

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/10: 2063-2082
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ANÁLISE FISIAGRÁFICA, A PARTIR DE TÉCNICAS DE FOTOINTERPRETAÇÃO, APLICADA AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE OBRAS RODOVIÁRIAS

*Physiographic Analysis Applied to Road Geotechnical Mapping:
A Photointerpretation Approach*

**Juliano Oliveira Martins Coelho¹, José Eduardo Zaine²
& Flávio Henrique Rodrigues³**

¹Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN
Coordenação-Geral de Operações e Modelagens/Divisão de Monitoramento e Alertas
Avenida Doutor Altino Bondensan, n° 500 – Distrito de Eugênio de Melo – São José dos Campos – SP, Brasil
juliano.coelho@cemaden.gov.br

²Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho – UNESP
Instituto de Geociências e Ciências Exatas /Departamento de Geologia Aplicada
Avenida 24 A, n° 1515. CEP: 13506-900. Rio Claro – SP, Brasil
jezaine@rc.unesp.br

³Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho – UNESP
Instituto de Geociências e Ciências Exatas /Pós-Graduação em Geociências
Avenida 24 A, n° 1515. CEP: 13506-900. Rio Claro – SP, Brasil
rodrigues.ambiental@gmail.com

Recebido em 5 de Setembro, 2015/Aceito em 11 de Outubro, 2016
Received on September 5, 2015/Accepted on October 11, 2016

RESUMO

As obras rodoviárias instaladas nos planaltos cristalinos da serra do Mar apresentam problemas geotécnicos recorrentes, envolvendo principalmente erosões aceleradas e movimentos de massa nos taludes de corte. Os estudos geológico-geotécnicos podem ser aplicados na conservação das obras rodoviárias já instaladas e no planejamento das obras futuras, contribuindo com a redução dos custos de manutenção da via e evitando o desenvolvimento de movimentos de massa. Esta pesquisa apresenta uma sistemática de mapeamento geológico-geotécnico na escala de 1:10.000, realizado a partir da análise fisiográfica, com o uso de técnicas de fotointerpretação e campanhas de campo, com o objetivo avaliar a suscetibilidade do meio físico ao desenvolvimento de instabilidades em taludes de corte de empreendimentos rodoviários. A sistemática de mapeamento aqui apresentada considerou principalmente as propriedades do meio físico: ruptibilidade; tropia; forma de encosta; forma de topo; forma de vale; declividade; altimetria; padrão e densidade de drenagem, permitindo inferir o comportamento geotécnico dos materiais constituintes dos compartimentos cartografados. O mapeamento identificou oito unidades fisiográficas e as maiores convergências de evidências desfavoráveis à estabilidade de taludes foram identificadas nas unidades IV, V, VI e VIII e nos setores onde os lineamentos estruturais interceptam o traçado da rodovia, representando descontinuidades paralelas, oblíquas ou perpendiculares aos taludes de

corte. As informações e produtos obtidos nesta pesquisa oferecem subsídios para o planejamento e gestão de rodovias na área de estudo e podem servir de referência para estudos de maior detalhe, como sondagens e outros ensaios geotécnicos.

Palavras chaves: Obras Lineares, Instabilidade de Taludes, Fotointerpretação, Cartografia Geotécnica.

ABSTRACT

The instability of natural and built slopes is a recurrent problem on the plateaus of Serra do Mar, east of São Paulo State, Brazil, fostering a diversity of studies concerning slope instability. The road works installed on these plateaus present recurrent geotechnical problems, involving accelerated erosions and landslides on cut slopes. The geological and geotechnical studies can be applied to conservation of already installed works and to plan future ones, contributing to the reduction of road maintenance costs and avoiding the development of landslides that may limit or prevent the vehicles traffic, put road users at risks and cause significant environmental impacts. This research presents a systematic geotechnical mapping in 1:10.000 scale, conducted from photo interpretation techniques allied to field works, aiming to evaluate the susceptibility of the physical environment to the development of instabilities on cut slopes of road projects. The mapping systematic here presented mainly considered the properties: frangibility, entropy, slope form, top form, valley form, declivity, altimetry, pattern and density of drainage, allowing infer the geotechnical behavior of the constituent materials of the mapped compartments. The structural lineaments were also mapped, allowing the analysis of the structural conditioners of road slopes instability, showing themselves important indicators of the geometrical relations between the discontinuities of rock masses and the slope faces. The largest convergences of unfavorable evidences to slope stability were identified in the I, IV, V, VI e VIII zones and in the sectors where the structural lineaments intercept the road route, representing parallel, oblique or perpendicular discontinuities to the cut slopes. The information and products obtained in this research offered subsidies for planning and management of roads in the study area and may serve as reference for studies of greater detail.

Keywords: Landslides, Photo Interpretation, Geotechnical Cartography.

1. INTRODUÇÃO

Os empreendimentos rodoviários podem causar impactos significativos ao meio ambiente, principalmente quando são realizados cortes e aterros de grande porte para corrigir a variação da topografia. Assim, em áreas de relevos acidentados, a construção de rodovias gera um número muito grande de intervenções no terreno, expondo taludes de até dezenas de metros de altura, favorecendo o desenvolvimento de processos erosivos acelerados e movimentos gravitacionais de massa. Estes processos comprometem a integridade da via, colocam os usuários em risco, geram grandes custos de manutenção e podem causar impactos ambientais de grande monta.

Segundo Carvalho (1991) a conservação das rodovias desempenha um papel vital para permitir a operação contínua e eficiente da malha viária. Os projetos de manutenção devem ser eficientes para que os custos de operação sejam minimizados, uma vez que os programas de manutenção possuem custos muito inferiores à execução de grandes obras de estabilização. Portanto, as atividades de estabilização de talude devem ter caráter principalmente preventivo,

impedindo o desenvolvimento de problemas de maior gravidade, atuando na solução das instabilidades enquanto elas ainda estão em estágio inicial.

Os mapeamentos geológico-geotécnicos contribuem significativamente com o conhecimento a respeito da instabilidade dos taludes de obras rodoviárias. O conhecimento adquirido com tais estudos pode ser aplicado na conservação das obras já instaladas e no planejamento das obras futuras, agindo na prevenção de eventos de movimentos de massa e erosão acelerada.

Nos planaltos da serra do Mar os problemas de manutenção das vias são recorrentes, fomentando uma diversidade de estudos sobre a instabilidade das encostas. Neste contexto, os planaltos de Paraibuna e do Paraitinga, no Estado de São Paulo, constituem uma área favorável ao estudo da estabilidade de taludes, pois suas rodovias estão dispostas em terrenos montanhosos e com uma grande presença de cortes em rochas cristalinas, muitas vezes em um estágio de alteração intempélica avançado. Nestas rodovias são muito frequentes os deslizamentos de terra e as quedas de blocos, assim como o desenvolvimento de sulcos e ravinamentos profundos que demandam

investimentos constantes na conservação dos taludes.

1.1 Fotointerpretação aplicada ao mapeamento geológico-geotécnico

Dentro dos estudos geológico-geotécnicos, as técnicas de fotointerpretação se destacam por atingirem resultados importantes, principalmente nas fases de identificação, inventário e dimensionamento das instabilidades de talude. Estes estudos permitem a caracterização do meio físico, contribuindo com a definição do modelo fenomenológico envolvido na instabilidade dos taludes.

O princípio metodológico de fotointerpretação aqui utilizado tem origem na proposta de Guy (1966), que desenvolveu um método de fotointerpretação sistemático, codificado e lógico. No Brasil, esta metodologia foi introduzida por Guy e Rivereau em cursos de fotointerpretação, publicados por Rivereau (1969) e Rivereau (1972). Soares e Fiori (1976) organizaram e adaptaram esta metodologia para aplicação em mapeamentos geológicos a partir de fotografias aéreas, assim como Soares *et al.* (1978) e Veneziani e Anjos (1982), os quais apresentam trabalhos de fotointerpretação com o uso de imagens de satélite.

Segundo Soares e Fiori (1976), o método é constituído por três fases distintas:

- Fotoleitura – que é o reconhecimento e identificação dos elementos nas imagens dos objetos correspondentes e sua repartição;
- Fotoanálise – que é o estudo das relações entre as imagens e a realização de associações e ordenação das partes da imagem;
- Fotointerpretação – que é o estudo da imagem visando a descoberta e a avaliação do significado, função e relação dos objetos por métodos indutivos, dedutivos e comparativos.

Assim, neste método fotointerpretativo os dados são extraídos de maneira lógica e sistemática, fazendo com que se analisem na imagem as características de textura, estrutura e forma da feição, atribuindo-se a ela, na etapa de fotointerpretação, um significado geológico, de acordo com o objetivo da análise realizada. Com a aplicação desta técnica de interpretação, busca-se identificar os materiais, os fenômenos e os processos presentes na área estudada, alcançando

após a fotointerpretação um diagnóstico do meio físico que pode ser aplicado aos mapeamentos geológicos, pedológicos, geomorfológicos e também geotécnicos.

