vertical com 3,5m de altura (Figura 1). O sistema talude-muro foi executado conforme projeto e orientações do consultor. Subsequentemente, iniciou-se a construção da residência com 3 pavimentos, sendo esta locada a aproximadamente 4m da crista do muro em solo reforçado. Algumas semanas após o início da construção da residência, o engenheiro responsável pela obra observou o início de formação de trincas na massa de solo paralelas à crista do muro (Figura 2). Chamado à obra para uma inspeção, o consultor do projeto considerou as trincas como resultado da expansibilidade do solo usado como material de retroaterro. Posteriormente, com mais indícios de instabilização do conjunto muro-talude, os autores do presente artigo foram chamados para assim analisarem a situação.



Figura 1 - Vista geral da região objeto de estudo



Figura 2 - Detalhe da região instabilizada

3. AUDITORIA DO PROJETO ORIGINAL

Segundo Skinner e Anderson (1975), dentre os objetivos de um processo de auditoria existem os relacionados à confirmar a ausência de erros, detectar a existência de um erro suspeito, ou medir a extensão de um erro conhecido. Aplicado à engenharia, o processo de auditoria envolve, portanto, o entendimento e verificação de todas as etapas de desenvolvimento do projeto original. Não obstante, isto significa coleta de amostras, ensaios de laboratório e de campo, inspeção de campo, re-análises e retroanálises para verificação dos procedimentos de projeto adotados, bem como da comprovação da acurácia das hipóteses assumidas durante a materialização do projeto no campo.

3.1. Auditoria da Concepção Original

O projeto indicava, na sua concepção original, camadas de reforço com 4m de comprimento. Segundo o memorial de projeto, as camadas de solo compactado deveriam ser executadas com 13 cm de espessura., utilizando-se tecido de polipropileno e solo com ângulo de atrito interno igual a 28°. Na transição do talude em solo reforçado para o muro vertical, foi previsto a execução de um colchão drenante em areia para possibilitar a drenagem da porção superior da estrutura de contenção. O memorial do projeto original não continha ensaios de laboratório para definição das características do material de retroaterro nem do talude natural, bem como a ausência total de informações sobre a composição do subsolo da região. A análise das informações contidas no projeto original indicou que a concepção do projeto focou somente na verificação da estabilidade interna da estrutura, não se atentando para a estabilidade do conjunto muro – talude – encosta natural, bem como para os aspectos hidro-geológicos peculiares da região.

Devido à ausência total de informações à respeito, o perfil do subsolo admitido como representativo da região objeto de estudo foi estimado baseando-se em uma campanha de sondagens de simples reconhecimento realizada à pedido da equipe técnica de auditoria. Ao todo, foram executados 7 furos de sondagem à percussão, sendo 4 localizados na região de crista e 3 na região de sopé. Basicamente, o subsolo da região é composto por uma camada de aterro argilo-arenoso marrom mole (índice médio de resistência à penetração de amostrador padrão - N_{SPT} - igual a 2 golpes) com espessura variando entre 5 e 6 m, sobrejacente a uma camada de aterro silto-argiloso amarelo mole a médio (N_{SPT} variando entre 3 e 10 golpes), com espessura entre 4 e 5 m. Subjacente à camada de aterro silto-argiloso amarelo, os boletins de sondagem indicaram a presença de uma camada de silte argilo-arenoso variegado (coloração variando entre marrom e amarelo) com espessura variando entre 4 m e 5 m, e consistência variando gradativamente de média à rija (N_{SPT} igual a 10 golpes). Abaixo desta camada, as sondagens indicaram a presença de um silte arenoso de coloração amarela a cinza muito compacto (N_{SPT} superior a 20 golpes), com 4m de espessura média até o limite da sondagem. Em geral, o posicionamento do nível d'água (NA) observado nas sondagens indica que o lençol freático na região acompanha aproximadamente a topografia superficial original do terreno.

