

- JOHNSON, R. B. ; DE GRAFF, J.V. *Principles of Engineering Geology*. New York : John Wiley e Sons, 1988. 497 p.
- KIRKBY, M.J. Modelling water erosion process. In: KIRKBY, M. J. ; MORGAN, R. P. C. *Soil erosion*. 1980. p.183-216.
- KNAPP, B.J. Infiltration and storage of soil water. Cap. 2, In: KIRKBY, M. J. *Hillslope Hydrology*, John Wiley & Sons: 1978. p.43-68, 389p.
- LIMA, C. C. de ; VIVIERS, M. C. O Grupo Barreiras na Bacia Potiguar: relações entre o padrão de afloramento, estruturas pré-barreiras, e neotectonismo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, (36.: 1990 : Natal) *Anais...*, Natal, 1990. p. 607-620.
- MELLO, V. F. B. ; TEIXEIRA, A. N. *Mecânica dos solos*. São Paulo : Escola de Engenharia de São Carlos - USP, v.1, 1971. 205 p.
- MOHR, O. Über die Darstellung des Spannungszustandes eines Korpelements. *Zwil. Ingenieure*, v. 28: 113-156.
- MORGAN, R. P. C. Soil degradation and erosion as a result of agricultural practice. In: RICHARDS, R. R. ARMET ; ELLIS, S. *Geomorphology and soil*. London : George Allen and Unwin, 1984. p.370-395.
- NUNES, V. M. ; CASTRO JR., E. ; COELHO NETTO, A. L. Bioporosidade e infiltração em solos florestados: o papel da fauna endopodônica. In: SIMPÓSIO GEOG. FÍSICA APLICADA (4.: 1991) *Anais...* 1991.
- OLIVEIRA, L. M. DE ; RIBAS, S. M. *Caracterização do meio físico urbano de Guaraqueçaba*. Guaraqueçaba : Convênio Mineopar/Ibama/Prefeitura Municipal de Guaraqueçaba, 1993. 27 p., anexos, (inédito).
- ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. *Guide to hydrometeorological practices*. Genebra : WMO Technical Publ. 23, 1971.
- ORTIGÃO, J. A. R. *Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos*. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, 1993. 368 p.
- RICCOMINI, C. ; PELOGGIA, A. U. G. ; SALONI, J. C. L. ; KOHNKE, M. W. & FIGUEIRA, R. M. Neotectonic activity in the Serra do Mar rift system (southeastern Brazil). *J. South American Earth Sciences*, v.2, n.2, p.191-197. 1989.
- ROGÉRIO, P.R. *Cálculo da estabilidade de taludes de terra pelo método de Bishop simplificado*. São Paulo : Edgard Blücher, 1977. 153p.
- ROSAS, R. O. *Formação dos solos em ambiente montanhoso florestal*: Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro, 1991. Tese de mestrado, PPGG-UFRJ, 100p.
- ROUSE, C. The mechanics of small tropical flowslides in Dominica, West Indies. *Engineering Geology*, v.29, p.227-239. 1990.
- SKEMPTON, A.W. ; LEADBEATER, A. D. ; CHANDLER, R. J. The Mam Tor Landslide, north Derbyshire. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A329, p. 503-547. 1984.
- SOARES, P. C. ; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, v.16, n.32, p.71-104. 1976.
- STOCKING, M. A. Rainfall erosivity in erosion: some problems and applications. *Research discussion paper*, v.13, University of Edinburgh, Dept. Geography, 29p. 1977.
- TAYLOR, D.W. Stability of earth slopes. *J. Boston Soc. Civil Engrs*, v.24, p. 197-246. 1937.
- TERZAGUI, K ; PECK, R.B. *Soil mechanics in engineering practice*. 2nd ed. New York : Wiley International Edition, 1967. 729p.
- USSELMANN, P. Comments. *Rev. Geomorph. Dyn.*, v.18, n.4, p.151-152. 1968.
- VAN GENUCHTEN, P. M. B. ; NIEUWENHUIS, J. D. On the stability of sesonally sliding soil mass in the French Alps. *Engineering Geology*, v.28, p.41-69. 1990.
- VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo : MacGraw-Hill do Brasil, 1978. 509 p.
- WHIPKEY, R. Z. *Storm runoff from forested catchments by surface routes*. Proceed of the Leningrado Symp. on Floods and their Computation Gent, Belgica Int. Assoc. Hydrological Sciences: 1967. p.773-779.

Estudo Da Estabilidade De Vertentes Da Área De Guaraqueçaba, Paraná

Study of Slope Stability in the Guaraqueçaba Area, Paraná State, Brazil

Alberto Pio Fiori*

RESUMO

O objetivo principal do presente trabalho é apresentar um estudo de fatores de segurança na análise da estabilidade de vertentes de área de Guaraqueçaba, litoral paranaense. Foram investigados três diferentes fatores de segurança, em função da presença ou não de água nas vertentes e superfície de ruptura plana. O mapa de risco foi elaborado em função do fator de segurança mais significativo, tendo-se cartografado diversos intervalos de segurança, levando-se em conta a natureza do solo, se coluvial ou residual.

ABSTRACT

The selected area for this study is located in the Paraná coastal plain, at the northern border of the Paranaguá Bay, in the Guaraqueçaba township. (figure 1) The area may be divided into two different geomorphological domains. The first one is characterised by a landscape in which very gentle slopes and floodplains, dominate and the second one is characterized by steep slopes and a typical mountain relief of the "Serra do Mar" mountain system. Successive layers of recent sediments brought from the land and distributed and accumulated by water currents are the main geological features of the first domain. In the second one, gneisses and migmatites largely dominate over interlayered schists. In the mountain domains, soils are residual, derived through weathering of the rocks from beneath. Colluvial soils accumulate at the slope base to form colluvium ramps. (figure 2)

In its equilibrium-limit condition, when the safety factor (Fs) is equal to unity and, in the case in which the soil cohesion (c) is zero, the angle (i) between the slope and the horizontal is equal to or smaller than the angle of internal friction(ϕ). In this case, the (ϕ) angle can be obtained by comparison with the (i) angle at the sites where evidences of new or old slides were found. We prefer to call this angle "angle of natural internal friction (ϕ)" so as not to be confused with the (ϕ) angle that can be obtained in laboratory. (figure 3)

The determination of the (ϕ) angle with the help of a topographic map can be performed by taking the horizontal (D) and the vertical distance (H) in the sites where sliding had occurred from the point where the slide occurred up to slope base, in the direction of maximum slope. The ratio H/D is equal to the tangent of (i). The (ϕ), determinated by linear regression, in the studied area was equal to 27° for residual, and 22° for colluvial soils. (figures 4 and 5)

* Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.

Three different factors of safety against sliding risk were calculated, considering the presence or not of water on the slope, and a plane failure surface.

1. Slopes in dry cohesionless soils. In this case, the safety factor of safety with respect to sliding may be expressed by the equation: $Fs_1 = \tan \phi' / \tan i$. Table 1, lists of safety factors calculated through the present area.

