Zoneamento geológico-geotécnico de porção da região da Costa Verde-RJ, escala 1:10.000

Alberto Ferreira do Amaral Junior & Lázaro Valentin Zuquette

Resumo Este trabalho apresenta um conjunto de atividades desenvolvidas e os resultados obtidos no decorrer dos estudos relacionados ao mapeamento geotécnico e a movimentos de massa gravitacionais realizados em uma área que compreende 60 km², sendo 41 km² de encosta e 19 km² de planícies, localizada na região da Costa Verde, estado do Rio de Janeiro, envolvendo parte dos municípios de Itaguaí e Mangaratiba. O estudo foi realizado em três etapas distintas: definição dos atributos, levantamento de dados e análise dos resultados. Foram elaborados os mapas de substrato rochoso, materiais inconsolidados, forma da encosta, declividade, direção da inclinação do talude e uso das terras, assim como os dados de chuvas dos últimos 17 anos. Foi ainda realizado o inventário das feições de movimentos de massa gravitacionais de acordo com os critérios definidos pela UNESCO. Cerca de 140 feições foram cadastradas e classificadas como escorregamentos translacionais, quedas, rolamentos, fluxos e rastejos, sendo que 49% destes eventos não sofreram influência antrópica. A partir dos dados do inventário e dos atributos elaborou-se uma análise bivariada por correlação simples, que mostrou que a ocorrência dos movimentos são controlados por um grupo de atributos fortalece a premissa de que para estudos de movimentos de massa gravitacionais deve ser considerado um grupo significativo de atributos, e um zoneamento geológico-geotécnico em termos da predisposição da área quanto aos movimentos de massa gravitacionais baseado nos resultados da análise bivariada.

Palavras-chave: Mapeamento geotécnico, movimentos de massa gravitacionais, Costa Verde, Rio de Janeiro.

Abstract *Engineering geological zoning of portion of the Costa Verde region-RJ, Scale 1:10,000.* This work presents procedures and results of studies related to the Engineering Geological Mapping and gravitational mass movement processes carried out in an area with 60 km², being 41 km² on hillside and 19 km² on plains. It is located in the Costa Verde region, state of the Rio de Janeiro, in the municipalities of Itaguaí and Mangaratiba. The study was developed in three distinct stages: definition of the attributes, collecting of the data and analysis of the results. As result of the engineering geological mapping six maps were elaborated: rock substrate, unconsolidated materials, slope shape, slope gradient, direction of the slope gradient and land uses. The rainfall data of the last 17 years were obtained. The inventory of the features of gravitational mass movements was elaborated in accordance with the criteria defined by UNESCO, and was registered 140 features, consisting of 5 categories: translational landslides, falls, boulder rolling, flows and creep. About 49% of these features had not suffered human influence. A bivariate analysis was carried out considering the environmental data obtained during the engineering geological mapping and inventory of the features occurred in the area.

Keywords: Engineering Geological Map, Gravitational mass movement, Costa Verde.

INTRODUÇÃO O Homem ao longo dos últimos 250 anos vem explorando a Terra e modificando sua parte mais superficial profundamente, principalmente pela falta de qualquer tipo de planejamento adequado da exploração e ocupação do meio físico. Assim, torna-se indispensável a utilização de uma ferramenta que oriente quanto às suas limitações e qualidades. O mapeamento geotécnico é esta ferramenta que tem como objetivo caracterizar e zonear o meio físico no sentido de indicar o melhor uso do território, proteger os recursos naturais, prever e alertar quanto aos eventos naturais e induzidos. Na maioria das vezes as investigações geotécnicas têm um caráter emergencial ou corretivo, para mitigar problemas existentes. Ao contrário do ma-

peamento geotécnico que tem papel importante não só no diagnóstico, mas também na prevenção de situações de risco decorrente de eventos naturais ou induzidos, e com isso visa propiciar uma economia de recursos evitando obras corretivas.

Dentre os eventos que ocorrem na Terra e atingem o Homem e seus bens encontram-se os movimentos de massa gravitacionais (MMG) em regiões montanhosas, que são em muitos casos processos naturais de evolução do meio físico, e que podem ser acelerados por atividades antrópicas, potencializando as consequências sociais e/ou econômicas adversas, além daquelas naturalmente provocada por estes processos. O entendimento destes processos e suas relações são fundamen-

1 - Programa de Pós-Graduação, EESC/USP, São Carlos (SP), Brasil. E-mail: albertogeotecnia@gmail.com

2 - EESC/USP, São Carlos (SP), Brasil. E-mail: lazarus1@sc.usp.br

tais para que haja um planejamento adequado de uso do solo de uma região, assim como para que medidas de controle sejam adotadas com a devida antecedência. Neste sentido foi desenvolvido em parte da região da Costa Verde, no estado do Rio de Janeiro, este estudo envolvendo a combinação dos procedimentos de mapeamento geotécnico e de inventário das feições decorrentes de eventos anteriores, com o objetivo de elaborar um zoneamento geológico-geotécnico.

ASPECTOS BIBLIOGRÁFICOS Diversas regiões no mundo, principalmente de elevadas altitudes, são atingidas por processos naturais principalmente em épocas de chuvas intensas e durante eventos sísmicos, causando mortes e destruições.

Os estudos de movimentos de massa gravitacionais podem ser desenvolvidos na forma de inventários onde a preocupação é levantar, identificar e classificar cada feição encontrada em campo. Estudos de zoneamento estão voltados para identificação de características (atributos) que predisponem tais processos e a individualização de áreas com mesmo nível de predisposição, devido à interação dos atributos entre si.