As características geológico-geotécnicas tais como composição granulométrica, peso específico aparente, parâmetros de resistência ao cisalhamento e de deformabilidade dos solos superficiais do local objeto de estudo também foram determinadas em laboratório à pedido da equipe técnica de auditoria. As amostras ensaiadas foram obtidas a partir de dois blocos indeformados coletados, um na região de crista do muro, e outro na região do sopé do talude reforçado. Ambos os blocos foram coletados na região da massa de solo instável. Devido às condições limites em que se encontrava o local, optou-se pela realização de ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas inundadas. A velocidade de cisalhamento adotada foi definida de modo a proporcionar o cisalhamento das amostras sob condições drenadas. Devido a ausência de amostragem indeformada dos solos das camadas mais profundas, as características

geológico-geotécnicas dos solos componentes destas camadas subjacentes descritos na seção – tipo da região objeto de estudo foram arbitradas empiricamente baseando-se em literatura publicada contendo parâmetros de solos observados em situações similares (Kormann et al. 1999, Massad et al. 1992, Massad 1994, Giacheti et al. 1993). Os valores adotados estão em acordo com intervalos de magnitude destes parâmetros publicados em literatura consagrada (e.g. Lambe e Whitman 1979). Apresentam-se no Quadro 1, os valores dos parâmetros avaliados e/ou arbitrados dos solos considerados nas análises.

Quadro1- Parâmetros de caracterização dos solos de interesse

Solo	Parâmetro de Interesse			
	γ_{nat}	γ_{sat}	ϕ	c
	(kN/m ³)	(kN/m ³)	graus	kPa
Aterro Argila Arenosa Marrom mole (avaliado)	17.0	17.5	20.0	7.0
Aterro Silto-argiloso mole a médio amarelo (avaliado)	17.0	17.5	24.0	18.0
Silte arenoso compacto amarelo (colúvio) (bibliografia)	17.0	17.5	25.0	18.0
Silte arenoso cinza (bibliografia)	16.0	17.0	22.0	30.0

A estabilidade global da solução implementada foi avaliada utilizando-se o método de Bishop Simplificado, baseado no princípio de equilíbrio limite bi-dimensional da massa potencial de instabilização. Utilizou-se o programa de computador *PC-Stable* versão 6M, desenvolvido pela Purdue University (EUA). O programa permite a pesquisa da superfície potencial de ruptura com menor fator de segurança através da geração sucessiva de diversas superfícies potenciais. Os parâmetros de resistência de solo utilizados nas análises de estabilidade são os apresentados no Quadro 1. A contribuição da presença de pessoal e equipamentos leves de apoio situados na região da crista do talude foi computada pela imposição de uma sobrecarga distribuída superficial de magnitude igual a 10 kN/m². A presença da residência foi incluída através da consideração de uma sobrecarga superficial igual a 40 kN/m² (hipótese de radier flexível). As re-análises da solução implementada incluíram a estimativa da segurança da seção-tipo do local objeto de estudo considerando diferentes cenários, tais como geração de poropressão (pela consideração de um fator r_u igual a 0,1), resistência dos tecidos geossintéticos à curto prazo e longo prazo, e o efeito do nível d'água empoleirado devido a barreira capilar. Tal consideração foi necessária pois, durante inspeção ao local, observou-se fluxo de água na camada de solo argiloso posicionada acima da camada de areia projetada como um colchão drenante (Figura 3). Tal fato foi provavelmente ocasionado pela indução do efeito de barreira capilar no contato argila-areia (Lu e Likos 2004). Este efeito é o resultado das diferenças substanciais nas magnitudes das condutividades hidráulicas não saturadas dos solos envolvidos. Até que se quebre a barreira capilar induzida pela baixa condutividade hidráulica da areia não saturada, a água infiltrada nas camadas superiores de argila tende a ficar retida próximo ao contato areia-argila. Dependendo do volume de água retido junto à barreira capilar e da distância a um bordo de drenagem, o fluxo horizontal de água como o observado é plausível. Não foi considerado nos cenários o efeito da presença das trincas de tração na região do retroaterro.