Entre os trabalhos que aplicam a fotointerpretação na análise do meio físico e que partem do proposto por Soares e Fiori (1976), podemos destacar:

- Mattos (1986), Ohara *et al.* (1996) e Zaine (2000) aplicaram esta sistemática no mapeamento geológico;
- Mattos *et al.* (1995), Mattos *et al.* (2004), Caetano (2001), Mattos *et al.* (2003), Ohara *et al.* (2004), Mattos *et al.* (2005), Caetano *et al.* (2006) e Silva & Mattos (2008) fizeram uso de técnicas de fotointerpretação no planejamento de obras rodoviárias;
- Coelho *et al.* (2010) Moura *et al.* (2011) e Moura *et al.* (2012) aplicaram estas técnicas de fotointerpretação na identificação da fragilidade ambiental, com identificação de áreas de instabilidade geológico-geotécnica em faixas de dutovias.

Também partindo do proposto por Soares e Fiori (1976), os trabalhos de Zaine (2000) e Zaine (2011) propuseram uma metodologia de mapeamento do meio físico para o planejamento urbano, realizado a partir de fotointerpretação. Os critérios fotointerpretativos propostos pelo autor foram sintetizados num quadro analítico que permite que sejam feitas inferências sobre o comportamento geológico-geotécnico dos materiais presentes nos compartimentos fisiográficos, obtidos por fotointerpretação.

Para estudos de planejamento de obras rodoviárias é muito favorável o uso de produtos de sensoriamento remoto e técnicas de fotointerpretação, principalmente devido à sua característica sinóptica, permitindo que sejam obtidas informações sobre o meio físico, em grandes áreas e com custo relativamente baixo.

A aplicação de técnicas de fotointerpretação no estudo da influência das estruturas geológicas na estabilidade dos taludes de cortes de estradas foi utilizada por Riedel *et al.* (1995) e Riedel *et al.* (1996), em estudo realizado nos planaltos cristalinos da região de Atibaia – SP. Seus resultados corroboram com os resultados de Hoek e Bray (1981) e demonstram que no caso de taludes construídos em cortes de estradas é extremamente significativa a geometria formada

entre o corte da estrada e as estruturas da rocha, devendo esta geometria ser favorável à estabilidade do talude.

Caetano *et al.* (2001) também aplicaram técnicas de interpretação de produtos de sensoriamento remoto para o planejamento de traçados de rodovias na região do Vale do Paraíba do Sul. Seus resultados permitiram a definição de setores de viabilidade de traçado de estradas, representando setores favoráveis ou com restrição ao traçado das rodovias.

Rodrigues e Zaine (2014) utilizaram fotografias aéreas no mapeamento geológico-geotécnico da estrada de castelhanos, no município de Ilhabela - SP, a partir da metodologia proposta por Zaine (2011), combinando técnicas de fotointerpretação, campanhas de campo e análise de produtos topográficos. Os principais resultados consistiram na caracterização dos materiais rochosos e processos geológicos presentes na estrada e na setorização da estrada em oito trechos diagnósticos, identificados a partir de suas propriedades geológico-geotécnicas e conseqüentemente da suscetibilidade ao desenvolvimento de movimentos de massa e processos de erosão acelerada.

Assim, os estudos geológico-geotécnicos aplicados à avaliação do meio físico, com base nas metodologias supracitadas, podem ser aplicados na análise da instabilidade de taludes rodoviários, no inventário de processos erosivos, na compartimentação e caracterização do meio físico e na avaliação da potencialidade do terreno ao desenvolvimento de processos erosivos e movimentos de massa.

1.2 Objetivo

A presente pesquisa teve como objetivo desenvolver e aplicar uma metodologia de mapeamento geológico-geotécnico, a partir de técnicas de fotointerpretação e campanhas de campo, que permita a avaliação da aptidão do terreno à implantação de empreendimentos rodoviários.

Para atingir o objetivo geral, foram atingidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma sistemática de mapeamento geológico-geotécnico para identificar a aptidão dos terrenos à intervenção por obras rodoviárias;

- Aplicar a sistemática de mapeamento em uma área de estudo com recorrência de instabilidades de taludes rodoviários;

- Avaliar a aptidão dos terrenos à intervenção por obras rodoviárias, identificando as áreas de maiores e menores estabilidades de taludes.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi escolhida principalmente em função da diversidade de processos de movimentos de massa presentes em taludes de corte de rodovias. No entanto, os aspectos do meio físico apresentados nesta sessão, também foram de grande relevância na escolha da área de estudo, por serem condicionantes da instabilidade de taludes naturais e de corte.

2.1 Localização

A área de estudo está localizada na porção leste do Estado de São Paulo, Brasil, na região conhecida como Médio Vale do Paraíba do Sul (Figura 1). A rodovia escolhida para a aplicação da metodologia foi a rodovia Oswaldo Cruz (SP – 125) que liga os municípios de Taubaté e Ubatuba, representando uma importante conexão entre a bacia de Taubaté e a baixada litorânea.

A área escolhida para realizar o mapeamento é representada por um *buffer* de 2 km a partir da rodovia, em um dos trechos mais críticos para movimentos de massa. Os limites norte e sul do recorte espacial estudado são compatíveis com a articulação da Carta Internacional do Mundo.

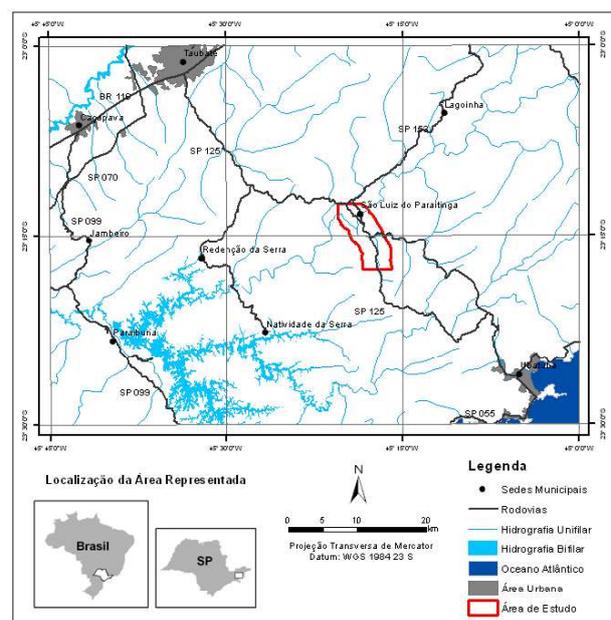


Fig. 1 - Localização da área de estudo.

2.2 Litologias

A seguir são descritas as principais litologias presentes na área de estudo, pertencentes aos grupos Açungui e São Roque.

2.2.1 Grupo Açungui

Na área de estudo, o grupo se limita a norte pelas falhas de Taxaquara, Monteiro Lobato e Jundiuvira e ao sul pela falha de Cubatão e o lineamento do Além-Paraíba. Hasui e Sadowski (1976) caracterizam estas rochas como complexos, denominando os migmatitos e gnaisses migmatizados como Complexo Embu e os metassedimentos como Complexo Pilar. O Complexo Embu correspondente aos níveis inferiores do Grupo Açungui e o Complexo Pilar corresponde aos níveis superiores deste Grupo (Figura 2).

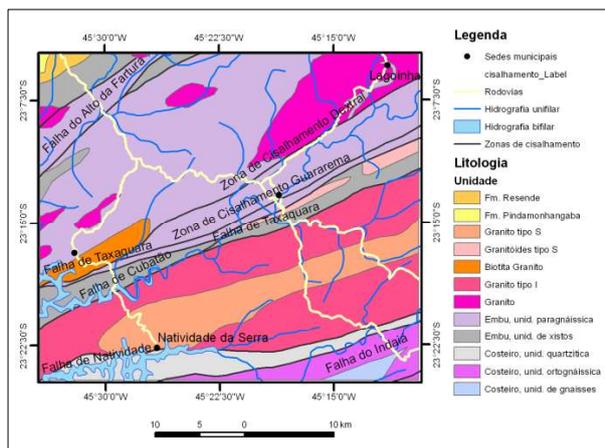


Fig. 2 - Mapa geológico da área de estudo, segundo CPRM (2006), em escala de 1:250.000 no original.

2.2.2 Grupo São Roque

O grupo São Roque é limitado a norte pelas falhas de Itu e Jundiuvira, a sul pela falha de Taxaquara e a leste-nordeste pela cunha que se forma pelas falhas de Monteiro Lobato e Jundiuvira. É representado por metassedimentos, constituídos por metapelitos, metapsamitos, rochas carbonáticas, metabasitos e uma sequência migmatítica com estruturas diversas. Idades radiométricas indicam valores em torno de 640 M.a. para os metassedimentos e rochas graníticas intrudidas, propondo assim idade brasileira (IPT, 1990).

2.2.3 Rochas Granitóides

A maior parte do embasamento cristalino paulista está relacionada às rochas granitóides, sendo identificadas várias suítes de acordo com a sua estruturação interna e maior ou menor relação temporal ou geográfica com as grandes estruturas que compartimentam a região, sendo classificados em sin, tardi, ou pós-tectônicos. Na área do Alto-médio Paraíba do Sul são encontrados somente corpos graníticos classificados como sintectônicos, subdivididos em fácies Migmatítica e fácies Cantareira (HASUI *et al.*, 1978). Segundo os autores, a maior parte das rochas granitóides está associada aos pacotes supracrustais do Proterozóico Superior e constituem diques, stocks e batólitos numerosos.