Atualmente a pesquisa sobre MMG é bastante difundida em vários países com um número muito grande de procedimentos metodológicos utilizados para o zoneamento das áreas afetadas.

Irigaray *et al.* (1996b) relatam sobre a enorme variedade de métodos para realizar análises de susceptibilidade de escorregamento, fazendo uma comparação para identificar o mais apropriado. Entre eles os métodos de declividade crítica (considera a relação entre distribuição da zona de ruptura em cada unidade litológica e a declividade), matriz (método quantitativo ou qualitativo), percentagem de zonas de ruptura (baseado em modelo heurístico), indexação (modelo empírico baseado em análises do terreno), valor de informação (modelo estatístico) e regressão múltipla (obtenção de equações determinísticas).

Baeza & Corominas (2001) afirmam que os procedimentos podem ser agrupados com base em análises geomórficas, técnicas de tratamento de dados e aproximações determinísticas. As duas primeiras são mais usadas em análise de eventos perigosos regionais enquanto que a terceira é usada para estudos detalhados, onde um fator de segurança é determinado, sendo que a técnica que se destaca é a técnica de análise multivariada (tratamento de dados) que permite a avaliação quantitativa da influência simultânea de diferentes fatores, portanto, mais realista e objetiva para a avaliação de susceptibilidade a escorregamentos.

Na tabela 1 encontram-se as principais categorias e alguns exemplos de procedimentos metodológicos que representam as diferentes categorias.

MÉTODO O método utilizado neste trabalho está baseado no levantamento de um grupo de atributos a partir de um processo de mapeamento geotécnico e utilizando análises semelhantes às de Crozier (1989), Turner & Schuster (1996) e Guzzetti *et al.* (1999) que são

baseadas em um grupo de informações relacionado ao processo, assim como a utilizada neste trabalho. Porém, em relação aos autores citados, este trabalho considerou um grupo de atributos mais específico, relacionados aos tipos de movimentos de massa gravitacionais. Foram obtidos com o desenvolvimento de um processo de mapeamento geotécnico em escala 1:10.000, de maneira que possam ser tratados por diversos recursos. O principal ponto que diferencia os procedimentos adotados neste trabalho dos citados refere-se à avaliação das unidades de materiais inconsolidados considerando a variação vertical e a análise dos materiais em termos de sua evolução genética.

O estudo foi executado de acordo com as etapas constantes do fluxograma da figura 1.

As atividades reunidas na figura 1 foram agrupadas em três grandes etapas, a saber:

Etapa 1: A área foi mapeada com objetivo de identificar e delimitar as zonas de ocorrência dos atributos constantes da tabela 2, selecionados de uma listagem mais ampla de atributos proposta por Zuquette (1993); e que apresentam relação direta com a ocorrência de movimentos de massa gravitacionais, e que foram considerados na análise bivariada por correlação simples entre a ocorrência de feições e a distribuição em área considerando os atributos.

Etapa 2: Consistiu no armazenamento das informações obtidas na etapa anterior;

Etapa 3: Foram elaboradas as análises dos resultados, em termos de distribuição espacial dos atributos e bivariada por meio de correlações simples entre a frequência dos movimentos de massa gravitacionais e os atributos predisponentes mapeados na região.

CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA

Localização A área de estudo está inserida nos municípios de Mangaratiba e Itaguaí, litoral sul do estado do Rio de Janeiro, na porção sudoeste da folha Itaguaí, entre as coordenadas: 606000E, 7474000N; 624000E, 7462000N, da Zona UTM 23 Sul, totalizando 60 km² (Fig. 2).

Características gerais A área de estudo está inserida em um clima tropical úmido, com evapotranspiração anual moderada e segundo a classificação de Köppen é do tipo **Af**. A temperatura média anual é de aproximadamente 22°C, a média mensal é de 25°C no mês mais quente e 19°C no mês mais frio, com ventos predominantes de sudoeste e sul e pluviosidade anual que pode atingir 2100 mm.

Geomorfologicamente a região é constituída por 3 zonas: planícies colúvio-aluvionares, planícies flúvio-marinhas e escarpas.

A vegetação natural predominante é a Mata Atlântica que ocorre nas altitudes mais elevadas, com espécies arbóreas de grande porte (30 metros de altura), arbustivas e rasteiras. Há, ainda, presença da cultura de banana na média e baixa encosta, e pastagem.

Chuvas A estação meteorológica encontra-se no dis-

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos tipos de procedimentos utilizados para zoneamentos relativos aos movimentos de massa gravitacionais.

Enfoque	Vantagens	Desvantagens	Exemplos
Multicritério (em especial AHP)	- Transformação de dados quantitativos em dados qualitativos; - Avaliação da importância relativa de cada atributo.	- Exige uma enorme quantidade de informações, conseqüentemente período de tempo longo de trabalhos preliminares; - Para análises de muitas classes e atributos faz-se necessário uso de ferramenta computacional.	Rodrigues (2003), Rodrigues & Zuquette (2006).
Determinístico	- Análises quantitativas, considerando o fator de segurança.	- Aplicável em pequenas extensões (taludes), em escala local, não aplicável em escalas menores devido à quantidade de informações exigidas.	Wu & Abdel-Latif (2000).
Heurístico (Geomórfico)	- É um método de fácil análise, não necessitando de ferramentas computacionais muito avançadas para tal; - Gera boas potencialidades relativas entre os atributos, aproximando-se da realidade.	- O principal inconveniente é que o conhecimento disponível dos fatores que influenciam os deslizamentos pode ser inadequado e subjetivo dependendo da experiência do pesquisador; - Devido ao grau de subjetividade inviabiliza a comparação com outros autores.	Anbalagan (1992).
Estatístico (bivariada e multivariada).	- Relacionam o aspecto probabilístico; - Objetividade. - Trabalha com dados qualitativos e quantitativos - Capacidade de analisar a influência de cada atributo	- Multivariada necessita de muitos dados e de boa qualidade.	Carrara (1983), Carrara et. al (1991).