2. Slopes on cohesionless soils, with seepage parallel to the slope. In this case, pore pressure and a percolation force act along the sliding surface. The factors of safety may be expressed by the equation: $Fs_2 = (\gamma_{sub} / \gamma_{sat}) / \tan \phi' / \tan i$. Table 2, lists the safety's factors for residual and colluvial soils.

3. Slopes on cohesionless and partially submerged soils. In this case, the Bishop's simplified method of slices was used which considers the effects of pore pressure acting along the failure surface. The mathematical expression for the safety factors is: $Fs_3 = \tan \phi' / \tan i (1 - B \sec^2 i)$. Table 3 lists the safety factors of safety calculated by this method.

Landslides that occurred in the area of study, show a plane failure surface. The soil-rock contact is the most favourable plain of sliding, which mostly occurs on gneiss and migmatite domains, where the vegetation was removed by the human action. The critical areas here appointed, i.e., the ones with $Fs_2 < 1.28$ (see figure 6), must be preserved against indiscriminate land use, in order to avoid triggering new soil sliding processes, that will cause serious problems not only in the areas directly affected, but also on the adjacent low relief areas, where the deposition of removed material from slopes mainly occurs.

INTRODUÇÃO

O uso do solo no Brasil vem ocorrendo sem a adequada consideração das condicionantes geológico-geotécnicas dos sítios de implantação de ou obras, o que vem acarretando inúmeros desastres, principalmente em áreas urbanas. Estes incluem deslizamentos em encostas, erosão por ravinamento e voçorocamento, enchentes e inundações, estas últimas, geralmente causadas pelo assoreamento dos cursos de água, muitas vezes como consequência direta dos primeiros.

O reconhecimento em detalhe de áreas de risco geológico-geotécnico constitui um instrumento capaz de diagnosticar e programar as ações preventivas e/ou emergenciais a serem praticadas. A utilização de cartas de zoneamento e cadastramento de risco é de interesse prático nos estudos preliminares de um projeto preventivo ou de recuperação, permitindo inclusive, otimizar as investigações necessárias e as formas de abordar os diferentes problemas e suas etapas sucessivas.

Entretanto, os mapas de risco geológico, produzidos para o planejamento urbano e do uso de solo são essencialmente qualitativos, tendo por base a coincidência de diversos atributos, cujas importâncias são avaliadas através de pesos que lhes são atribuídos de maneira arbitrária, segundo a experiência prévia do autor. Raramente esses mapas levam em conta índices físicos ou outras propriedades mecânicas dos solos que possam fornecer elementos mais precisos e adequados ao planejamento de obras de implante e/ou prevenção de acidentes naturais. Neste trabalho, propõe-se a elaboração de um mapa de risco em função de determinados fatores de segurança que permita a quantificação do risco de escorregamento de encostas.

ÁREA ESTUDADA

A área selecionada para o presente trabalho localiza-se entre as coordenadas UTM 768.250 e 773.000 W, e 7.198.000 e 7.204.000 S, perfazendo 28.5 km². A área

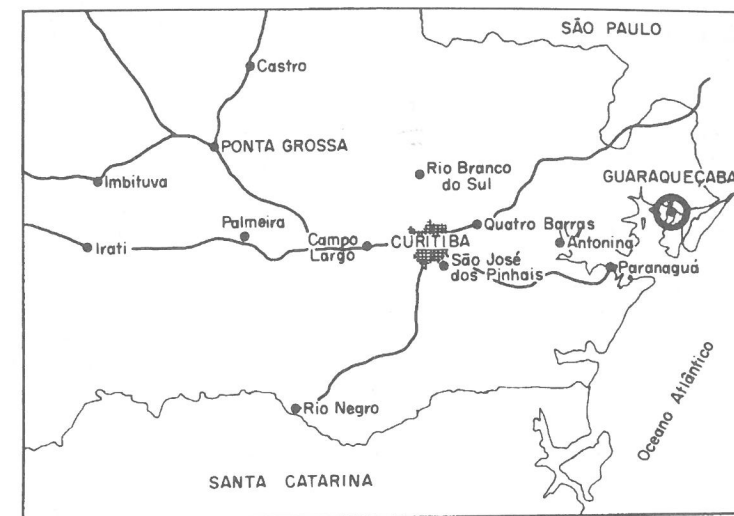


Fig. 1

Mapa de localização da área de Guaraqueçaba. *Situation of the Guaraqueçaba area.*

situa-se no norte do litoral paranaense, na Baía de Paranaguá (ou Baía de Guaraqueçaba, localmente) em plena Serra do Mar, dentro da qual encontra-se a cidade de Guaraqueçaba. (figura 1).

A opção de estudo pela área deveu-se ao fato da mesma ter sido recentemente objeto de abordagem por parte da MINEROPAR - Minerais do Paraná S/A, para a caracterização do meio físico e planejamento urbano. (OLIVEIRA & RIBAS, 1993). Na oportunidade, foram elaborados diversos mapas temáticos, como mapa geológico, mapa de coberturas inconsolidadas, mapa de declividades, mapa de indicações da geologia para o planejamento e mapa de áreas com potencial de riscos geológicos, todos à escala 1:10.000. Os mapas de maior utilidade para o presente trabalho foram o de declividades, o de coberturas inconsolidadas e o geológico.

ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

A área de Guaraqueçaba pode ser subdividida em dois compartimentos geomorfológicos distintos, representados pelas áreas de planícies litorâneas e as áreas de montanha.

As áreas litorâneas caracterizam-se por um relevo aplainado, com declividades muito baixas (menores que 5%) e compostas por sedimentos arenosos de origem litorânea e/ou fluvial. O padrão de drenagem é bastante complicado, com rios meandantes e anastomosados, submetidos aos efeitos das marés. A vegetação é relativamente rala, com inúmeras clareiras devido à ação antrópica.

As áreas de montanha evidenciam relevo mais acentuado, com declividades superiores a 20%. É comum a presença de cristas alongadas na direção nordeste-sudoeste, e morros de topos relativamente arredondados, com encostas íngremes, que impõem uma barreira natural à ocupação humana. Trata-se de uma área densamente florestada (Floresta Atlântica), à exceção de uma pequena área, conhecida como "Morro do Costão", onde se desenvolve um processo de ocupação desordenada, que levou ao total desmatamento da vertente oriental da crista do Morro do Costão,

adjacente à baía. Pequenas áreas desmatadas situam-se ao longo da estrada de acesso à Guaraqueçaba.

ASPECTOS GEOLÓGICOS

Cerca de 60% da área é ocupada por rochas do Complexo Gnaissico-Migmatítico, como granitos, gnaisses, migmatitos e xistos. O restante é ocupado por sedimentos recentes, de origem fluvial ou litorânea, que ocupam os baixios da área.