2.3 Estruturas Geológicas

As feições estruturais mais significativas na área de estudo são as zonas de cisalhamento destal, de larguras que podem ser quilométricas e comprimentos que chegam a centenas de quilômetros. Segundo Hasui *et al.* (1977) estas zonas de falha estiveram ativas até o fim do ciclo Brasileiro, com caráter transcorrente, produzindo uma estruturação em grandes blocos e se sujeitaram a falhamentos normais durante a Reativação Wealdeniana da Plataforma Sul Americana. As estruturas geradas compartimentam todo o embasamento cristalino, na forma de blocos com formas alongadas e sigmóides.

As principais zonas de falhas apresentam direções NE e são denominadas: Jundiuvira (HASUI *et al.* (1969); Buquira (CARNEIRO, 1977); Taxaquara (HENNIES *et al.*, 1967); Natividade e Alto da Fatura (CAVALCANTE & KAEFER, 1974).

Segundo Riccomini (1989) os principais sistemas de lineamentos na região são:

- Sistema ENE a E-W, paralelo às principais zonas de falha Pré-cambrianas, que tendem a dar a forma dos limites das bacias do Sistema de Rifts da Serra do Mar (SRSM).
- Sistema NNE, oblíquo aos eixos das bacias do SRSM, participando da compartimentação interna das bacias.
- Sistema NNW, sub-paralelo ao eixo das bacias do SRSM, controlando junto com o sistema NNE

os compartimentos internos das bacias.

-Sistema WNW, formando a Soleira de Queluz e Floriano-Barra Mansa.

2.4 Geomorfologia da área de estudo

Partindo da classificação proposta por Almeida (1964), a área de estudo está localizada na província geomorfológica Planalto Atlântico e estão presentes na área as zonas Planalto do Paraitinga e Médio Vale do Paraitinga. Segundo Almeida (1964) o Planalto do Paraitinga se apresenta como um planalto cristalino muito dissecado, cujo rebordo sul é representado pela serra do Mar e seu limite norte corresponde ao divisor de águas das bacias dos rios Paraitinga e Paraibuna. Predominam relevos de espigões com cimos ondulados e traçados sinuosos orientados segundo os lineamentos estruturais.

A drenagem escoar no sentido do reverso continental da serra do Mar, e seu padrão de drenagem é muito diversificado, desenvolvido em vales estreitos sem planícies aluviais marcantes e com presença de corredeiras devido à alta declividade. Os rios principais adotam orientação ENE, se adaptando às faixas de gnaisses menos resistentes e de micaxistos, representando também em seus pequenos cursos adaptação às direções de fratura NNW.

2.5 Principais tipos de solos

Estão presentes na área de estudo as classes: cambissolo, latossolos vermelho-amarelos e gleissolos (EMBRAPA, 1979):

2.5.1 LVA15

Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa + Cambissolos Háplicos distróficos, textura argilosa e média, ambos A moderado e A proeminente, relevo forte ondulado.

2.5.2 CX7

Cambissolos Háplicos distróficos textura média e argilosa, relevo montanhoso e forte ondulado + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa, relevo forte ondulado, ambos A proeminente e A moderado.

2.5.3 CX12

Cambissolos Háplicos distróficos textura média e argilosa + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa, ambos A moderado e A proeminente, relevo forte ondulado.

2.5.4 GM

Gleissolos Melânicos distróficos Tb textural. argilosa + Neossolos flúvicos Tb text. média + Organossolos Distróficos, todos em relevo de várzea.

2.6 Clima

Segundo Conti (1975), a gênese das chuvas na região leste do Estado de São Paulo é eminentemente frontal, no entanto o relevo é muito importante como elemento orientador da distribuição regional do fenômeno pluvial. O autor demonstra que a distribuição das precipitações reflete a orografia regional e constata que o efeito orográfico na precipitação se enfraquece quando a trajetória da corrente polar é SW-NE, por coincidir com a orientação do relevo. Em tais condições o ar frio penetra nos fundos dos vales, orientados segundo a sua trajetória, provocando instabilidade local nos vales em detrimento das cristas.

Na Figura 3 é apresentado o pluviograma do município de São Luiz do Paraitinga, obtido a partir das médias históricas de precipitação e temperatura, referente às Normas Climatológicas do Brasil (INMET, 2009), que compreende o período de 1961 a 1990.

A partir do pluviograma de São Luiz do Paraitinga podemos observar que a distribuição das chuvas é bastante uniforme na área de estudo, com o período de maior pluviosidade nos meses mais quentes (dezembro, janeiro e fevereiro) com cerca de 200 mm, e de menor pluviosidade nos meses mais frios (junho, julho e agosto) ficando abaixo de 50 mm. A exceção é o município de Ubatuba, onde a precipitação é mais elevada e no período mais seco fica em torno de 100 mm e do mais chuvoso acima de 250 mm.

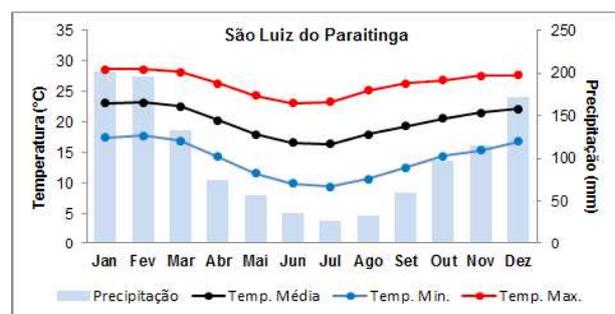


Fig. 3 - Pluviograma do município de São Luiz do Paraitinga.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise fotointerpretativa foi realizada em fotografias aéreas e ortofotos na escala de 1:10.000, com o auxílio de campanhas de campo, com critérios definidos por Vedovello e Mattos (1998), Zaine (2000), Zaine (2011) e Rodrigues e Zaine (2014).

A primeira etapa do trabalho consistiu na extração da rede de drenagem e compartimentação do meio físico em Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs), a partir da identificação de diferentes densidades texturais. Após a análise das propriedades das UBCs e inferência de seu comportamento geotécnico foram definidas as Unidades Fisiográficas.

Nesta etapa do mapeamento foram utilizadas fotografias aéreas e ortofotos do projeto Mapeia São Paulo, da Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (Emplasa), cedidas sem ônus, na forma de outorga de uso das imagens, especificamente para esta pesquisa. As fotografias aéreas possuem resolução espacial de 0,45 metro e as Ortofotos possuem resolução de 1 metro. A aquisição das fotos aéreas se deu basicamente nos períodos mais secos de inverno, dos anos de 2010 e 2011. As fotografias aéreas originais tem superposição lateral de 60% e 30% entre as linhas de vôo e foram adquiridas em composição colorida (faixa visível do espectro eletromagnético).

Para a presente pesquisa foram obtidas 59 fotografias aéreas e 4 ortofotos recobrimdo todo o traçado da rodovia Oswaldo Cruz (SP-125). Destas fotografias aéreas, 15 foram utilizadas na etapa final do mapeamento, cada uma abrangendo uma área de 3,7 x 5,6 km, ou seja, uma área de 20,7 km² em cada foto, recobrimdo um *buffer* de 2 km do traçado da rodovia SP-125, do km 39+250 ao km 51 + 900.

Para produzir as imagens impressas, as fotografias aéreas em formato digital foram inseridas no banco de dados e georreferenciadas. Foi então gerado um mosaico e definido um plano de vôo simulado, de modo a ajustar a articulação das fotos, originalmente na escala de 1:2.500, para a escala 1:10.000, gerando 16 pares de fotos, com 100% de sobreposição, cada um recobrimdo 1,6 x 2,3 km, numa área total de 3,7 km² cada foto.

As fotografias aéreas foram impressas

em papel fotográfico na escala de 1:10.000, equivalente ao tamanho A4, organizadas na forma de pares estereoscópicos. As ortofotos também foram impressas na escala de 1:10.000, em papel Glossy, para contribuir na fotointerpretação, dando uma visão de conjunto de toda a área de detalhe mapeada.

Com os produtos impressos foi realizada a interpretação das fotografias aéreas em estereoscópio de mesa, de espelho, modelo Opto EM-2. Assim, a partir das técnicas de fotointerpretação, foi realizada a análise do meio físico nos compartimentos mapeados, segundo as propriedades: densidade textural; amplitude; declividade; ruptibilidade; tropia e a formas de encosta, formas de vale e formas de topo.

As cartas interpretativas resultantes foram digitalizadas e georreferenciadas pela borda, formando um novo mosaico. As cartas foram então vetorizadas e o produto da vetorização foi novamente georreferenciado, de modo a atingir um ajuste mais refinado, com cerca de 150 pontos de referência por carta vetorizada. Finalizado o georreferenciamento, foram realizados os ajustes de borda, compatibilizando as 16 diferentes cartas e em um único produto.