AHP – Analytical Hierarchy Process

Figura 1 - Fluxograma das atividades desenvolvidas no mapeamento geotécnico da região da Costa Verde-RJ.

Tabela 2 - Componentes e atributos levantados durante o mapeamento geotécnico (adaptado de Zuquette, 1993).

Feições	Substrato Rochoso		Material Inconsolidado	Relevo	Águas	Antrópico	Vegetação
Fissuras em Superfícies	Áreas com rochas aflorantes.	Densidade das descontinuidades.	Descontinuidade.	Declividade.	Fluxo de N.A. direcionado.	Escavações.	Capacidade de armazenar água na superfície.
Posição no <i>Landform</i>	Litologia.	Abertura das descontinuidades.		Formas dos vales.	Pequenas lagoas nos canais de drenagens.		
Comprimento	Grau de intemperismo.	Preenchimento das descontinuidades.	Tipo de material.	Escarpas.	Variações bruscas do nível da água.	Posição das escavações na encosta.	
Largura							
Depósitos oriundos de movimentos de massa antigos e cicatrizados	Alternância de materiais com diferentes níveis de competência.	Descontinuidades geradas por alívio de tensão e ou por ativ. Antrópicas.	Descrição tipo.	Direção, mergulho e sentido do vetor de maior declividade.	Relações do N.A. com depósitos de materiais retrabalhados naturais.	Alterações antrópicas nos canais drenagem das encostas.	
Depósitos oriundos de movimentos de massa recentes	Alternância de materiais com diferentes níveis de resistência.	Relação entre ângulo de mergulho da encosta e ângulo de mergulho das descontinuidades.					
Posição de parada do material movimentado no relevo	Materiais com esmectita.		Perfil de material inconsolidado.		Diferentes níveis de surgências em uma mesma encosta.	Acumulo artificiais de água na encosta.	
	Tipo de descontinuidades.						
Alterações de geometria em um determinado trecho nos canais de drenagem	Tipo de contato entre diferentes materiais rochosos.	Conectividade das descontinuidades.	Surgências que desaparecem temporariamente.		Ocupação no topo das encostas com fossas ou outros recursos com a mesma finalidade.		
		Persistência das descontinuidades.					
Veios ou camadas finas dispostas de forma escalonada no perfil	Paralelismo entre o topo rochoso e a superfície do terreno.	Perfil de alteração homogeneizou ou evidenciou as descontinuidades.	Heterogeneidade do pacote de materiais retrabalhados.	Perfil vertical e longitudinal do landforms ou encosta.	Surgências que desaparecem definitivamente.	Eficiência da compactação dos aterros construídos nas encostas.	
Canais de drenagem alterados com zonas de acumulo	Grau de irregularidade do topo rochoso.	Relação entre direção das encostas e direção das descontinuidades.			Zonas onde o fluxo das águas superficiais esta concentrado.		
Materiais envolvidos		Zonas de falhas ou intensamente fraturas.					
Tipo de Superfície de ruptura	Tipo de contato entre os topos rochosos e os materiais inconsolidados.	Camadas litotípicas que tenham comportamento de descontinuidades.	Inversões da direção das inclinações de partes das encostas.	Zonas mais favoráveis a variações de pressão neutra.			
Profundidade							
Vegetações naturais com diferentes portes em zonas de vizinhança na encosta	Tipo de contato entre os topos rochosos.	Relação entre sentido do mergulho das descontinuidades e da inclinação da encosta.	Difração de fluxo de água.	Surgências alinhadas em determinadas altitudes.			

trito de Coroa Grande (Itaguaí), sobre os cuidados da ANA (Agência Nacional de Águas) com registros diários, num período de 17 anos, desde 1989 a 2006 (Fig. 3), para os quais observou-se uma variação de chuva acumulada anual entre 1642 mm e 2618 mm. Analisando os valores diários de chuva e o número de dias em que chove mensalmente, foi verificado que cerca de 5% das chuvas diárias estão acima de 60 mm e que em 31% dos meses chove mais que 10 dias.

A região metropolitana do Rio de Janeiro tem implantado o sistema de “Rio Alerta” proposto por D’orsi *et al.* (1997). Baseado em eventos ocorridos, considerando os dados de chuva diários e acumulados

de 4 dias (96 horas). Analisando os limites de ruptura propostos por D’orsi *et al.* (1997) e a distribuição das chuvas encontrou-se 28 eventos (no período de 1989 a 2006) de chuvas (Fig. 4) que ultrapassam o limite de ruptura.

RESULTADOS Os resultados serão apresentados separadamente em função dos componentes do meio ambiente e dos documentos cartográficos elaborados durante o desenvolvimento do trabalho.