Os granitos, gnaisses e migmatitos ocupam as porções de relevo mais acentuado, com elevada declividade, e sustentam as principais cristas e morros da região. Afloram na forma de paredões e/ou lajes de pedra ou como matacões enormes. A alteração dessas rochas produz um solo argilo-arenoso avermelhado, rico em quartzo, feldspato e mica, sendo muito freqüente a presença de matacões e fragmentos menores de rocha misturados.

As rochas xistosas representam antigas zonas de cisalhamento, evidenciando intenso estiramento do quartzo e do feldspato. A faixa de maior possança situa-se imediatamente a leste de Guaraqueçaba, com largura de cerca de 1 km e direção aproximada N60E. O relevo aí presente é menos acentuado que na área de domínio dos granitos, migmatitos e gnaisses.

Os sedimentos recentes ocupam as porções de relevo aplainado, situadas entre o sopé dos morros e as águas da Baía de Guaraqueçaba. Segundo OLIVEIRA & RIBAS (1993), são representados pelos seguintes tipos: sedimentos argilo-arenosos, sedimentos continentais indiferenciados, sedimentos argilosos, sedimentos arenosos grosseiros (fluviais), sedimentos areno-argilosos de lagunas e fundo de baía e sedimentos arenosos.

ASPECTOS PEDOLÓGICOS

As áreas de maiores riscos a escorregamentos são aquelas de relevo acentuado e, por isso, será dada maior ênfase aos tipos de solos aí presentes.

Nas áreas de rochas graníticas, migmatíticas e gnaissicas, desenvolvem-se, ao longo das encostas, solos residuais que podem ser classificados como Cambissolos Álicos e Litólicos. No sopé das encostas ocorrem depósitos de talus ou "Colúvio de Pé de Relevo" (OLIVEIRA & RIBAS, 1993).

Os Cambissolos compreendem solos não hidromórficos, com horizontes A, B e C. Apresentam um certo grau de evolução, porém não o suficiente para meteorizar completamente minerais primários de difícil alteração, como feldspatos e micas.

O solo no horizonte A é do tipo granular, terroso, enquanto no horizonte B, compõem blocos subangulosos, pequenos e médios. No horizonte C, nota-se ainda a estrutura da rocha mãe.

Os Litossolos compreendem solos pouco desenvolvidos, e têm cerca de 20 a 40 cm de espessura. São de baixa fertilidade e extremamente suscetíveis à erosão.

Os "Colúvios de Pé de Relevo" formam uma franja contínua e irregular separando as áreas de relevo plano e as de relevo acidentado. A granulometria do solo varia desde a fração areia até matacões com dimensões métricas. Formam-se pela movimentação do manto de intemperismo, por rastejo e queda de blocos, sob a ação da gravidade e das águas das chuvas. De maneira geral, apresentam condições de estabilidade mais precária que os solos residuais vistos anteriormente, sendo mais suscetíveis a escorregamentos.

A figura 2 representa de forma esquemática a relação espacial entre os diferentes tipos de solo presentes nas vertentes constituídas por rochas graníticas, migmatíticas e gnaissicas.

Para a delimitação dos solos coluviais fez-se uso de fotografias aéreas com a escala de 1:25.000, e tendo-se por base os critérios de fotointerpretação sistemática de SOARES & FIORI (1976). O limite superior das rampas de colúvio marca a passagem de solos residuais para coluviais e é assinalado por uma quebra de relevo negativa. Já o limite inferior, marca a passagem de solo coluvial para os sedimentos recentes, que ocupam as porções aplainadas do relevo, praticamente à cota do nível do mar, sendo também marcada por uma quebra negativa de relevo, porém mais nítida que a anterior. O mapa de solos com as rampas de colúvio foi desenhado sobre um mapa-base topográfico, permitindo assim a rápida determinação da inclinação (i) da vertente.

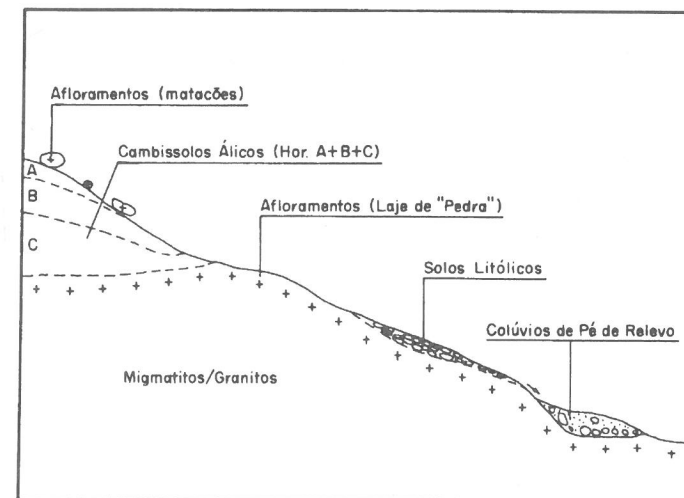


Fig. 2

Perfil esquemático das unidades de solos residuais no domínio dos migmatitos e gnaisses da região de Guaraqueçaba e depósitos de solo coluvionar no sopé de morros. (In: OLIVEIRA & RIBAS, 1993). Profile of residual and colluvial soil deposits in migmatites and gneisses domain. (In: OLIVEIRA & RIBAS, 1993)

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DAS VERTENTES

Do ponto de vista teórico, uma vertente se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de forças distintos: um devido ao peso do material, outro devido ao escoamento de água e um terceiro, devido à força de atrito. O estudo da estabilidade das vertentes deve necessariamente levar em conta o equilíbrio entre esses campos de forças. As componentes paralelas à vertente, do peso do solo e da força de percolação da água se somam, e tendem a movimentar a massa de terra encosta abaixo, enquanto que a componente da força de atrito atua como um freio a essa movimentação.

A fim de comparar a estabilidade de taludes em diferentes condições de equilíbrio, define-se o fator de segurança (Fs), como sendo a razão entre a resultante das forças resistentes (Fr) e a resultante das forças favoráveis (Ff) ao movimento, ou seja, $F_s = F_r/F_f$. Na condição de equilíbrio-limite, o fator de segurança é igual à unidade. Valores de (Fs) maiores que a unidade indicam que as forças resistentes são

maiores que as solicitantes e, portanto, a vertente está em equilíbrio. Por outro lado, valores de (Fs) menores que a unidade indicam que as forças solicitantes são maiores que as resistentes, e assim a vertente está em desequilíbrio.

Há diversos fatores de segurança que podem ser determinados em função de diferentes atributos que se deseja levar em conta na análise da vertente. Basicamente, esses atributos consideram a forma da superfície de ruptura, se plana ou curva, a presença de solos coesivos e não coesivos nas encostas, a inclinação e a altura crítica da encosta e a presença ou não de água. Esta última induz ao surgimento da pressão neutra e da força de percolação da água no solo da encosta, e a ação conjunta de ambas impõe um papel preponderante na estabilidade da vertente, principalmente em períodos de chuva mais intensa. É possível traçar, em mapas, curvas de isovalores de índices de segurança para os diversos fatores de segurança, levando-se em conta a presença de vertentes com solos residuais e coluviais.