Após um novo trabalho de campo, para avaliação e complementação do mapeamento, foi iniciada a elaboração do Mapa de Unidades Fisiográficas, a ser aplicado ao planejamento de empreendimentos rodoviários. Na finalização do processo de mapeamento sistemático foi realizada a análise dos resultados, identificando os setores mais críticos e suscetíveis ao desenvolvimento de instabilidades em taludes rodoviários.

Os critérios fotointerpretativos utilizados na etapa de mapeamento de detalhe são apresentados a seguir.

3.1 Critérios fotointerpretativos do mapeamento

A fotointerpretação partiu dos critérios propostos por Zaine (2011) e seguiu as seguintes etapas:

- Extração da rede de drenagem;
- Análise das estruturas geológicas, tais como traços de fratura, foliação e lineamentos estruturais;
- Análise das formas e características do relevo;
- Identificação de feições particulares, tais como processos erosivos e anomalias;

- Delimitação de UBCs, por diferentes densidades texturais, padrões de relevo;
- Análise das propriedades das UBCs;
- Realização de inferências geotécnicas.
- Classificação das UBCs e definição das Unidades Fisiográficas.
- Cartografia de Síntese.

A análise das propriedades do meio físico fotointerpretadas, a classificação das UBCs em Unidades Fisiográficas e de suas propriedades geológicas e geomorfológicas seguiram os critérios apresentados a seguir.

3.1.1 Densidade Textural

A densidade textural foi analisada pela distribuição em área dos elementos de relevo e drenagem, sendo classificada da seguinte forma:

- Baixa – relevo de textura lisa e drenagem de 0 a 5 canais /10 km²
- Média – relevo de textura média e drenagem de 5 a 30 canais /10 km²
- Alta – relevo de textura rugosa e mais de 30 canais /10 km²

Além de representar a dissecação do relevo, a densidade textural permitiu inferir a permeabilidade intergranular do material, sendo aplicada principalmente na identificação da relação escoamento superficial/infiltração e nos indica ainda a espessura do manto de alteração.

3.1.2 Amplitude do relevo

A amplitude do relevo se refere à diferença altimétrica entre o topo das feições de relevo e o fundo de vale adjacente, sendo classificada da seguinte forma:

- Pequena – diferença altimétrica de 0 a 100 m;
- Média – diferença altimétrica de 100 a 300 m;
- Grande – diferença altimétrica de mais de 300 m.

3.1.3 Declividade

A declividade é a inclinação das encostas, expressa pela porcentagem entre altura e comprimento da base da uma determinada rampa. A declividade foi classificada da seguinte forma:

- Baixa – de 0 a 15%;
- Média – de 15 a 30%;
- Alta – maior que 30%.

3.1.4 Forma da encosta, dos vales e dos topos

A forma de encosta é a forma geral do perfil de uma vertente, classificadas como côncava, retilínea ou convexa.

A forma de vale indica o quanto os canais de drenagem se encontram encaixados no relevo, normalmente em função da resistência dos materiais e/ou da juventude do relevo, e foi classificada como forma de vales abertos ou de vales fechados.

A forma dos topos também representa a resistência dos materiais, a juventude ou senilidade do relevo ou a disposição de camadas sedimentares ou estruturas geológicas. Assim, os topos foram classificados em aplainados, arredondados ou angulosos.

A análise das características do relevo, amplitude, declividade e formas de encosta, de vale e de topos, permitiu que fossem feitas interpretações sobre o comportamento dos materiais que resultaram nas feições de relevo analisadas, nos fornecendo informações geotécnicas tais como sua solubilidade e resistência à erosão.

Assim, a partir da análise de feições do relevo, foram depreendidas informações sobre o potencial erosivo das áreas mapeadas, indicando a sua potencialidade ao desenvolvimento de processos de movimento de massa e permitindo que fossem feitas inferências sobre o grau de escavabilidade dos materiais, a profundidade dos topos rochosos e a espessura dos materiais inconsolidados.

3.1.5 Tropia

A tropia é a orientação e alinhamento dos elementos de drenagem e de relevo, indicando a presença de um controle estrutural sobre estes elementos, quando se encontram orientados em determinadas direções preferenciais (isotrópicos). A tropia das unidades mapeadas foi classificada a partir dos seguintes critérios:

- Não orientado – elementos de relevo e drenagem sem direção preferencial (isotrópicos);
- Pouco orientado – elementos de relevo e drenagem organizados em três direções preferenciais;
- Orientado – elementos de relevo e drenagem

- organizados em duas direções preferenciais;
- Muito orientado – elementos de relevo e drenagem organizados em uma única direção preferencial.

A análise da tropia dos materiais rochosos permite que sejam realizadas inferências sobre a presença de planos de estratificação, de foliação ou de intenso fraturamento e ainda permite que sejam observadas as direções de tais estruturas. É possível que sejam feitas ainda inferências sobre a permeabilidade fissural e grau de fraturamento dos materiais.

No caso de movimentos de massa, a análise da tropia forneceu informações importantes sobre a partição de blocos e possibilidade de formação de cunhas pela intersecção de diferentes direções de descontinuidades, indicando a potencialidade ao desenvolvimento de movimentos gravitacionais de massa do tipo deslizamentos translacionais e em cunha e também ao desenvolvimento de movimentos de blocos.

3.2 Cartografia de Síntese

As informações obtidas com o mapeamento e as principais inferências geotécnicas foram sintetizadas no Mapa de Unidades Fisiográficas, em escala de 1:10.000, onde são apresentadas as potencialidades dos terrenos ao desenvolvimento de movimentos de massa e de processos erosivos acelerados em obras rodoviárias, com destaque à SP-125.

Os resultados obtidos nesta etapa do mapeamento podem subsidiar a escolha de pontos de detalhamento para realização de ensaios geotécnicos, permitindo que métodos cada vez mais detalhados de investigação sejam aplicados nas áreas definidas como prioritárias.

3.3 Campanhas de campo

Ao final de cada etapa de mapeamento foram realizadas campanhas de campo, com o objetivo de verificar a consistência dos mapeamentos realizados em escritório, complementá-lo e coletar novos dados e informações relevantes à interpretação das informações fotogeológicas.

Durante as campanhas de campo foram coletados dados de litologia, tipos de cobertura pedológica e características dos perfis de alteração. Foram ainda tomadas medidas estruturais dos maciços rochosos, com medição

da atitude de camadas, de planos de foliação e de fratura.

Os dados coletados em campo foram incorporados nos mapas sínteses e nas interpretações.

3.4 Mapeamento e Análise das Deformações Rúpteis e Dúcteis

A análise das deformações rúpteis e dúcteis a partir de critérios fotointerpretativos se fundamentou na análise de alinhamentos de drenagem e relevo, observados a partir de produtos de sensoriamento remoto, de cartas topográficas e de dados coletados em campo.

Antes de cada etapa do mapeamento foram mapeadas as estruturas geológicas, em produtos de escalas sucessivamente maiores, seguindo a sistemática de detalhamento progressivo.

As informações sobre estruturas dúcteis, tais como foliação e bandamento composicional, foram obtidas em campo, com o auxílio de bússolas do tipo Clar e Brunton.

O mapeamento de estruturas geológicas, realizado por fotointerpretação e atividades de campo, permitiu que fossem analisadas as propriedades tropia, grau de fraturamento e ruptibilidade/plasticidade dos materiais rochosos em diferentes escalas, e realizadas inferências sobre as características geotécnicas destes materiais.

3.4.1 Lineamentos Estruturais, Traços de Fratura e de Foliação

Os lineamentos estruturais representam descontinuidades no maciço rochoso que interceptam a superfície topográfica, condicionando a instalação da rede de drenagem e a esculturação do relevo. Os lineamentos estruturais foram identificados nas fotografias aéreas a partir das feições lineares de drenagem e de relevo, fortemente estruturadas, repetitivas e persistentes em área.

Os dados estruturais coletados em campo foram comparados com os dados obtidos por fotointerpretação e foram plotados em projeções estereográficas com o auxílio do *software* Open Stereo, permitindo a realização da análise da geometria de intersecção entre os planos de descontinuidades, oferecendo as seguintes informações:

- qual a participação dos planos de descontinuidade no desenvolvimento de movimentos de massa em

taludes de corte;

- quais as atitudes dos planos de descontinuidades condicionantes de movimentos de massa nestes taludes;

- qual a possibilidade de formação de movimentos de massa condicionados por planos de descontinuidade nos compartimentos mapeados;

- quais unidades são mais suscetíveis ao desenvolvimento de movimentos de massa condicionados por descontinuidades do maciço rochoso.

Com estas informações o mapeamento fotogeológico realizado pôde oferecer informações mais contundentes a respeito da instabilidade dos taludes rodoviários nas unidades fisiográficas mapeadas.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A compartimentação resultou em oito unidades fisiográficas, distribuídas longitudinalmente na direção geral NE, devido à organização e distribuição das unidades litológicas e estruturas geológicas, que estão condicionadas principalmente pelas zonas de falha orientadas entre N20E e N30E.

O resultado da classificação das unidades fisiográficas, realizada por fotointerpretação, é sintetizado no Quadro 1, onde podem ser observadas as propriedades do meio físico fotointerpretadas.