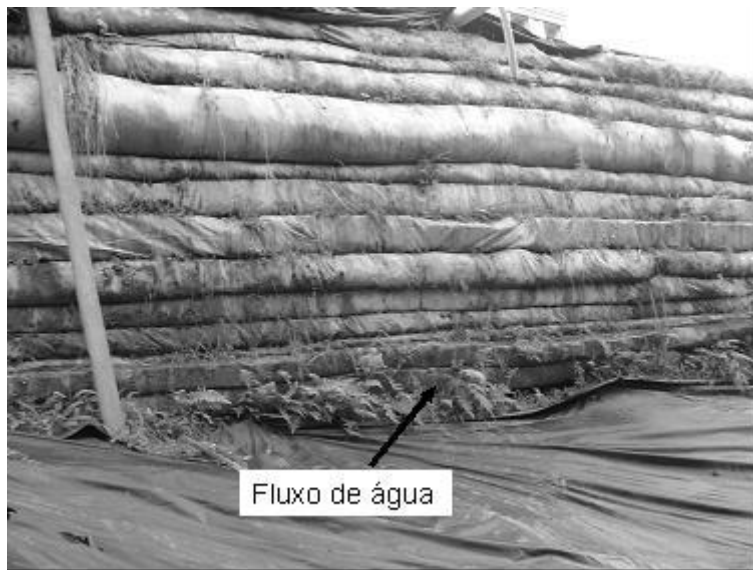


Figura 3 – Vista frontal da região do muro com fluxo de água no contato camada de areia-camada de argila

Apresentam-se na Figura 4, os resultados típicos de estabilidade de um dos cenários avaliados. De maneira geral, todos os cenários analisados indicaram fatores de segurança consideravelmente menores que 1 com localização das superfícies potencialmente críticas de ruptura posicionadas na mesma região de localização do processo de instabilização observado no campo. A magnitude de fator de segurança consideravelmente menor que 1 (FS_{min} igual a 0.845) indica que o risco de ruptura sempre foi iminente. Analisando a Figura 4, observa-se que a superfície crítica de ruptura praticamente não passa pela região do reforço, indicando que os comprimentos de reforço adotados foram inferiores aos mínimos necessários para garantia da estabilidade da estrutura a níveis de segurança compatíveis com os prescritos por norma brasileira competente. De modo geral, o procedimento de auditoria indicou que a estrutura em solo reforçado apresentava-se instável na sua concepção.