O traçado das isocurvas de índices de segurança para o presente trabalho levou em conta as seguintes variáveis: ângulo de atrito interno (ϕ), ângulo de inclinação da vertente (i), altura crítica (H_c) da vertente, os pesos específico saturado (γ_{sat}) e submerso (γ_{sub}) do solo presente na vertente e a curvatura da superfície de ruptura. As relações matemáticas entre essas variáveis podem ser encontradas em diversos livros, como por exemplo, TERZAGUI & PECK (1967), MELLO & TEIXEIRA (1971); CAPUTO (1987, v. 2); GRAUX (1975); GUIDICINI & NIEBLE (1976); VARGAS (1978); CAPUTO (1988 v. 1); BARATA (1984); LANCELLOTTA (1987); JOHNSON & DE GRAFF (1988) e ORTIGÃO (1993). As equações utilizadas serão relacionadas mais adiante.

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS

A propriedade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade depende da resistência ao cisalhamento do solo; toda massa de solo se rompe quando esta resistência é excedida. Das características de resistência ao cisalhamento dependem importantes problemas de engenharia de solos e fundações. A estabilidade de vertentes (aterros, cortes e barragens), empuxos de terra sobre muros de contenção e túneis, capacidade de carga de sapatas e estacas, etc., dependem em maior ou menor grau dessa propriedade.

Segundo COULOMB, a resistência ao cisalhamento (σ_a) do solo ao longo de um plano de deslizamento qualquer se compõe, basicamente, de três componentes: a coesão, o atrito entre as partículas constituintes do solo e o esforço normal ao plano de escorregamento (σ_n), e se relacionam entre si segundo a equação $\sigma_a = c + \sigma_n \tan \phi$, onde (c) é a coesão e (ϕ) o ângulo de atrito interno do solo.

Sob a denominação genérica de atrito interno de um solo, inclui-se não só o atrito físico entre as partículas, que se pode traduzir como a maior ou menor facilidade de deslizamento de uma partícula em relação à outra, como também o atrito fictício, proveniente do entrosamento ou imbricamento das partículas (CAPUTO, 1988; BARATA, 1984).

A coesão, por outro lado, é uma característica típica de solos muito finos (argilas e siltes), distinguindo-se a coesão aparente, resultante da pressão capilar da água contida no solo, e que age como se fosse uma pressão externa de sucção, e a coesão verdadeira, devida às forças eletroquímicas de atração de partículas de argila (CAPUTO, 1884). A coesão é uma componente da resistência ao cisalhamento, e independe do esforço normal, ao contrário do ângulo de atrito interno, que depende desse esforço. O efeito da coesão na resistência ao cisalhamento é o de cola entre os grãos, que pode resultar, além das causas acima apontadas, da existência de substâncias cimentan-

tes, como os hidróxidos de ferro, carbonatos, sílica, etc. A coesão tende a se anular rapidamente ao longo de um plano de deslizamento tão logo o mesmo se instale.

ÂNGULO DE ATRITO INTERNO NATURAL

O ângulo de inclinação de uma vertente depende de vários fatores, como a coesão do solo, o ângulo de atrito interno, a presença ou não de água e o peso específico do solo. Todos esses parâmetros são mensuráveis e podem ser convenientemente analisados. A vegetação exerce também importante papel na estabilidade das vertentes, não só de proteção contra a chuva, erosão, etc., mas principalmente pelo efeito de agregação e estruturação do solo pelas raízes, aumentando sua resistência ao cisalhamento, mas esse efeito é de difícil quantificação, necessitando de estudos adicionais.

De um modo geral, pode-se demonstrar que o ângulo de inclinação (i) de uma vertente não deverá superar o ângulo de atrito interno (ϕ) do solo presente na mesma, para uma coesão igual a zero ($c = 0$), e assim a vertente só será estável para $i \leq \phi$.

Considere-se uma vertente de extensão ilimitada, constituída de um solo homogêneo, com um peso específico (γ_{nat}), de inclinação (i) e submetido apenas ao seu próprio peso (figura 3). Do ponto de vista prático, qualquer vertente de grande extensão, e com perfis de solos essencialmente do mesmo tipo, pode ser considerada como uma vertente ou talude de extensão ilimitada (DUNN, ANDERSON & KIEFER, 1980, p.238)

Consideremos agora um prisma de terra de largura (b), altura (z) e comprimento unitário, sobre uma vertente. Neste prisma atuam quatro forças que deverão estar em equilíbrio. Uma das forças atuantes é o peso (P) da coluna de terra, passando pelo ponto médio da base, onde $P = \gamma_{nat} bz$. Outras duas são as forças E_1 e E_2 , que atuam nas faces laterais do prisma, e que deverão ser iguais em magnitude por atuarem na mesma profundidade, com ação paralela à superfície do terreno e de sentidos opostos e, finalmente, a reação ao peso (R_p), que deverá ser igual e oposta a (P), ou seja, $R_p = P$.

Sendo (A) a área da base do prisma de terra, o valor da pressão vertical (σ_v) devida ao peso (P) é dada por:

$$\sigma_v = \frac{P}{A} = \frac{\gamma_{nat} bz \cos i}{b} = \gamma_{nat} z \cos i \quad (1)$$

As componentes normal (σ_n) e tangencial (σ_s) de (σ_n) são:

$$\sigma_n = \sigma_v \cos i = \gamma_{nat} z \cos^2 i \quad (2)$$

$$\sigma_s = \sigma_v \sin i = \gamma_{nat} z \cos i \sin i \quad (3)$$

Para a determinação do fator de segurança (Fs) é necessário antes conhecer a intensidade do esforço (σ_a) resultante da força de atrito (F_a), que representa a resistência ao atrito e atua em sentido contrário a (σ_s). Tendo-se por base o triângulo de forças das figura 3, pode-se fazer:

$$\tan \phi = \frac{\sigma_a}{\sigma_n}, \text{ onde: } \sigma_a = \sigma_n \tan \phi \quad (4)$$

O fator de segurança, por definição, é dado por $F_s = \sigma_a / \sigma_s$ (para $c = 0$), e substituindo-se os valores encontrados nas equações (2), (3) e (4), obtêm-se:

$$F_s = \frac{\gamma_{nat} Z \cos^2 i \operatorname{tg} \phi}{\gamma_{nat} Z \cos i \operatorname{sen} i} = \frac{\cos i \operatorname{tg} \phi}{\operatorname{sen} i}, \text{ e finalmente:}$$

$$F_s = \frac{\operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} i} \quad (5)$$