A partir das informações obtidas com a

classificação das unidades fisiográficas mapeadas, foram realizadas inferências sobre o comportamento geotécnico destas unidades, permitindo que fossem analisadas as características essenciais à instabilidade geotécnica e conseqüentemente à suscetibilidade ao desenvolvimento de movimentos de massa e erosões lineares. Os resultados das inferências geotécnicas são apresentados no Quadro 2.

A distribuição espacial e a classificação das unidades fisiográficas são apresentadas no Mapa Fisiográfico (Figura 4), com os resultados do mapeamento geológico-geotécnico realizado e o perfil topográfico longitudinal, onde fica evidente a diferença de energia do relevo de cada unidade, sua amplitude geral e a altitude máxima e mínima de cada unidade, no trecho representado pelo perfil.

4.1 Unidade I – Planícies aluviais

Esta unidade é formada principalmente por materiais inconsolidados, de textura arenosa com presença de lentes argilosas, representados por depósitos aluvionares, dispostos em amplas planícies de inundação de vales abertos, e por depósitos de preenchimento de vales fechados. As áreas pertencentes a esta unidade estão presentes em toda a área de estudo, recobrando os vales esculpido em unidades mais antigas, as quais fornecem material para sua formação (Figura 5A).

Quadro 1: Classificação das unidades fisiográficas

Unidade	Densidade textural	Amplitude	Decividade	Forma de encosta	Forma de vale	Forma de topo	Tropia
I	baixa	pequena	baixa	–	aberto	–	–
II	baixa	pequena	baixa	côncava	aberto	arredondado	–
III	baixa	pequena	moderada	mista	aberto	arredondado	pouco orientado
IV	alta	pequena	moderada	retilínea	fechado	arredondado	muito orientado
V	alta	média	moderada	retilínea	aberto	anguloso	orientado
VI	alta	média	alta	retilínea	fechado	anguloso	orientado
VII	moderada	média	moderada	mista	fechado	anguloso	pouco orientado
VIII	alta	forte	alta	retilínea	fechado	anguloso	pouco orientado

Quadro 2: Inferências geotécnicas das unidades fisiográficas

Unidade	Permeabilidade intergranular	Permeabilidade fissural	Escoamento superficial	Grau de fraturamento	Manto de alteração	Resistência à erosão linear	Potencial a movimentos de massa	Principais processos geológicos (condicionantes ambientais da rodovia)
I	alta	–	baixo	–	profundo	baixa	alto	Erosão laminar, recalque, solapamento, assoreamento e enchente
II	alta	baixa	médio	baixo	médio	baixa	moderado	Deslizamentos circulares rasos, rastejos, recalques e erosão linear
III	média	média	médio	médio	médio	média	moderado	Deslizamentos circulares profundos, rastejos e erosão linear
IV	baixa	alta	médio	alto	médio	alta	alto	Deslizamentos planares e em cunha, rastejos
V	baixa	alta	médio	alto	raso	alta	alto	Deslizamentos planares e em cunha, rastejos e erosão linear
VI	baixa	alta	alto	alto	raso	alta	alto	Deslizamentos planares, em cunha e de solos rasos, rastejo, erosão linear e movimentos de blocos
VII	média	média	médio	médio	médio	alta	moderado	Deslizamentos planares, em cunha e de solos rasos, rastejo, erosão linear e movimentos de blocos
VIII	baixa	alta	alto	alto	raso	alta	alto	Deslizamentos planares, em cunha e de solos rasos, rastejo, erosão linear e movimentos de blocos

O relevo desta unidade é plano, com variações de topografia apenas nas porções onde ocorre o desenvolvimento de terraços fluviais. Os solos presentes nestas unidades são das classes típicas de planícies aluviais, com destaque aos neossolos quartzarênicos e solos hidromórficos, tais como os gleissolos. Estas características resultam em uma unidade com comportamento geotécnico extremamente desfavorável à instalação de obras rodoviárias, devido à alta permeabilidade intergranular (exceto nas lentes argilosas), baixo escoamento superficial, baixa resistência à erosão linear e alta suscetibilidade ao desenvolvimento de recalques e de solapamentos de margens de rios.

A Unidade I também é desfavorável por estar sujeita às cheias periódicas e sazonais dos corpos d'água, uma vez que constituem a sua planície de inundação.

Na área compreendida por esta pesquisa a rodovia SP-125 não possui nenhum trecho instalado diretamente sobre esta unidade, uma vez que a transposição das planícies aluviais é feita por meio de aterros. Estes estão sujeitos a problemas de recalque e de erosão de sua base em episódios de cheia dos canais de drenagem.

4.2 Unidade II – Depósitos de tálus

Esta unidade se distribui por toda a área de estudo, recobrando parte das unidades mais antigas, ocorrendo principalmente no sopé das encostas de alta declividade, em uma posição

intermediária entre as encostas e o fundo de vale, sendo formada pela ação pluvial e gravitacional, que agem no transporte e deposição de grandes volumes de material mobilizado pela encosta.

Assim, a Unidade II é constituída por materiais de textura muito variada, principalmente grosseira, pouco selecionada e com presença de blocos rochosos, dispostos na forma de rampas de deposição, sub-horizontais, associadas a fundo de vales e base de vertentes íngremes, formando leques deposicionais detríticos.

É muito comum que os depósitos de tálus da Unidade II ocorram como uma transição entre as unidades de morro e as planícies aluviais da Unidade I (Figura 5B).

As características dos materiais da Unidade II, (mal selecionados e inconsolidados) resultam em uma unidade desfavorável à construção de rodovias, estando sujeita a movimentos de massa do tipo rastejo, deslizamentos circulares rasos e movimentos de blocos. A execução de cortes nesta unidade pode resultar em movimentação do material desconfinado pelo corte, principalmente na presença de grandes volumes de água e sistemas de drenagem ineficientes.

A associação desta unidade com as planícies aluviais também pode resultar em impactos significativos ao meio ambiente, no caso de instabilidade de taludes, uma vez que o material mobilizado pode vir a entulhar o fundo de vale e causar assoreamento dos canais fluviais e até mesmo barramento dos sistemas de drenagem.

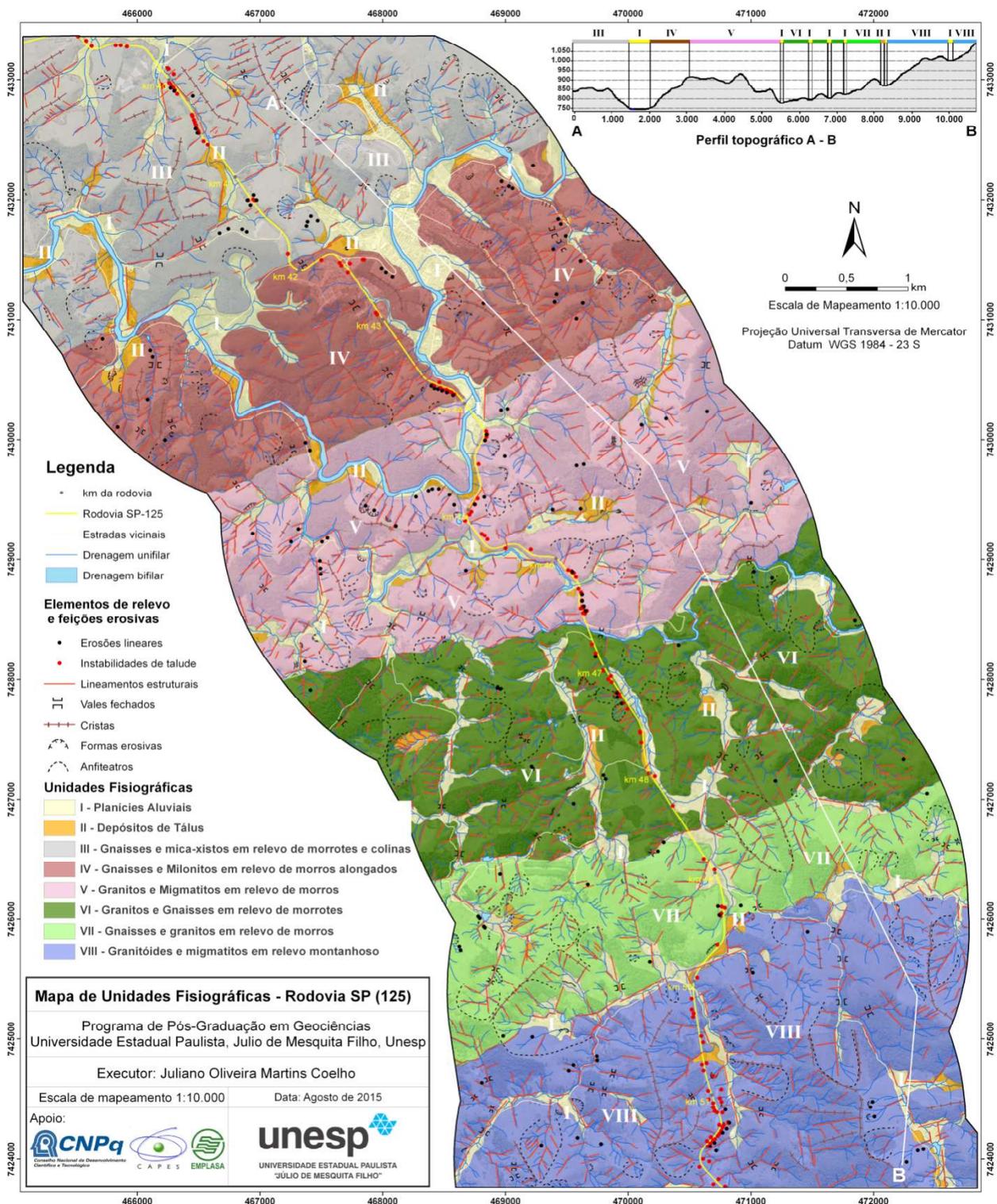


Fig. 4 - Mapa de Unidades Fisiográficas aplicado ao mapeamento geotécnico da rodovia Oswaldo Cruz (SP-125), representação reduzida do original em escala de 1:10.000.