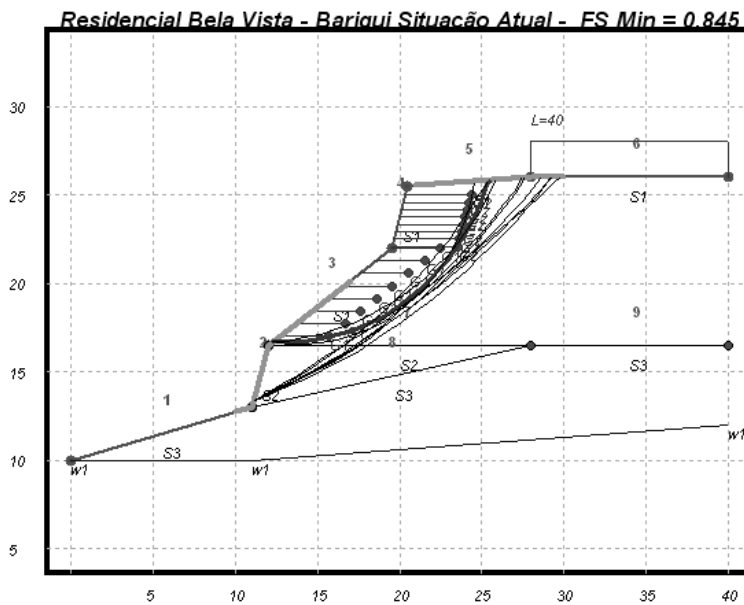


Figura 4 – Resultados da análise de estabilidade do projeto implementado

3.2. Auditoria do Processo Construtivo

A auditoria do processo construtivo deteve-se nos procedimentos de execução e de controle de compactação do material de retroaterro adotados. Pela Figura 3 pode-se notar que a distância entre camadas de reforço não possui uniformidade de espessura compactada. As camadas de reforço possuem espessuras consideravelmente diferentes, variando de 15 cm a aproximadamente 60 cm. Tal variabilidade na espessura das camadas influi consideravelmente no desempenho de estruturas em solo reforçado, principalmente pela supressão de camadas de reforço. Amostrado em diversos locais ao longo da crista, observou-se que o material constituinte do retroaterro possui uma alta variabilidade na sua composição, alternando presença de argilas cinzas amareladas provavelmente provenientes de depósitos de argila expansivas da formação Guabirotuba (Duarte 1999, Kormann 2002) à areias siltosas. Segundo informações do engenheiro responsável pela obra, não foram executados previamente ao início das obras do muro, ensaios de compactação com os solos a serem utilizados no retroaterro. Deste modo, a execução do muro foi realizada sem controle da constituição do material de compactação, da umidade de lançamento, e do grau de compactação alcançado. Somente foi observado o comprimento de manta prescrito em projeto, sendo o resto relegado à experiência profissional adquirida em obras anteriores. De modo geral, a auditoria do processo construtivo indicou que a situação de instabilidade foi agravada pela falta de definição de materiais apropriados para utilização no retroaterro, bem como na limitada supervisão técnica que possibilitou a execução de camadas de reforço com espessuras consideravelmente superiores às especificadas no projeto original.

4. PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO DO ATERRO EM SOLO REFORÇADO

O projeto de estabilização do aterro em solo reforçado visou o incremento dos níveis de segurança da região aos níveis prescritos pelas Normas Brasileiras NBR-11.682/91 (estabilidade de taludes) e NBR-6122/96 (fundações) para situações de alto grau de segurança. Nesta etapa, consideraram-se os seguintes fatos: (a) a fundação da residência é constituída por estacas parcialmente armadas inseridas em sua totalidade na massa de aterro compactado; (b) a alta variabilidade do material de constituição do aterro; (c) a inclinação considerável do sopé do talude natural nas proximidades do curso d'água; (d) presença de uma tubulação de esgoto sanitário ao longo da base do talude em solo reforçado, executada após a construção da estrutura de contenção. Dentre as diversas alternativas de estabilização estudadas, a solução que se apresenta mais apropriada tecnicamente foi a utilização de 3 linhas de tirantes ativos aliados a uma cortina de estacas injetadas a serem executadas entre o sopé do talude em solo reforçado e a tubulação de esgotamento sanitário. Isto se deve as seguintes considerações: (a) as estacas de fundação da casa estão inseridas totalmente na região do aterro, transferindo totalmente as cargas da superestrutura para massa do aterro. Neste caso, qualquer descompressão lateral da massa do aterro devido à ruptura do talude lateral, poderá induzir a uma diminuição considerável da capacidade de suporte das fundações próximas à região instável; (b) sendo as estacas de fundação não armadas totalmente em seu comprimento, a capacidade de suporte à esforços horizontais do elemento estrutural torna-se limitada. Portanto, os esforços horizontais potenciais de serem alcançados pela eventual ruptura do talude lateral poderão induzir à ruptura das estacas de fundação ao longo do comprimento não armado; (c) o potencial de instabilização da base do aterro devido a execução de novas escavações para manutenção ou ampliação da linha de esgotamento sanitário, ou ainda, instalação de outras tubulações é alto e não deve ser negligenciado.