O ângulo de atrito interno (ϕ) pode ser obtido diretamente em laboratório através de ensaio de resistência ao cisalhamento. Entretanto, uma deficiência importante do ensaio de cisalhamento direto é a impossibilidade do controle da drenagem no corpo-de-prova; a caixa que contém a amostra de solo não tem um sistema de vedação adequado, com a água escapando, logo no início do ensaio, pela abertura deixada pelo deslocamento de uma parte da caixa sobre a outra, permitindo a drenagem, e com isso, alterando-se a pressão efetiva. Por essa razão, a única solução é conduzir o ensaio em condições totalmente drenadas, mantendo nulas as poropressões que, como se sabe, exercem um papel muito importante na estabilidade dos taludes. Outra desvantagem é a imposição de um plano de ruptura ao corpo-de-prova, principalmente quando se tratar de solos aparentemente homogêneos, cujo plano de fraqueza não foi detectado *a priori*. Pode-se incorrer no erro de se moldar o corpo-de-prova segundo a direção de maior resistência, obtendo-se resultados inadequados. Além disso, é muito difícil obter uma amostragem exatamente ao longo do plano de deslizamento potencial, e não é possível levar em conta os efeitos da vegetação nos ensaios laboratoriais tradicionais.

Considerando-se que numa vertente, na sua condição de equilíbrio-limite, ou seja, quando $F_s = 1$, o ângulo (i) é igual ao ângulo (ϕ), pode-se obter o valor deste último por comparação com o primeiro, a partir de cartas de declividade, fotos aéreas ou diretamente no campo, bastando para tanto, medir a declividade das vertentes nos

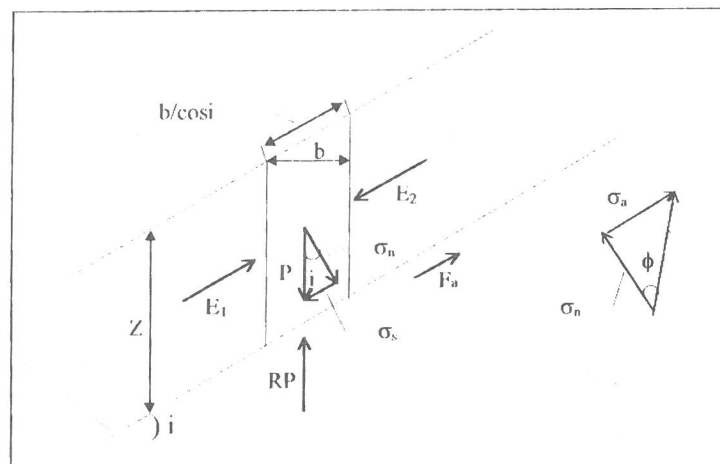


Fig. 3

Forças atuantes em uma vertente com solo seco e sem coesão. Forces acting on a slope with cohesionless dry soil.

locais onde há evidências de escorregamentos, quer sejam antigos ou recentes. O ângulo (ϕ) assim obtido, deverá ser algo diferente daquele a ser obtido experimentalmente, devido a diversos fatores, conforme já dito, dentre os quais os efeitos das raízes, das heterogeneidades naturais das rochas e solos, presença insuspeita de planos de fraqueza e variabilidade dos processos pedogenéticos. Prefere-se denominar esse ângulo de "ângulo de atrito interno natural" (ϕ'), para diferenciá-lo do ângulo de atrito interno (ϕ) que pode ser obtido em ensaios de cisalhamento direto.

Para a determinação do ângulo (ϕ'), calcula-se a inclinação da vertente no local onde se observam marcas de escorregamento, com o auxílio por exemplo, de um mapa topográfico. Medidas mais precisas podem ser feitas diretamente no campo com o auxílio de equipamentos de topografia. Porém, para estudos de cunho regional e para áreas de difícil acesso, o emprego desses equipamentos pode não ser justificado. No caso de emprego de mapas topográficos, basta medir as distâncias horizontal (D) e vertical (H), desde o ponto onde se verificou o escorregamento, até a base da vertente, ou então, até a ruptura de relevo mais abaixo, com (D) medido perpendicularmente às curvas de nível. A razão entre as distâncias, fornece a inclinação da vertente, ou seja: $\operatorname{tg} i = H/D$.

As tabelas 1 e 2 relacionam as distâncias (H) e (D) e os ângulos (i) medidos em vertentes onde se registrou a existência de escorregamentos em solos residuais e em solos coluviais (rampas de colúvio). A seguir, determinou-se a média dos ângulos (i) que, no caso dos solos residuais é igual a 28° ($28^\circ 13'$) e, para os solos coluviais é igual a 23° ($23^\circ 25'$).

Em uma outra tentativa, elaboraram-se os diagramas das figuras 4 e 5, plotando-se pontos que relacionam a altura (H) das vertentes e a distância horizontal (D). Através do método da regressão linear, determinou-se a reta que melhor se adapta aos dados, cuja inclinação em relação ao eixo dos X, fornece o valor médio de (i), que será tomado como igual ao ângulo (ϕ') natural. Para as vertentes com solos residuais, obteve-se um ângulo (ϕ') natural de 27° ($27^\circ 09'$) e para as vertentes com solos coluviais, obteve-se um ângulo (ϕ') natural de 22° ($22^\circ 22'$), com resultados bastante próximos aos alcançados anteriormente. Para o primeiro caso, os coeficientes a e b da reta ($y = ax + b$) são respectivamente iguais a 0,5130 e 2,4487, com coeficiente de correlação igual a 0,9713. Para o segundo caso, os coeficientes a e b da reta são respectivamente iguais a 0,4115 e 1,5112, com coeficiente de correlação igual a 0,9072.

Tabela 1. Distâncias (H) e (D) e ângulos de inclinação (i) de vertentes com solos residuais. Distances (H) and (D) and the slope angle (i) on residual soils.

Ponto	Altura (H)	Distância (D)	i (decimal)
1	20	30	33,69
2	20	40	26,57
3	40	70	29,74
4	60	130	24,78
5	60	120	26,57
6	140	240	30,26
7	110	160	34,51
8	60	110	28,61
9	100	190	27,76
10	140	280	26,57
11	110	240	24,62
12	60	120	26,57
13	20	40	26,57