4.3 Unidade III – Gnaisses e mica-xistos em relevo de morrotes e colinas

A Unidade III é constituída principalmente por gnaisses, xistos, granitóides e entraves quartzíticos. Os materiais rochosos se encontram muito intemperizados, com desenvolvimento de perfis de alteração profundos.

Esta unidade é representada por morros, morrotes e colinas, de declividade moderada e pequena amplitude, com encostas mistas e topos arredondados (Figura 5C). O relevo é pouco orientado, exceto em setores restritos onde a foliação dos gnaisses, e principalmente dos xistos, condicionam a orientação do relevo e da



Fig. 5 - (A) Planície aluvial representativas da Unidade I em contato com a Unidade III; (B) Rampa de colúvio representativa da Unidade II, em contato com as unidades I e V; (C) Relevo representativo da Unidade III em contato com a Unidade I; (D) Instabilidade de talude na Unidade III.

drenagem. Os vales são abertos e os interflúvios bem espaçados, com uma baixa densidade de canais de drenagem e desenvolvimento de cabeceiras na forma de anfiteatros circulares.

Os principais processos geológicos que se desenvolvem nestas unidades são as erosões lineares, os rastejos e movimentos de massa, principalmente do tipo deslizamento circular, podendo ser profundos. Os cortes de talude nesta unidade são baixos, devido à baixa amplitude do relevo e à priorização de áreas colinosas para a instalação da rodovia (Figura 5D).

O desenvolvimento de processos erosivos nesta unidade se dá principalmente no contato entre os horizontes inferiores do solo transportado e o horizonte C, formado por rocha alterada. Nesta porção menos argilosa do manto de alteração ocorrem os primeiros sulcos que, na medida em que se aprofundam, dão origem a pequenas ravinas. Estes sulcos podem ter desenvolvimento vertical ou acompanhar estruturas reliquias dos horizontes C, tais

como os planos de descontinuidade, gerados por fraturamento ou foliação metamórfica.

As características construtivas da rodovia SP-125 nesta unidade consistem em uma sucessão de cortes de pequena amplitude, em baixa e em média encosta, em material terroso e de rocha alterada, o que favorece o desenvolvimento de erosões aceleradas e movimentos de massa de pequeno porte, principalmente no contato entre solo transportado e rocha alterada.

4.4 Unidade IV – Gnaisses e milonitos em relevo de morros alongados

A Unidade IV é constituída principalmente por gnaisses, milonitos, granitos estrados, pegmatitos e migmatitos, limitados ao norte pela zona de cisalhamento Guararema e ao sul pela zona de falha de Taxaquara. Os perfis de alteração são pouco profundos, expondo os horizontes inferiores do solo, bem como a rocha alterada e a rocha fresca, em taludes de corte na rodovia.

O relevo apresenta morros com declividade moderada a forte e declividade pequena a média (Figura 6A). As encostas são comumente retilíneas e os topos são arredondados, alongados e orientados segundo a direção preferencial de orientação das estruturas das rochas, entre N20E e N30E. Os vales são fechados, com drenagem encaixada, com interflúvios pouco espaçados,

resultando em uma alta densidade de drenagem. As cabeceiras de drenagem tomam a forma de anfiteatros circulares a angulares.

Os principais processos geológicos que se desenvolvem nesta unidade são as erosões lineares, rastejos e os movimentos de massa do tipo deslizamentos planares, em cunha e, por vezes, deslizamentos circulares rasos (Figura 6B).



Fig. 6 - (A) Relevo representativo da Unidade IV em contato com a Unidade V; (B) Detalhe para instabilidade de talude na Unidade IV; (C) Instabilidade de talude em rocha fresca, representativo da Unidade V; (D) Instabilidade de talude em rocha alterada da Unidade VI.

Esta unidade apresenta uma abundância de processos erosivos acelerados e movimentos de massa, tanto nos taludes de corte quanto nas encostas de morros do entorno da rodovia. Esta condição se deve principalmente ao fato das rochas serem muito alteradas e friáveis, e possuírem um intenso fraturamento, o que favorece o desenvolvimento de deslizamentos planares e em cunha quando associados a declividades fortes, amplitudes altas e mergulho desfavorável das estruturas para fora do talude.

Entre as principais discontinuidades responsáveis pelo desenvolvimento de movimentos

de massa nesta unidade, podemos citar as foliações de atitude em torno de N65E/70NW e N70E/70NW, presentes nos gnaisses e milonitos, de direção oblíqua ao traçado da rodovia, favorecendo o desenvolvimento de sulcos profundos e de planos de deslocamento de material rochoso.

4.5 Unidade V- Granitos e migmatitos em relevo de morros

Esta unidade é constituída principalmente por granitos deformados, gnaisses e migmatitos, compreendidos na zona de falha de Taxaquara e estruturados nas direções principais N20E e

N30E. Os perfis de alteração são pouco profundos, recobertos por solos transportados, e expõem a rocha alterada e a rocha fresca em taludes de corte na rodovia.

O relevo se orienta nestas mesmas direções e apresenta morros de amplitude média e declividade moderada, com encostas retilíneas, vales abertos de topos angulosos, com cabeceiras de drenagem na forma de anfiteatros angulares que acompanham a anisotropia das estruturas das rochas.

Os principais processos geológicos que se desenvolvem nesta unidade são as erosões lineares, os rastejos, as erosões em cabeceiras de drenagem, na forma de pequenos anfiteatros circulares, e os deslizamentos planares e em cunha, segundo as estruturas presentes no material rochoso, com destaque às discontinuidades geradas por foliação e por fraturamento (Figura 6C).

Nos cortes realizados em rocha fresca predominam os movimentos de massa do tipo queda e rolamento de blocos, e nas porções onde os mantos de alteração são profundos, predominam os movimentos de massa do tipo rastejo, erosão acelerada e deslizamentos circulares. Estes movimentos de massa e as erosões aceleradas se desenvolvem segundo planos de discontinuidade bem definidos, resultantes principalmente: da foliação metamórfica e bandamento composicional, principalmente nas direções perpendiculares à via (N80W/55NE) e paralela à via (N40E/60NW) e também se desenvolvem nos planos de fraturamento (principalmente os de direção N10E/90, estas com séries de espaçamento mínimo de 10 cm).

4.6 Unidade VI – Granitos e gnaisses em relevo de morrotes

A Unidade VI é constituída principalmente por granitóides e granitos, gnaisses com bandas máficas e migmatito, com limite norte em contato com a zona de falha Taxaquara, resultando em rochas bem estruturadas principalmente nas direções NE. O manto de alteração típico é raso, porém ocorrem perfis de alteração profundos e os solos transportados são abundantes, ocorrendo na forma de espessas rampas de colúvio. Nos taludes de corte mais profundos ocorrem afloramentos de rocha fresca e rocha alterada, recobertos por solos transportados. O relevo apresenta morrotes de amplitude média, com declividade alta, forma de encostas retilíneas e topos angulosos.

Os vales são fechados em sua maioria, contrastando com amplos vales de fundo chato

onde há preenchimento por material aluvionar correspondente à Unidade I. Os interflúvios são bem espaçados e o sistema de drenagem possui orientação preferencial N10E e N20E e cabeceiras de drenagem na forma de anfiteatros angulares, que acompanham a orientação geral do relevo.

Os processos geológicos mais frequentes são as erosões lineares, os rastejos de solo, os deslizamentos planares, em cunha e circulares, estes últimos nos mantos de alteração mais profundos (Figura 6D). Há ocorrência de movimentos de blocos em taludes de corte de rocha fresca, condicionado por descontinuidade de mergulho desfavorável presentes no material rochoso. O desenvolvimento de sulcos e erosões profundas é condicionado principalmente por descontinuidades como a foliação metamórfica, com atitude preferencial N80W/50NW, de direções próximas à perpendicularidade com os taludes de corte da rodovia.

4.7 Unidade VII – Gnaisses e granitos em relevo de morros

A Unidade VII é constituída principalmente por rochas graníticas, gnaisses e migmatitos, com manto de alteração de profundidade média, recoberto por espessas rampas de material coluvionar, laterizado e com materiais cascalhentos na base do depósito, com seixos sub-arredondado, estes últimos em contato direto com a rocha alterada subjacente.