Forma da Encostas As áreas com diferentes formas das encostas foram individualizadas levando em consi-

Figura 2 - Localização da área de estudo.

Figura 3 - Distribuição das chuvas diárias no período de 1989 até 2006 (Fonte ANA, 2006).

deração seus perfis verticais e horizontais, segundo os padrões de Ruhe (Fig. 5).

Direção do Mergulho do Talude A partir do modelo digital de terreno foi gerada a carta contendo 9 classes (plano, norte, sul, leste, oeste, sudeste, sudoeste, nordeste, noroeste), sendo que a maioria pertence às classes sul e sudeste.

Usos do Solo A área tem 6 classes de usos bem individualizadas: área industrial com 1,5 km², área urbana

com 9,1 km², cultivo de banana com 0,9 km², mineração com 0,07 km², pastagem com 8,8 km² e Mata Atlântica com 41,3 km².

Declividade Inicialmente elaborou-se uma carta de declividade com 9 classes com intervalo de 10°, variando de 0-90, e a partir da avaliação da frequência das classes foi elaborada uma segunda carta de declividade com 6 classes variando de 0 a >50°, com intervalo de 10°.

u

Figura 4 - Eventos diários de chuvas, no período 1989-2006, que ultrapassaram o limite de ruptura proposto por D'orsi et al. (1997).

Figura 5 - Formas das vertentes (S Retilíneo, V convexo, C côncavo), Ruhe apud Mitchell (1991).

Mapa do Substrato Rochoso A área de estudo é composta por biotita gnaiss, migmatito, granito e depósitos quaternários (Fig. 6).

O granito é acinzentado, discretamente foliado, com textura variando, entre fina e média, e são porfiroclásticos em amplos domínios.

O migmatito tem neossoma granitóide de granulação fina a média, em parte pegmatóide, com veios de quartzo, e com uma faixa de transição com Biotita Gnaiss, da ordem de 20 metros de espessura.

O biotita gnaiss é melanocrático, de granulação média a grossa, com biotita (predominância) de granulação fina, quartzo de granulação média a grossa, feldspatos de granulação grossa.

Como estruturas geológicas tem-se a foliação no biotita gnaiss, em média, com atitude 335/25, e fraturas, predominantemente com 2 orientações: N40E/80SE e N43W/85SW, que associadas a juntas de alívio e foliação isolam blocos.

Foram executados alguns ensaios com o esclerômetro de Schmidt para avaliação da resistência à compressão uniaxial dos maciços rochosos e para verificar o grau de alteração dos litotipos (Tab. 3).

Mapa dos Materiais Inconsolidados Ocorrem, na área, materiais inconsolidados transportados expressivos nas encostas com talus e colúvios, e ocorrem também os solos residuais de biotita gnaiss, migmatito e granito (Fig. 7).

MATERIAIS INCONSOLIDADOS RESIDUAIS

Biotita Gnaiss Solos residuais originados da decomposição de biotita gnaiss são muitos semelhantes aos solos residuais de migmatito, somente sendo possível a diferenciação com a ocorrência de horizontes saprolí-

ticos. Algumas características geotécnicas destes solos encontram-se na tabela 4.

Residual Maduro (SRMgp) Estes materiais inconsolidados são de textura areno-silto-argilosa com pedregulhos, e grãos de quartzo angulosos. Predominantemente estes horizontes são de pequenas a grandes espessuras (desde 0,1 a 20 metros).

Residual Jovem (SRJgp) Estes materiais inconsolidados são de textura areno-siltosa com pouca argila e vestígios de pedregulho, com grãos de quartzo angulosos. Sua distribuição granulométrica é dada por: 4% de pedregulho, 68,5% de areia, 21% de silte e 6,5% de argila. Predominantemente estes horizontes são de pequenas a médias espessuras (desde 0,2 a 8 metros).

Saprolítico (Sgp) Estes materiais inconsolidados são de textura areno siltosa com pouca argila e vestígios de pedregulho. Apresentam grãos de quartzo angulosos e são ricos em mineral biotita. Sua distribuição granulométrica é dada por: 1% de pedregulho, 69% de areia, 25% de silte e 5% de argila. Predominantemente estes solos são de média a grande espessura ($\approx$ 3-25 metros), com preservação principalmente das foliações e outras estruturas, como as fraturas.

Migmatito Os materiais inconsolidados residuais dos migmatitos são de fácil identificação em campo devido à singularidade de horizontes de estruturas migmatíticas preservadas. Os valores dos ensaios realizados em laboratório encontram-se na tabela 5.

Residual Maduro (SRMm)

Estes materiais inconsolidados são em geral de textura

Figura 6 - Mapa de substrato Rochoso.

Tabela 3 - Comparação entre níveis de alterações e características geotécnicas.

Litotipo	Propriedades geotécnicas				
	Nível de alteração (ISRM 1983)	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	n (%)	RCU (MPa)
Migmatito	I	26,4 – 25,3	26,5 – 25,7	3,31 – 0,32	77,1 – 58,3
	II	24,9 – 24,1	25,0 – 24,1	1,54 – 0,90	57,2 – 52,0
	III	25,3 – 24,2	25,4 – 24,7	5,26 – 0,59	29,8 – 28,2
	IV	26,3 – 23,4	26,4 – 23,9	9,76 – 0,89	21,0 – 19,0
Biotita Gnaiss	I	26,6 – 26,5	26,6 – 26,5	0,37 – 0,20	62,5 – 62,0
	II	25,0 – 24,0	25,3 – 24,4	6,46 – 3,46	35,5 – 32,9
	III	24,8 – 21,1	25,2 – 22,6	15,15 – 3,40	31,6 – 22,4
	IV	26,4 – 19,1	26,4 – 21,3	22,24 – 1,49	29,3 – 16,7

γ_d – Peso específico aparente seco / γ_{sat} – Peso específico saturado / n – Porosidade / RCU – Resistência a Compressão Uniaxial

Figura 7 - Mapa de Materiais Inconsolidados.