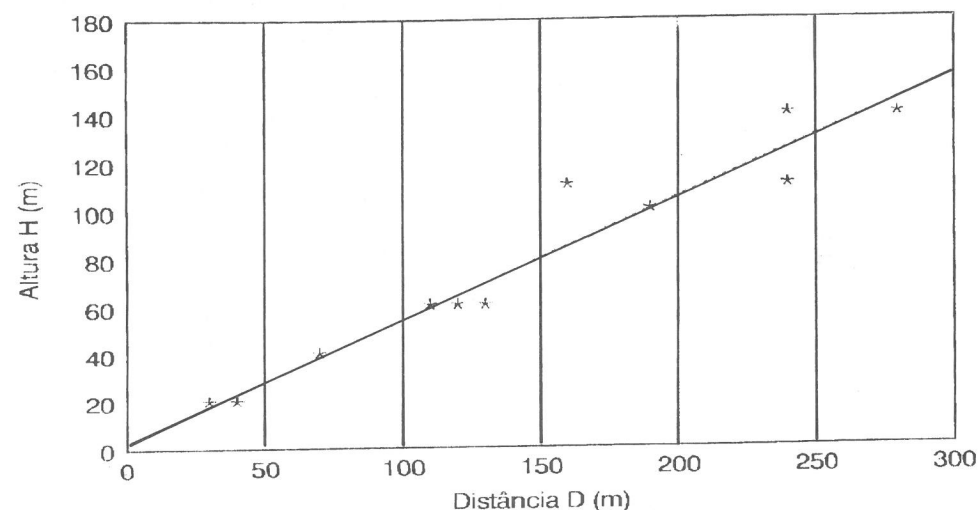


Fig. 4

Reta que melhor se adapta aos dados de altura (H) contra a distância (D) de vertentes com solos residuais. A reta foi determinada por regressão linear e, a sua inclinação fornece o ângulo (ϕ) das vertentes consideradas. Relation between height (H) and horizontal distance (D) for slopes with residual soils. The straight line was determined by the linear regression statistical method.

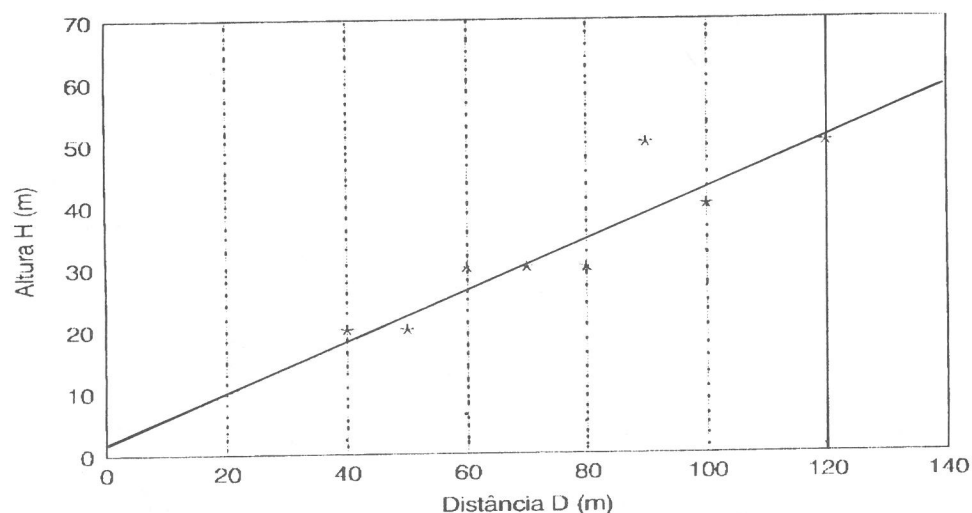


Fig. 5

Reta que melhor se adapta aos dados de altura (H) contra a distância (D) de vertentes com solos colúvies. A reta foi determinada por regressão linear, e a sua inclinação fornece o ângulo (ϕ) das vertentes consideradas. Relation between height (H) and horizontal distance (D) for slopes with colluvial soils. The straight line was determined by the linear regression statistical method.

Tabela 2. Distâncias (H) e (D) e ângulos de inclinação (i) de vertentes com solos colúvies (Rampas de Colúvio). Distances (H) and (D) and the slope angle (i) on colluvial soils.

Ponto	Altura (H)	Distância (D)	i (decimal)
14	50	120	22,62
15	30	80	20,56
16	50	90	29,05
17	30	80	20,56
18	30	70	23,20
19	30	60	26,57
20	40	100	21,80
21	30	70	23,20
22	20	50	21,80
23	20	40	26,57
24	20	50	21,80

O MAPA DE FATORES DE SEGURANÇA

Para uma análise mais detalhada foram calculados três diferentes fatores de segurança em função da presença ou não de água na vertente e da forma da superfície de escorregamento.

Nos três casos, a coesão do solo foi considerada igual a zero ($c = 0$). Um solo argiloso, com coesão nula, é um solo do tipo pulverulento e, se arenoso, comporta-se como uma areia seca, friável, pois os grãos estão soltos, sem efeitos de cimentação ou de "cola" entre eles. O fator de segurança assim determinado será conservador, fornecendo um valor menor do que o real.

No primeiro caso, o fator de segurança calculado levou em conta o solo seco, sem percolação de água. Neste caso, o fator de segurança é dado por:

$$Fs_1 = \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (\text{TAYLOR, 1937}).$$

Considerando-se um ângulo (ϕ') de 27° para os solos residuais presentes nas vertentes do domínio dos gnaisses e migmatitos, e um ângulo (ϕ') de 22° para os solos colúvies das rampas de colúvio, pelo emprego da equação acima, obtiveram-se os índices de segurança listados na tabela 3 abaixo, em função dos intervalos de declividade (i) adotados por OLIVEIRA & RIBAS (1993).

No segundo caso, levou-se em consideração o solo saturado em água, o surgimento de pressões neutras no plano de escorregamento e ainda, o efeito da força de percolação da água no solo das vertentes. Essas condições são obtidas em períodos de chuvas intensas, com precipitações que apresentem capacidade suficiente para saturar o solo. O fator de segurança nesse caso é dado por:

$$Fs_2 = \frac{\gamma_{\text{sub}}}{\gamma_{\text{sat}}} \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (\text{TAYLOR, 1937}), \text{ onde } \gamma_{\text{sub}} \text{ e } \gamma_{\text{sat}} \text{ são respectivamente os pesos específicos submerso e saturado do solo. Considerou-se um valor médio de } \gamma_{\text{sub}}/\gamma_{\text{sat}} = 0,5.$$

Os diversos valores de (Fs_2) para as diferentes categorias de declividade e para os dois tipos de solos, estão relacionadas na Tabela 4, abaixo.

No terceiro caso, a análise é baseada no Método Simplificado de Bishop, para coesão nula. O Método de Bishop considera, na realidade, a superfície de ruptura curva, mas no caso particular da coesão nula do solo, a superfície de escorregamento torna-se paralela à superfície do talude e, portanto, plana (HAEFELI, 1948). Esse método leva em conta os efeitos da pressão neutra da água nas vertentes. A equação para os cálculos de Fs_3 é a seguinte:

$$Fs_3 = \frac{\text{tg } \phi'}{\text{tg } i} (1 - \bar{B} \sec^2 i) \quad (\text{BISHOP \& MORGENSTERN, 1960})$$

Tabela 3. Índices de segurança determinados para vertentes com solos residuais e solos coluviais secos. Safety factors on residual and colluvial dry soils.