5. CONCLUSÕES

Foram apresentados e discutidos os aspectos técnicos relativos ao processo de instabilização de um aterro em solo reforçado construído para servir de base à uma residência de 3 pavimentos.

Devido à instabilização observada do aterro, uma auditoria do projeto foi executada afim de identificar os possíveis erros cometidos e respectiva influência no problema. Do exposto acima, pode-se dizer:

- O projeto executivo de uma estrutura em solo reforçado não pode ser baseado somente nas análises da estabilidade interna e externa da estrutura supondo um solo hipotético. Este deve envolver, obrigatoriamente, a definição criteriosa do material de retroaterro, incluindo as características de resistência e deformabilidade do mesmo, avaliadas considerando um critério executivo definido (umidade de lançamento, grau de compactação mínimo, e respectivos desvios-padrão). O rigoroso controle executivo é fundamental para o sucesso do projeto;
- O projeto de uma estrutura em solo reforçado não pode prescindir das análises de estabilidade global da estrutura, incluindo a avaliação da hipótese de superfície de ruptura passando parcialmente pelos reforços. Caso este procedimento tivesse sido adotado, os comprimentos das mantas, necessários à estabilidade da concepção original de projeto, poderiam ter sido ajustados de modo a evitar-se a situação de instabilização ocorrida;
- É necessário considerar a situação de não saturação dos solos a serem empregados como material de retroaterro e filtro, principalmente quanto ao potencial de indução do efeito de barreira capilar com conseqüente diminuição da eficiência de drenagem.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). NBR-11682/91 *Estabilidade de Taludes*. ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 6122 – *Projeto e execução de fundações*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Broms, B.B. (1978). "Design of fabric reinforced retaining structures", *Proc. Symp. Earth Reinforcement*, Pittsburg, PA – ASCE, 282-303.
- Duarte, J.M.G. (1999). A resistência residual dos solos da formação Guabirotuba e sua importância na estabilidade de taludes. *In Proc. Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba*, 77-92, ABMS-PR
- Elias, V., Christopher, B.R. e Berg, R. (2001). Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design and construction guidelines, *FHWA-SA-96-071 Publication*, Springfield, Virginia, EUA.
- Giacheti, H.L., Röhm, S.A., Nogueira, J.B., Cintra, J.C.A. (1993). Propriedades Geotécnicas do Sedimento Cenozóico. *Solos do Interior de São Paulo*, 145-178, ABMS, São Paulo.
- Koerner, R.M. (1998). *Designing with geosynthetics*. 4th edition. Prentice Hall Editors.
- Korman, A.C.M., Chamecki, P.R., Bozczowski, R.B., Borga, P.C., Nascimento, N.A. (1999). Ensaio de cisalhamento direto em argila rijá da formação Guabirotuba: influência da velocidade de deslocamento. *Solos da Formação Guabirotuba*. 29-36, ABMS Curitiba.
- Kormann, A.C.M. (2002). Comportamento geomecânico da formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório. Tese de doutorado – USP, pp.429
- Lambe, W. e Whitman, R. (1979). *Soil mechanics – SI Version*. John Wiley e Sons, NY, USA
- Lee, K.L., Adams, B.D., e Vagneron, J.M.J. (1973). "Reinforced earth retaining walls", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, 99, SM10, 745-764.
- Lu, N. e Likos, L. (2004) *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley e Sons, N.Y.
- Massad, F. (1994). Propriedades dos Sedimentos Marinhos. *Solos do Litoral de São Paulo*. 99-128, ABMS São Paulo.
- Massad, F., Souza Pinto, C., Nader, J.J. (1992). Resistência e Deformabilidade. *Solos da Cidade de São Paulo*, 141-179, ABMS São Paulo.
- Skinner, R.M. e Anderson, R.J. (1975). *Auditoria Analítica*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, Brasil.