LEGENDA

RSgp – Rocha Sã (Biotita Gnaiss)	SRJm – Solo Residual Jovem (Migmatito)
RSm – Rocha Sã (migmatito)	RAm – Rocha Alterada (Migmatito)
Dca – Depósitos Colúvio-Aluvionares	SRMgp – Solo Residual Maduro (BiotitaGnaiss)
SRMgr – Solo Residual Maduro (Granito)	SRJgp – Solo Residual Jovem (Biotita Gnaiss)
RAgr – Rocha Alterada (Granito)	Sgp – Saprolito (Biotita Gnaiss)
SRMm – Solo Residual Maduro (Migmatito)	RAgp – Rocha Alterada (BiotitaGnaiss)
STTgp – Solos Transportados Tálus com blocos angulosos de biotita gnaiss	
STTgr – Solos Transportados Tálus com blocos arredondados de granito	
STTgg – Solos Transportados Tálus com blocos angulosos de migmatito	
STTm – Solos Transportados Tálus com blocos angulosos e arredondados	
STCarg – Solo Transportado Coluvionar argiloso	
STT/Carg – Solos Transportados Tálus/Colúvio argiloso	

Tabela 4 - Resultados dos ensaios para os materiais inconsolidados residuais de biotita gnaiss.

	SRMgp	SRJgp	Sgp
γ campo(kN/m ³)	15,15 – 15,97	16,45 - 17,51	14,05 – 15,75
γ_d campo(kN/m ³)	13,09 – 13,55	14,56 – 15,14	11,79 – 13,21
γ_s (kN/m ³)	-	25,80	25,58
e	-	0,70 - 0,77	0,94 - 1,17
n	-	0,42 – 0,43	0,48 – 0,54
Wm(%)	15,26 -15,73	10,50 - 15,65	18,95 - 21,05
θ (%)	-	17,55 - 23,69	23,95 - 29,15
Sr (%)	-	37,80 - 57,34	46,48 - 57,44
Φ (°)	37,5	41	32
C(kPa)	14,5	17,5	26,5
Φ_r (°)	32	42,5	32
Cr(kPa)	8	4,5	10
K_{20} (cm/s)	5,5E-04	1,1E-06	9,2E-04 - 1,4E-05
Pedregulho (%)	-	4	1
Areia (%)	-	68,5	69
Silte (%)	-	21	25
Argila (%)	-	6,5	5

Nota: γ campo é o peso específico do solo, γ_d campo é o peso específico seco do solo, γ_s é o peso específico dos sólidos, **Wm** é a umidade gravimétrica, θ é a umidade volumétrica, Φ é o ângulo de atrito interno do solo, **C** é a coesão do solo, Φ_r é o ângulo de atrito residual do solo e **Cr** é a coesão residual do solo, **e** é o índice de vazios, **n** é a porosidade, **Sr** saturação, K_{20} é a condutividade hidráulica saturada a 20 °C.

areno-siltosa com vestígios de argila e pedregulho. Sua distribuição granulométrica é dada por: 2% de pedregulho, 75,5% de areia, 18% de silte e 4,5 % de argila, e presença de grãos de quartzo angulosos. Predominantemente estes são de pequenas a medianas espessuras (0,8 a 7 metros).

Residual Jovem (SRJm) Estes materiais inconsolidados são de textura areno silto-argilosa, com distribuição granulométrica dada por: 67% de areia, 21% de silte e 12% de argila, e grãos de quartzo angulosos. Predominantemente apresentaram pequenas espessuras (0,5 a 3 metros).

Saprolítico (Sm) Texturalmente caracterizados por: 0,5% de pedregulho, 84,5% de areia, 13% de silte e 2% de argila, e com grãos de quartzo angulosos e níveis cauliniticos formados pelo intemperismo dos feldspatos. Estes solos apresentam grandes variações de espessura (desde 0,8 a 30 metros), com preservação principalmente das estruturas migmatíticas possuindo variações de níveis biotíticos, geralmente na forma de lentes, menos resistentes.

Granito Os materiais inconsolidados residuais são de

difícil observação em campo devido à topografia íngreme, sendo estes solos formados pela decomposição de rochas situadas nos topos das encostas.

Residual Maduro (SRMgr) Estes materiais inconsolidados são em geral de textura areno-silto-argilosa com vestígios de pedregulho, e distribuição granulométrica dada por: 4% de pedregulho, 49% de areia, 25% silte, 22% de argila. Predominantemente apresentam espessuras medianas ($\approx$ 3-10 metros), condutividade hidráulica saturada variando entre $1,6 \times 10^{-6}$ a $3,7 \times 10^{-7}$ cm/s, massa específica seca varia de 1,37 a 1,49 g/cm³ e a massa específica dos sólidos é de 2,755 g/cm³, índice de vazios variando de 0,85 a 1,04, porosidade de 46,02 a 50,95%, e ângulo de atrito interno de 32° e coesão de 31,5 kPa para condição de umidade de campo.