ângulo de inclinação (i)	Solos residuais	Solos coluviais
< 2°51'	> 10,23	> 8,12
02°51' - 05°42'	10,23 - 5,10	8,12 - 4,05
05°42' - 08°31'	05,10 - 3,40	4,05 - 2,70
08°31' - 11°18'	03,40 - 2,55	2,70 - 2,02
11°18' - 18°26'	02,55 - 1,53	2,02 - 1,21
> 18°26'	< 1,53	< 1,21

Considerou-se para o presente caso, tendo em vista que o solo residual presente nas encostas da área de domínio dos gnaisses e migmatitos é do tipo argiloso, um valor de $\bar{B} = 15\%$ (ROGÉRIO, 1977). Para o solo coluvial, que é do tipo arenoso (areia argilosa, areia siltosa e silte arenoso) considerou-se $\bar{B} = 10\%$ (ROGÉRIO, 1977). Os diversos valores de Fs_3 em função do ângulo de declividade (i) das vertentes para os solos residuais e coluviais estão relacionados na tabela 5 abaixo.

Tabela 4. Índices de segurança determinados para vertentes com solos residuais e coluviais, levando-se em conta os efeitos da percolação de água no solo. Factors of safety on residual and colluvial soils, with seepage parallel to the slope.

ângulo de inclinação (i)	Solos residuais	Solos coluviais
< 2°51'	> 5,12	> 4,06
02°51' - 05°42'	5,12 - 2,55	4,06 - 2,03
05°42' - 08°31'	2,55 - 1,70	2,03 - 1,35
08°31' - 11°18'	1,70 - 1,28	1,35 - 1,01
11°18' - 18°26'	1,28 - 0,77	1,01 - 0,61
> 18°26'	< 0,77	< 0,61

Pode-se verificar nas tabelas apresentadas que Fs_2 é o fator de segurança mais baixo quando comparado aos outros dois (Fs_1 e Fs_3). As áreas críticas ao escorregamento, no caso das áreas com solos residuais, são aquelas situadas em declividades superiores a 14°17', que é o valor da declividade para um fator de segurança igual a 1. Para as áreas de solos coluviais, e considerando-se o fator de segurança igual a 1, as áreas críticas são aquelas com declividades superiores a 11°25'. Em ambos os casos, as áreas críticas são aquelas com inclinações superiores a 25% para as primeiras e maiores que 20% para as segundas. A distribuição espacial das mesmas pode ser observada no mapa de índices de segurança (figura 6). Os outros dois índices de segurança indicam que nas áreas mais perigosas a ocorrência de fenômenos de escorregamento de solo são aquelas com vertentes com inclinações superiores a 20°, ou seja, com declividades superiores a 36%.



Fig. 6

Mapa de índices de segurança na área de Guaraqueçaba. Fator de segurança considerado: $Fs_2 = (\gamma_{\text{sub}}/\gamma_{\text{sat}})(\text{tg } \phi'/\text{tg } i)$. Os números referem-se aos intervalos dos índices de segurança para solos residuais/coluviais: 1) >5,12\4,06; 2) 5,12-02,55\4,06-2,03; 3) 2,55-1,70\2,03-1,35; 4) 1,70-1,28\1,35-1,01; 5) 1,28-0,77\1,01-0,61; 6) 0,77\0,61. As áreas 5 e 6 são as que apresentam maiores riscos de escorregamento de solo das encostas. SR: Solos residuais; SC: Solos coluviais; FR: Formações recentes. Fs_2 safety factors' map of the Guaraqueçaba area. Closely spaced lines indicate the areas of sliding risks; bay area is indicated by spaced vertical lines. Numbers refer to Fs_2 safety factors intervals for residual/colluvial soils: 1) >5,12\ >4,06; 2) 5,12-2,55\4,06-2,03; 3) 2,55-1,70\2,03-1,35; 4) 1,70-1,28\1,35-1,01; 5) 1,28-0,77\1,01-0,61; 6) <0,77\ <0,61. RS: Residual soils; CS: Colluvial soils; RF: Recent sediments.

Tabela 5. Índices de segurança para vertentes com solos residuais e colúviais, levando-se em conta o Método Simplificado de Bishop. Factors of safety on partially submerged residual and colluvial soils. The Bishop's simplified method of slices was utilised for calculations.

ângulo de inclinação (i)	Solos residuais	Solos colúviais
< 2°51'	> 8,69	> 7,82
02°51' - 05°42'	8,69 - 4,33	7,82 - 3,89
05°42' - 08°31'	4,33 - 2,80	3,89 - 2,51
08°31' - 11°18'	2,80 - 2,15	2,51 - 1,93
11°18' - 18°26'	2,15 - 1,28	1,93 - 1,14
> 18°26'	< 1,28	< 1,14

Os escorregamentos verificados na presente área de estudo mostram superfícies de ruptura essencialmente planas, com exceção de alguns escorregamentos relacionados a cortes de estrada. A superfície de contato do solo com a rocha é a mais favorável à ocorrência dos escorregamentos nas áreas desmatadas do domínio dos gnaisses e migmatitos (área do Costão), devendo-se tomar como mais representativo o fator de segurança Fs_2 , uma vez que é bem conhecido o fato dos escorregamentos ocorrerem preferencialmente nos períodos de chuvas mais intensas; este fator de segurança vale para épocas de chuvas intensas, capazes de saturar o solo.

Deve-se ter em conta que os fatores de segurança acima calculados apresentam uma estimativa conservadora, pois a coesão do solo foi considerada nula. Na realidade, os valores verdadeiros devem ser algo superiores aos obtidos, especialmente se for levado em conta o efeito da vegetação na estabilização do solo nas vertentes.

Muitas áreas indicadas como críticas na análise acima, e inclusive, com fatores de segurança menores que a unidade, na realidade, não apresentam evidências de escorregamento, com exceção da área conhecida como "Costão", que se apresenta desmatada e em processo de ocupação desordenada e ao longo da estrada de acesso a Guaraqueçaba. Este fato por si só, atesta a importância da vegetação que, entre outros efeitos, aumenta a estabilidade da vertente por efeito de proteção da superfície da encosta e de agregação do solo pelas raízes das plantas. Desta forma, a vegetação consegue manter em condições de estabilidade uma camada de regolito em uma vertente, com espessura e inclinação acima da condição mínima de estabilidade prevista teoricamente, ou seja, a vertente se mantém em condições de uma "aparente estabilidade" pelo efeito única e exclusivamente da vegetação. As áreas com fatores de segurança menores que a unidade, representadas no mapa acima, se fossem desprovidas da vegetação, estariam em condições eminentes de escorregamento. Por isso, qualquer modificação da cobertura vegetal por ação antrópica, climática, queimada natural, etc., associada a períodos de chuva, pode dar início aos movimentos, que dado ao acúmulo do solo com o tempo, podem resultar em verdadeiras catástrofes, como já ocorridas em diversas partes da Floresta Atlântica. Mesmo sem a ação antrópica, movimentos de massa em grande escala nas áreas florestadas são previsíveis nos locais em que a vegetação permitiu um grande acúmulo de regolito, o qual pode se instabilizar por ocasião de períodos de chuvas concentradas e com capacidade de saturar o solo. O plano de escorregamento, dependendo da espessura do manto de alteração, pode ocasionalmente se situar abaixo da profundidade alcançada pelas raízes, onde o efeito de agregação do solo é inexistente, e portanto, onde a resistência ao deslizamento é menor.