O relevo é formado por morros de amplitude média e declividade moderada, com encostas de forma mista e topos angulosos. Os elementos de relevo e drenagem são pouco orientados, com maior frequência nas direções N20E e N30W. As cabeceiras de drenagem formam amplos anfiteatros, estes com forma arredondada a angulosa.

Nas porções de maior energia do relevo há o potencial para o desenvolvimento de movimentos de blocos em taludes de corte realizados em rocha fresca. O pisoteio do gado reforça as feições de terracamento e acentua os efeitos do rastejo de solo (Figura 7A).

Os processos geológicos mais significativos são as erosões lineares, os rastejos e os deslizamentos planares, com presença de deslizamentos circulares nos mantos de alteração mais profundos e nos materiais coluvionares (Figura 7B). Onde o bandamento composicional dos gnaisses, principalmente de atitude N40E/10NW, se dispõe perpendicularmente ou paralelamente ao talude

da rodovia, há o desenvolvimento de movimentos de massa condicionados por tais estruturas, assim como ocorre com o fraturamento do material rochoso.

4.8 Unidade VIII – Granitóides e migmatitos em relevo montanhoso

A Unidade VIII é constituída principalmente por rochas granitóides e migmatitos, com perfil de alteração raso e presença de rampas de colúvio nas baixas vertentes.

O relevo é do tipo montanhoso, com amplitude forte, declividade alta, encostas retilíneas e topos angulosos, formando cristas alongadas (Figura 7C). Os vales são fechados e os interflúvios são pouco espaçados. Os elementos de relevo e de drenagem são pouco orientados, com presença de lineamentos estruturais principalmente nas direções N20E, N30E e N30W e foliação em torno das atitudes principais N70E/80NW, EW/50N e de mergulhos menores, em torno de EW/32N.

Os principais processos geológicos que se desenvolvem na unidade são a erosão linear, os rastejos, os deslizamentos planares e em

cunha, bem como deslizamentos em solos rasos e também movimentos de blocos em taludes de cortes profundos, realizados em rocha fresca, rocha alterada (Figura 7D).

O desenvolvimento de sulcos profundos está associado principalmente às discontinuidades de mergulho sub-vertical, perpendiculares ao traçado da rodovia, enquanto os movimentos de massa estão associados principalmente às discontinuidades de baixo ângulo de mergulho e direção paralela ao traçado da rodovia.

Trata-se da unidade com maior incidência de movimentos de massa e de erosão acelerada nos taludes de corte da rodovia, porém, há poucos processos erosivos fora do traçado rodoviário. Isso se deve ao fato de os taludes de corte muito altos favorecerem o desenvolvimento de processos erosivos acelerados e de movimentos de massa, principalmente quando associados a rochas muito alteradas e com abundância de discontinuidades. O cenário de instabilidade também se agrava pela presença de rampas de colúvio na forma de solos transportados preenchendo principalmente os vales fechados.



Fig. 7 - (A) Rastejo em instabilidade de talude natural da Unidade VII; (B) Instabilidade de talude na Unidade VII; (C) Relevo representativo da Unidade VIII; (D) Instabilidade de talude na Unidade VIII.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e considerando os critérios de avaliação geotécnica adotados, a convergência de evidências desfavoráveis à estabilidade geotécnica das unidades mapeadas foi sintetizada e apresentada em cores semafóricas, com as características mais desfavoráveis à estabilidade geotécnica indicadas pela cor vermelha e as mais favoráveis pela cor verde (Quadro 3).

Entre as unidades mapeadas, as de maior convergência de evidências desfavoráveis à estabilidade de taludes e, conseqüentemente, mais suscetíveis ao desenvolvimento de movimentos de massa e erosão linear de grande porte em taludes rodoviários, são:

- Unidade I – Principalmente devido à presença de materiais muito friáveis, expostos à constante variação do nível d'água e sujeitos às inundações periódicas dos canais de drenagem.
- Unidades IV e V – Principalmente devido à anisotropia dos materiais, presença de descontinuidades originadas por fraturamento e grande presença de vertentes retilíneas.
- Unidade VI – Principalmente devido ao relevo de declividade forte, vertentes retilíneas e topos angulosos e presença de materiais anisotrópicos.
- Unidade VIII - Principalmente devido ao relevo montanhoso, que resulta em cortes de grande amplitude em relevo de declividade alta e vertentes retilíneas.

Nestas unidades foi observado um grande

número de processos erosivos e movimentos de massa nos taludes rodoviários e também em taludes naturais, validando os critérios de mapeamento adotados e acrescentando mais evidências de que tais unidades são desfavoráveis à intervenção por obras lineares rodoviárias.

Apesar de os demais compartimentos serem considerados os mais aptos à construção e manutenção de obras rodoviárias na área estudada, eles não são necessariamente terrenos de fácil adequação a tais empreendimentos. No entanto, os resultados aqui apresentados permitem estabelecer graus de prioridade para as intervenções corretivas e preventivas de controle de problemas de natureza geológico-geotécnica na rodovia.

A análise das estruturas do maciço rochoso responsáveis pela evolução dos processos erosivos e desenvolvimento de movimentos de massa na área estudada, demonstra que os planos de descontinuidades devem ser analisados quanto a:

- sua orientação em relação à face do talude, condicionando diferentes tipos de movimento de massa segundo sua orientação perpendicular, paralela ou oblíqua à face do talude;
- sua direção de mergulho em relação à face do talude, podendo ser para o interior ou para o exterior do talude;
- seu ângulo de mergulho, podendo ser menor ou maior que da face do talude;
- sua relação geométrica em relação a outras descontinuidades, podendo formar cunhas, blocos ou colunas.

Quadro 3: Síntese das inferências geotécnicas

Unidades	Permeabilidade intergranular	Permeabilidade fissural	Escoamento superficial	Grau de fraturamento	Manto de alteração	Resistência à erosão linear	Potencial a movimentos de massa
I	alta	–	baixo	–	profundo	baixa	alto
II	alta	baixa	médio	baixo	médio	baixa	moderado
III	média	média	médio	médio	médio	média	moderado
IV	baixa	alta	médio	alto	médio	alta	alto
V	baixa	alta	médio	alto	raso	alta	alto
VI	baixa	alta	alto	alto	raso	alta	alto
VII	média	média	médio	médio	médio	alta	moderado
VIII	baixa	alta	alto	alto	raso	alta	alto

A evolução do processo erosivo nos cortes de rodovia analisados cria novas faces nos taludes e reduz a sua estabilidade, por modificar a geometria inicial entre a face do talude e as descontinuidades presentes no maciço rochoso. Consequentemente, novas cunhas são expostas e blocos, antes confinados pela face original do talude, ficam livres para a movimentação, gerando novas condições de instabilidade.

Os lineamentos estruturais se mostraram importantes indicadores da direção principal de orientação das descontinuidades geológicas, da sua persistência em área e das suas relações geométricas. A principal limitação do mapeamento de lineamentos estruturais na identificação das estruturas geológicas desfavoráveis à estabilidade de taludes se deu na ausência de informações a respeito das estruturas sub-horizontais, pois tais descontinuidades não deixam registros identificáveis por fotointerpretação ao interceptarem a superfície topográfica, principalmente em rochas muito alteradas.

A avaliação da instabilidade de taludes rodoviários por técnicas de fotointerpretação e atividades de campo se mostrou eficiente na identificação da convergência de evidências desfavoráveis à estabilidade de taludes e ofereceu informações importantes que podem ser aplicadas na intervenção por obras de engenharia e na execução de estudos de maior detalhe e de ensaios geotécnicos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos órgãos de fomento de pesquisa Capes e CNPq pela bolsa concedida, sem a qual esta pesquisa seria inviável. Agradecemos também à Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (Emplasa) pela sessão sem ônus das fotografias aéreas e ortofotos utilizadas nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. de. **Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista**. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1964. 99p.

CAETANO, N. R. ; MATTOS, J. T. de ; OHARA, T.. Sistemática de Análise do Meio Físico para Traçado de Rodovias Utilizando Sistemas de

Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto. **Revista Universitária Rural**, Série Ciências Exatas e da Terra, Rio de Janeiro, v. 1, p. 47-48, 2001.

CAETANO, N. R. ; OHARA, T. ; MATTOS, J. T. ; JIMENEZ-RUEDA, J. R. . Aptidão da Área e Avaliação de Alternativas Rodoviárias com Uso de Geotecnologias. **Solos e Rochas**, Brasil, v. 29, p. 17-31, 2006.

CARNEIRO, C. D. R. **Geologia e Evolução Geológica da Folha São José dos Campos**. Tese. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1977. 106p.

CARVALHO, P. A. S. (Coord.) **Manual de Geotecnia – Taludes de Rodovias**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) – Departamento de Estradas e Rodagem (DER) 1991. 388p.

CAVALCANTE, J. C. e KAEFER, L. Q. Geologia da Folha Santos (parcial). **Anais: XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia**, Porto Alegre, 4:227-246. 1974.