Residual Jovem (SRJgr) Estes materiais inconsolidados são de textura areno silto argilosa com pedregulhos, grãos de quartzo angulosos, e granulometria fina. Predominantemente são de pequenas espessuras (0,3-2 metro), e apresentam alto grau de homogeneidade.

Saprolítico (Sgr) Estes materiais inconsolidados são

Tabela 5 - Resultados dos ensaios para os materiais inconsolidados residuais de migmatito.

	SRMm	SRJm	Sm
γ campo (kN/m ³)	13,45 – 14,13	12,84 – 14,06	12,29 – 13,67
γ_d campo (kN/m ³)	12,47 – 12,97	10,73 – 11,32	12,12 – 12,72
γ_s (kN/m ³)	27,20	29,19	25,69
e	1,10 - 1,18	1,58 - 1,72	1,02 - 1,12
n	0,52 – 0,54	0,61 – 0,63	0,50 – 0,52
W _m (%)	7,87 - 9,92	19,66 - 26,12	11,17 - 12,75
θ (%)	9,82 - 12,61	22,67 - 29,12	13,73 - 17,73
S _r (%)	18,13 - 23,79	33,34 - 47,10	26,34 - 30,71
Φ (°)	42	45	34
C (kPa)	6,5	6,5	12
Φ_r (°)	39	42	32
C _r (kPa)	5,5	1	9
K ₂₀ (cm/s)	2,3E-05 - 3,0E-06	3,5E-04	2,9E-04
Pedregulho (%)	2	0	0,5
Areia (%)	76	67	84,5
Silte (%)	18	21	13
Argila (%)	4,5	12	2

de textura areno siltosa, com presença de argila e grãos angulosos de quartzo, de diâmetro mediano a grosso, espessuras de 0,6 a 2,5 metros, e blocos de granitos (individualizados por famílias de fraturas) em matriz argilosa.

MATERIAIS INCONSOLIDADOS TRANSPORTADOS

STTgr São encontradas nas encostas na forma de talús com blocos arredondados de granito acinzentado, de textura areno-argilosa com vestígios de pedregulhos e silte. Apresentam médias espessuras com variações de 4 a 12 metros.

STTgp São talús com blocos angulosos de biotita gnaisse e de textura areno-siltosa, com vestígios de argila e pedregulho. A distribuição granulométrica é dada por: 2% de pedregulho, 79,5% de areia, 15% de silte, 3% de argila. Com espessuras variando de 10 a 20 metros e, com grande variação de dimensões de blocos.

STTgg Caracterizados por talús com blocos angulosos de migmatito, de textura areno-argilo-siltosa com vestígios de pedregulho. A distribuição granulométrica é dada por: 1,5% de pedregulho, 61% de Areia, 17% de silte e 20,5% de argila, e apresentam espessuras com variações de 1,5 a 7 metros, e variação grande dimensão de blocos.

STTm São talús com mistura de blocos arredondados e angulosos de diferentes litologias, de textura areno

argilo-siltosa com vestígios de pedregulho, com 1% de pedregulho, 49% de areia, 24% de silte e 26% de argila, espessuras variando de 3 a 10 metros e dimensões variadas de blocos.

STT/Carg São talús com cobertura coluvionares, de textura argilo-areno-siltosa, de médias espessuras variando de 3 a 13 metros. E presença de blocos de dimensões medianas ($\approx$ 1m de comprimento, 1,5m de largura, 0,7m de altura).

STCarg São formados por material coluvionar, de textura argilo areno-silto-arenosa, de espessuras médias de 20 metros. Não foi registrado nenhum evento de movimento de massa nestes tipos de materiais inconsolidados.

Colúvio-Aluvionar Depósitos de planície de inundação constituídos por areias feldspáticas, bancos e lentes de argila e níveis de cascalho.

Na tabela 6 encontram-se características geotécnicas de alguns materiais inconsolidados transportados.

A partir dos dados de campo e dos mapas de substrato rochoso e de materiais inconsolidados foram elaborados perfis (Fig. 8) com a distribuição espacial, permitindo observar a variação vertical e lateral dos diferentes materiais geológicos.

Figura 8 - Perfis verticais com a distribuição dos materiais geológicos.

Mapa de Inventário O inventário (Fig. 9) foi desenvolvido de acordo com a proposta da WP/WLI (1990), que aborda aspectos de classificação, dimensão e loca-

lização dos movimentos de massa gravitacionais, entre outros constantes da tabela 2.

Foram identificadas e caracterizadas 140 fei-

Tabela 6 - Resultados dos ensaios para os Materiais inconsolidados transportados.

	STTgg	STTm	STTgp
γ campo(kN/m ³)	15,22 – 17,60	16,41 – 17,81	13,40 – 16,06
γ_d campo(kN/m ³)	13,19 – 15,08	12,65 – 13,62	12,04 – 14,18
γ_s (kN/m ³)	28,43	28,16	27,79
e	0,88 - 1,15	1,07 - 1,23	0,96 - 1,31
n	0,47 – 0,53	0,52 – 0,56	0,49 – 0,57
Wm(%)	15,35 - 15,32	29,80 - 31,58	10,79 - 13,28
θ (%)	20,26 - 27,31	39,73 - 48,71	13,75 - 18,84
Sr (%)	37,80 - 53,70	68,40 - 81,19	23,91 - 38,46
Φ (°)	27	26	-
C(kPa)	34	48	-
Φ_r (°)	34	37	-
Cr(kPa)	13	9	-
K_{20} (cm/s)	7,4E-07	5,6E-07	5,4E-04
Pedregulho (%)	1,5	1	2
Areia (%)	61	49	79,5
Silte (%)	17	24	15
Argila (%)	20,5	26	3

Figura 9 - Mapa de Inventário de Movimentos de Massa Gravitacionais.