As áreas aqui apontadas como críticas devem, portanto, ser preservadas a todo custo do desmatamento, para evitar dar as condições propícias ao início do processo de escorregamento do solo das encostas, a exemplo da área do Costão e ao longo da estrada de acesso a Guaraqueçaba, com sérios reflexos nas áreas planas, onde se dá preferencialmente a deposição do material retirado das encostas.

CONCLUSÕES

Geomorfologicamente a região de Guaraqueçaba pode ser subdividida em dois compartimentos distintos: um representado por uma área de relevo suave e essencialmente plana, onde se situam as planícies litorâneas, e o outro, representado por áreas de relevo acidentado, onde se situam as montanhas da Serra do Mar. Geologicamente, as primeiras são constituídas por sedimentos arenosos e argilosos recentes e as segundas por gnaisses e migmatitos, com intercalações de xistos.

Nas áreas serranas, nas vertentes mais íngremes, os solos são residuais dos tipos Cambissolos e Litólicos, e no sopé das vertentes, acumula-se uma franja de solos colúviais nas chamadas rampas de colúvio.

Nos solos residuais, o ângulo (ϕ) obtido, forneceu um valor médio de 27° e nos solos colúviais, um valor médio de 22°.

Em Guaraqueçaba, o risco de escorregamento dos solos das vertentes é potencializado pela ação antrópica, principalmente pelo desmatamento e, pela abertura da estrada no sopé da encosta, afetando depósitos de colúvios.

As áreas de risco elevado a escorregamentos em épocas de chuvas intensas são aquelas assinaladas no mapa de fatores de segurança com declividades superiores a 14° (14°17'), para os solos residuais e superiores a 12° (11°25'), para os solos colúviais. Nestas áreas deve-se evitar o desmatamento, sob pena de iniciar o processo de escorregamento de solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARATA, F.E. *Propriedades mecânicas dos solos*. Uma introdução ao projeto de fundações. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, 1984. 152 p.
- BISHOP, A.W. ; MORGENTERN, N.R. Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*; n.10, p. 129-150, 1960.
- CAPUTO, H.P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. Fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, v.1, 1988. 234 p.
- _____. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. *Mecânica das rochas, Fundações, Obras de terra*. 6. ed. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, v. 2, 1987. 498p.
- DUNN, I.S., ANDERSON, L.R. ; KIEFER, F.W. *Fundamentals of geotechnical analysis*. New York : John Wiley & Sons, 1980. 414 p.
- GRAUX, D. *Fundamentos de mecânica del suelo, proyecto de muros e cimentaciones*. Barcelona : Editores técnicos associados, 1975. 414 p.
- GUIDICINI, G. NIEBLE, C.M. *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo : Edgard Blücher, 1976. 170 p.
- HAEFELI, R. *The stability of slopes acted upon by parallel seepage*. Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. (Rotterdam), v.1: 1948. p. 57.
- JOHNSON, R.B. ; DE GRAFF, J.V. *Principles of Engineering Geology*. New York : John Wiley e Sons, 1988. 497 p.
- LANCELLOTTA, R. *Geotécnica*. Bologna, Itália : Nicola Zanichelli Editore, 1987. 531 p.
- MELLO, V.F.B. ; TEIXEIRA, A.H. *Mecânica dos solos*. USP-Escola de Engenharia de São Carlos, 1971. 205p.
- OLIVEIRA, L. M. de ; RIBAS, S. M. *Caracterização do meio físico urbano de Guaraqueçaba*. Convênio Mineopar/Ibama/Prefeitura Municipal de Guaraqueçaba, 1993. 27p, anexos, (inédito).
- ORTIGÃO, J. A. R. *Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos*. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, 1993. 368 p.
- ROGÉRIO, P. R. *Cálculo da estabilidade de taludes de terra pelo método de Bishop Simplificado*. São Paulo : Edgard Blücher, 1977. 153 p.

- SOARES, P. C. ; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, v.16 n.32, p.71-104, 1976.
- TAYLOR, D. W. *Stability of earth slopes*. J. Boston Soc. Civil Engrs, 24, 1937. p. 197-246.
- TERZAGUI, K ; PECK, R. B. *Soil mechanics in engineering practice*. 2. ed., New York : Wiley International Edition, 1967. 729 p.
- VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo : MacGraw-Hill do Brasil, 1978. 509 p.

Considerações Sobre Os Sedimentos Do Fundo Das Baías Das Laranjeiras E De Guaraqueçaba - Complexo Estuarino Da Baía De Paranaguá (Paraná, Brasil)

Considerations about bottom sediments of Laranjeiras and Guaraqueçaba Bays, estuarine complex of Paranaguá Bay (Paraná, Brazil)

Carlos Roberto Soares*
José Humberto Barcelos**

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo o mapeamento sedimentar do fundo das Baías das Laranjeiras e de Guaraqueçaba - parte norte do Complexo Estuarino da Baía de Paranaguá (Figura 1).

Foram coletadas 219 amostras, cobrindo uma área aproximada de 250 km² (figura 2), tendo sido feitas as seguintes análises: granulometria (por pipetagem e peneiramento), teores de matéria orgânica, carbonato biodetrítico e minerais pesados não opacos na fração areia fina (0,250-0,125 mm).

A partir destes resultados elaboraram-se mapas de distribuição das frações grosseira e fina (figuras 3, 4 e 5), dos parâmetros estatísticos de granulométricos (figuras 6, 7 e 8) e dos teores de matéria orgânica (figura 9) e da distribuição de minerais pesados (figura 10).

Aventa-se a possibilidade, a partir da análise da morfologia do fundo, de uma separação entre os dois troncos principais do complexo estuarino (Baía de Paranaguá propriamente dita e Baía das Laranjeiras) no que diz respeito ao transporte de fundo, devido à presença de um extenso banco arenoso (Baixio do Perigo), localizado na zona de encontro dos dois sistemas (figura 11).

Nas Baías das Laranjeiras e Guaraqueçaba verificou-se uma granodrecrescência rumo à montante (figura 12), fato provavelmente relacionado aos distintos materiais sedimentares e processos de transporte disponíveis. À montante, onde as características de mistura de água doce e salgada são marcantes (caracterizando um estuário), ocorre a retenção de finos no fundo ou nos manguezais (pela ação de correntes de maré) e a jusante, onde ocorre maior influência de condições similares às de mar aberto, prepondera a fração areia. As diferenças nos conteúdos de grosseiros e finos, bem como as variações nos parâmetros estatísticos foram relacionadas a estes processos.

* Departamento de Geologia/Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná.

**Departamento de Geologia Sedimentar - UNESP - Campus de Rio Claro - SP