COELHO, J. O. M. ; PUPIM, F. N. ; MATTOS, J. T. ; JIMÉNES-RUEDA, J. R. Avaliação da Capacidade de Suporte do Meio Físico em Áreas sob Influência de Dutovias a Partir de Imagens ETM+ Landsat7. In: VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia, III Encontro Latino Americano de Geomorfologia, I Encontro Ibero-Americano de Geomorfologia, I Encontro Ibero-Americano do Quaternário, 2010, Recife. **Anais**, 2010.

CONTI, J. B. **Circulação Secundária e Efeito Orográfico na Gênese das Chuvas na Região Lesnordeste Paulista**. São Paulo: IGEOG/USP, 1975. 82p.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília, 2006. Escala 1:250.000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro. **Súmula...** Rio de Janeiro, 1979. 83 p. (EMBRAPA-SNLCS.

Micelânea, 1).

GUY, M. Quelques principes e quelques expériences sur La methodologie de La photo-interpretation. In: Symp. Inten. Photo-Interpretation, 2., Paris, **Acte**, v.1, p. 21-41. 1966.

HASUI, Y. & SADOWSKI, G. R. Evolução geológica do Pré-cambriano da região sudeste do Estado de São Paulo.; **Revista Brasileira de Geologia**. 6:182-200. 1976.

HASUI, Y.; PENALVA, F.; HENNIES, W.T. Geologia do Grupo São Roque. In: Congresso Brasileiro de geologia, 23., Salvador. **Anais**. Salvador, SBG, p. 101-134. 1969

HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; BISTRICH, C.A.; STEIN, D.P.; GALVÃO, C.A.C.F.; GOMENEZ, A.F.; ALMEIDA, M.A.; MELO, M.S. PIRES NETO, A.G. As grandes falhas do leste paulista. Simpósio de Geologia Regional, 1, 1977, São Paulo. **Atas...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo São Paulo, 1977, p. 369-380.

HASUI, Y; PONÇANO, W.L; BISTRICHI, C.A; STEIN, D.P; GALVÃO, C.A.C.F; GIMENEZ, A.F; ALMEIDA, M.A; NETO, A.G.P; MELO, M.S; SANTOS, M.C.S.R. **Geologia da Região Administrativa 3 (Vale do Paraíba) e parte da Região Administrativa 2 (Litoral) do Estado de São Paulo** – Divisão de Minas e Geologia Aplicada, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 1978. 78p.

HENNIES, W. T.; HASUI, Y; PENALVA, F. O falhamento transcorrente Taxaquara. **Anais...** XXI Congresso Brasileiro de Geologia, P. 159-168. Curitiba. 1967.

HOEK, E.; BRAY, J. W. **Rock slope engineering**. 3 ed. Rev. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1981. 358p

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Organizadores: Andrea Malheiros Ramos, Luiz André Rodrigues dos Santos, Lauro Tadeu Guimarães Fortes. Brasília, DF: INMET, 465 pp. 2009

IPT/PRÓ MINÉRIO. **Geologia das folhas Jacareí (SF 23-Y-D-II-3), Tremembé (SF 23-Y-B-V-4), Taubaté (SF 23-Y-B-II, 2) e**

Pindamonhangaba (SF 23-Y-B-VI-3), escala 1:50.000, estado de São Paulo. São Paulo, IPT/Pró-Minério, v. 1, 276 p. 1990

MATTOS, J. T. de. **Caracterização do comportamento geológico-estrutural na região da Represa de Furnas (MG), com dados de sensoriamento remoto**. Tese de Doutorado em Geociências – Geologia Geral e Aplicada. USP. São Paulo, 1986. 181p.

MATTOS, J. T. de ; OHAMA, T. ; CAETANO, N. R. ; JIMENEZ-RUEDA, J. R. Aptidão da Área e Avaliação de Alternativas Rodoviárias com uso de Geotecnologias. **Geotecnica** (Lisboa), Porto - Portugal, v. 94, p. 13-34, 2004.

MATTOS, J. T. de ; OHARA, T. ; JIMENEZ-RUEDA, J. R. ; CAETANO, N. R. . Zoneamento Geoambiental da região leste do estado de São Paulo e a Carta de Aptidão Física para a implantação de obras viárias. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo - Brasil, v. 33, n.2 Suplementar, p. 173-182, 2003.

MATTOS, J. T. de ; OHARA, T. ; SANTANA, M. A. Uso de Sensoriamento Remoto Orbital para Avaliação do Comportamento Estrutural na Estabilidade de Taludes. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo - SP, v. 35, n.2, p. 1-8, 2005.

MATTOS, J. T. de ; RODRIGUES, J. E. ; RIEDEL, P. S. ; MAGALHÃES, F. S. A influência das estruturas geológicas em instabilidades de taludes em saprolitos : uma abordagem regional . **Solos e Rochas**, São Paulo, v. 18, p. 139-147, 1995.

MATTOS, J.T. DE; VENEZIANI, P; SAMPAIO, O. S. Estudos de fraturamentos para pesquisa de água subterrânea no Estado de Sergipe com produtos de sensoriamento remoto. In: Simpósio Latino Americano de Sensoriamento Remoto; IV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto; **Anais...** VI Reunion Plenária Selper, Gramado, 1986. P. 447-452.

MOURA, C. A. ; MATTOS, J. T. ; JIMENEZ-RUEDA, J. R. . Análise de fraturamentos para determinação de áreas instáveis na faixa de dutos Osvat/Osplan - São Sebastião/SP. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 3, p. 585-596, 2012.

- MOURA, C. A.; MATTOS, J. T. ; JIMENEZ-RUEDA, J. R. .Mapeamento Geoambiental como subsídio na determinação de áreas de instabilidade da faixa de dutos Osvat/Osplan São Sebastião /SP. **Geociências** (São Paulo. Online), v. 29, p. 611-629, 2011.
- OHARA, T. ;CAETANO, N. R.;MATTOS, J. T.;JIMENEZ-RUEDA, J. R. Mapeamento Geoambiental de parte do Vale do Paraíba e a Carta de Aptidão Física para Implantação de Rodovias. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 01, n. geotecnologias, p. 32-45, 2004.
- OHARA, T. ; JIMENEZ-RUEDA, J. R. ; MATTOS, J. T. de . Avaliação Comparativa entre unidades fisiográficas e coberturas de alteração intempéricas da região do Alto-Médio Paraíba do Sul-SP. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 15, p. 340-346, 1996.
- RICCOMINI, C. **O Rift continental do Sudeste Brasileiro**. São Paulo. 256 p. (Tese de doutoramento apresentada ao Instituto de Geociências da USP). 1989.
- RIEDEL, P. S ; MATTOS, J.T.de ; RODRIGUES, J.E. ; MAGALHAES, F. S. . A influência das estruturas geológicas em instabilidades de taludes de corte em saprolitos - uma abordagem regional. **Solos e Rochas**, São Paulo, v. 18, n.3, p. 139-147, 1995.
- RIEDEL, P. S ; RODRIGUES, J.E. ; MATTOS, J.T. de. Avaliação regional da suscetibilidade a escorregamentos em taludes de corte - Aplicação no planejamento de obras viárias. In: Avaliação regional da suscetibilidade a escorregamentos em taludes de corte - Aplicação no planejamento de obras viárias. Rio de Janeiro, 1996. **Anais... 8º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**. Rio de Janeiro. ABGE, 1996. v. 2. p. 717-725.
- RIVEREAU, J.C. **Notas de aula do curso de fotointerpretação**. Curitiba, Instituto de Geologia/UFPR. 128 p. 1969.
- RIVEREAU, J.C. **Notas de aula do curso de fotointerpretação**. Série Didática. Brasília, Departamento de geociências- UNB, n. 4, 1972, 128p.
- RODRIGUES, F. H. ; ZAINE, J. E. . Mapeamento geológico-geotécnico da estrada de Castelhanos, Ilhabela (SP). **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)**, v. 3, p. 159-172, 2014.
- SILVA, A. R. da ; MATTOS, J. T. de . Mapeamento de Deformações Plásticas e Rupteis para Subsidiar Obras Civis Lineares. **Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo**, v. BT/23, p. 79-82, 2008.
- SOARES, P.C.; FIORI, A.P.; MATTOS, J.T.de A lógica de interpretação de fotografias aéreas convencionais aplicada a imagens de satélite. **Anais: I Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 2. São José dos Campos, CNPq/INPE, p. 616-618. 1978.
- SOARES, P.C.; FIORI, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícias Geomorfológicas**, nº 6, V (32) / 1976, p. 71-104.
- VEDOVELLO, R. & MATTOS, J. T. A utilização de Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs) como base para a definição de unidades geotécnicas. Uma abordagem a partir de sensoriamento remoto. In: 3º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, 3, Florianópolis, SC. **Anais (CD-ROM)**.
- VENEZIANI, P; ANJOS, C. E. **Metodologia de Interpretação de Dados de Sensoriamento Remoto e Aplicações em Geologia**. São José dos Campos : INPE, 1982. 54p.
- ZAINE, J.E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaios de aplicação na área urbana do Município de Rio Claro(SP)**. 2000. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000. 149 p.
- ZAINE, J.E. **Método de Fotogeologia Aplicado a Estudos Geológico- Geotécnicos: Ensaio em Poços de Caldas, MG**. Tese (Livre-docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011. 104 p.