ções de movimentos de massa gravitacionais, e classificadas de acordo com Varnes (1978) e Hutchinson (1988) como: 3 fluxos, 10 rastejos, 19 escorregamentos translacionais de solo e rocha, 33 pontos de rolamento, 57 escorregamentos translacionais em solo, 7 pontos de quedas de blocos, 3 escorregamentos translacionais em rocha e 8 escorregamentos só possíveis de serem identificados em fotografia aérea devido a falta de acesso. Obteve-se relação de 3,16 eventos por km², quando considerando somente a extensão ocupada por encosta de 41,3 km².

Quanto à área (Fig. 10), cerca de 46,5% dos

eventos possuem menos que 50m², 25% entre 100-1000m², 16% entre 50-100 m² e 11% dos eventos com mais de 1000m². Enquanto em termos de volume de material mobilizado (Fig. 10) 36,8% mobilizaram menos de 50m³, 23% acima de 1000m³ e o restante entre 100 e 50m³. Os rastejos, as quedas e os rolamentos foram retirados da análise de área e volume de movimentos de massa gravitacionais, porque são difíceis de serem definidos nos casos de rastejos e nos casos das quedas e rolamentos estes teriam que ser analisados em termos de blocos de rocha. Na figura 11 encontra-se a distribuição das feições em termos das deferentes alti-

Figura 10 - Frequência dos movimentos de massa gravitacionais quanto às áreas (A) e volumes (B).

Figura 11 - Frequência das feições em relação às variações de altitudes.

tudes. Observa-se o predomínio dos escorregamentos translacionais em rocha e solo, rolamentos e rastejos em altitudes menores que 100m. por outro lado, é possível observar que a ocorrência é muito pequena nas zonas com altitudes superiores a 700m.

ANÁLISES Considerando a chuva como deflagrador é possível verificar alguns aspectos que devem ser avaliados até com maior importância que a relação intensidade e acumulados, que é o elevado número de dias consecutivos de chuva no mês, com um período extremo de 20 dias consecutivos (3/1996), seguido de dois eventos de 18 dias consecutivos (3-4/1991, 11-12/1997). Estas chuvas mesmo de baixa intensidade infiltram-se na sua totalidade, conseqüentemente provocando uma diminuição significativa nos parâmetros de resistência, como a coesão. Como exemplo, o material inconsolidado residual de biotita gnaiss com umidade gravimétrica de 19,57% que apresentou um valor de coesão de 26,5 kPa e ângulo de atrito interno de 32°, em condições de campo e, quando inundada a amostra apresentou uma umidade gravimétrica de 45,56% houve uma queda da coesão para 13 kPa e seu ângulo de atrito interno foi de 31°. Apesar da perda de coesão pequena, é o suficiente para condição de instabilização como constatado por Ahrendt (2005).

As feições estão distribuídas em relações as litologias com cerca de 47% nas áreas de ocorrência dos litotipos biotita gnaiss e migmatito, porém em termos de frequências de eventos por área, o migmatito apresenta 7,53 eventos por km² e o biotita gnaiss 2,62 eventos por km². Ressalta-se que a combinação da esfoliação esferoidal com a foliação principal ou/e famílias

de fraturas, no biotita gnaiss propicia condições para quedas, e posteriormente, rolamentos.

Na figura 12 encontra-se a distribuição das feições e a frequência para as 229 unidades de forma de terreno, considerando as 9 classes.

Quanto à declividade a distribuição e frequência dos eventos encontram-se na figura 13.

A figura 14 apresenta a distribuição e frequência das feições para cada material inconsolidado.

Na figura 15 encontra-se a distribuição das feições por classes de direção de mergulho das encostas e a frequência de feições por km² das classes.

A grande maioria dos movimentos de massa gravitacionais ocorre em áreas de Mata Atlântica (71%), 22% em pastagens e 7% em áreas urbanas, destacando-se nas pastagens os escorregamentos translacionais em solo com 43,9%. Quanto as atividades antrópicas, cerca 49% não sofreram influência antrópica, O maior destaque é a Rodovia Rio-Santos com 27%.

Os fluxos estão associados aos escorregamentos translacionais de rocha e solo em elevadas altitudes, em partes com diversos canais de drenagem que se unem em um principal, tendo assim grande volume de água que facilita o transporte dos materiais geológicos deslocados pelos escorregamentos.

Os rastejos estão associados aos depósitos de talus associados a zonas de acúmulos de água, e declividades entre 20-30°.

As quedas estão associadas porções onde ocorre afloramento rochoso, e nestes, individualizações de blocos de diferentes dimensões, por fraturas, foliação e juntas de alívio, que deslocam-se até zonas de menores declividades em altitudes inferiores, e de onde ocorrem

Figura 12A - Distribuição das feições por classe de forma de encosta.

Figura 12B - frequência de eventos por km² para as classes de forma de encosta.

Figura 13 - Distribuição das feições por classe de declividade (A) e frequência dos tipos de feições por classe de declividade (B).

Figura 14 - Distribuição das feições por tipo de material inconsolidado (A) e frequência de feições por km² para os tipos de materiais inconsolidados (B).

os rolamentos em seguida ou após longos períodos.

Os escorregamentos translacionais envolvendo solos e rochas ocorrem principalmente em condições onde estruturas das rochas estão preservadas na porção alterada e recobertas por pacotes de pequena espessura

de materiais inconsolidados.

Os escorregamentos translacionais em solo ocorrem principalmente envolvendo o material inconsolidado residual maduro tendo como superfície de deslocamento a descontinuidade entre o mesmo e

Figura 15 - Distribuição das feições por classe de direção de mergulho da encosta (A) e frequência de tipos de feições para cada classe direção de face da encosta (B).

o nível saprolítico. Normalmente, tem início com uma superfície de ruptura circular, devido à homogeneidade do material inconsolidado residual maduro, e progride para uma superfície planar quando encontra a camada mais resistente, ou seja, o topo do saprólito.

CONCLUSÃO Os procedimentos de mapeamento geotécnico e fotointerpretação utilizados mostraram-se eficientes na obtenção dos atributos e no registro das feições.

As feições registradas na área estão associadas em sua grande maioria a encostas do tipo côncavacô-

cava, retilínea-côncava e retilínea-retilínea; e aos materiais inconsolidados Residual Maduro (SRMgp) do biotita gnaiss, Residual Maduro (SRMm) do migmatito, Residual Jovem (SRJm) do migmatito, e os transportados (STTgp - tálus) e o (STTgg - tálus) e (STTm - tálus). Cerca de 62% das feições apresentam extensões menores que 100m², e quanto ao volume de material geológico mobilizado 23% têm valores maiores que 1000m³. A maioria das feições ocorre entre 20° e 50° de declividade, em encostas voltadas para sul e sudeste.

Referências

- Ahrendt A. 2005. *Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos dos Jordão - SP*. São Carlos, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 360 p.
- Ambalagan R. 1992. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology*, **32**:269-277.
- ANA 2006. Dados pluviométricos. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acessado em outubro de 2006.
- Baeza C. & Corominas J. 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Process and Landforms*, **26**: 1251-1263.
- Carrara A. 1983. Multivariate models of landslide hazard identification. *Mathematical Geology*, **15**(3):403-426.
- Carrara A., Cardinali M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui V., Reichenbach P. 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surfaces Processes and Landforms*, **16**:427-445.
- Crozier M.J. 1989. *Landslides: Causes, Consequences and Environment*. London, Routledge, 252 p.
- D'orsi R., D'ávila C., Ortigão J.A.R., Dias A., Moraes L., Santos M. D. 1997. Rio-Watch: The Rio de Janeiro Landslide Watch system. In: Panamerican Symposium of Landslides & COBRAE, 2, Rio de Janeiro, *anais*, v. 1, p. 21-31.
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, **31**:181-216.
- Hutchinson J.N. 1988. General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology. In: International Symposium on Landslides, 5th, Lausanne, *abstract*, v.1, p. 3-35.
- Irigaray, C., Chacón, J. & Fernández, T. 1996. Comparative analysis of methods for landslide susceptibility mapping. In: Chacón, Irigaray & Fernández (eds.). *Landslides*. Balkema, Rotterdam, p. 163-171.
- Irigaray C., Chacón J., Fernández T. 1996. Comparative analysis of methods for landslide susceptibility mapping. In: Chacón, Irigaray & Fernández (eds.) *Landslides*. Rotterdam, Balkema, p.163-171.
- ISRM 1983. *Suggested Method for Rock Characterization Testing and Monitoring*. Published for International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press, 211p.
- Rodrigues B.B. 2003. *Proposta de sistemática para tomada de decisão relativa a movimentos de massa gravitacionais: aplicação em Ouro Preto (MG)*. Rio Claro, Tese de Doutorado, UNESP/Rio Claro, 550p.
- Rodrigues B.B. & Zuquette L.V. 2006. Construção de cartas predisponentes a escorregamento em áreas urbanas usando rotina de apoio a decisão”. In: Congressos Nacionais de Geotecnia, 10, Lisboa, *atas*, v. 3, p.669-680.
- Ruhe R.V. 1975. *Geomorphology: geomorphic processes and superficial geology*. Boston, Houghton Mifflin, 246p.
- Turner A.K. & Schuster R.L. 1996. Landslides Investigation and Mitigation. In: ____ (eds.) *Special Report 247*. Transportation Research Board, p. 36-75.
- Turner A.K. & Schuster R.L. 1996. Landslides Investigation and Mitigation. In: ____ (eds.) *Landslides Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247, p. 36-75.
- Varnes D.J. 1978. Slope Movement: Types and processes. In: Schuster R.L. & Krizek R.J.(eds.) *Landslides: Analysis and Control*. Transportation Research Board Special Report 176. Washington DC, National Academy of Sciences, p.11-33.
- WP/WLI - UNESCO Working Party on World Landslide Inventory 1990. A suggested method for reporting a landslide. *Bulletin International Association for Engineering Geology*, **41**:5-12.
- Wu T.H., & Abdel-Latif M.A. 2000. Prediction and mapping of landslide hazard. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(4):781-795.
- Zuquette L.V. 1993. *Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: Fundamentos e guia para elaboração*. São Carlos, Tese de Livre Docência, USP/EESC, 330p, 2v.

Manuscrito AE 081/2006

Submetido em 16 de março de 2007

Aceito em 01 de dezembro de 2007