

Gestão da segurança de taludes rodoviários da rodovia Régis Bittencourt, trecho da Serra do Mar PR/SP: estudos probabilísticos e monitoramento geológico-geotécnico para mensuração de riscos através de critérios econômicos

Alessander C. M. Kormann, Universidade Federal do Paraná
Liamara Paglia Sestrem, Universidade Federal do Paraná
Andressa de Fátima da Rocha Pontes, Universidade Federal do Paraná
Marina Naim Brock Trevizolli, Universidade Federal do Paraná
Larissa de Brum Passini, Universidade Federal do Paraná
Sergio Asakawa, Arteris

Resumo

Este artigo descreve a evolução de uma pesquisa de gestão da segurança de taludes rodoviários que tem o objetivo de desenvolver uma metodologia para aumentar a segurança de sua operação através de monitoramento geológico-geotécnicos e do conhecimento das probabilidades de ocorrência de eventos críticos e suas consequências. O local escolhido para o estudo de caso foi o trecho da BR-116, de aproximadamente 400 km, que interliga Curitiba (PR) e São Paulo (SP). Neste trecho, estão localizadas duas regiões de interesse: Serra do Azeite e a Serra Pelada. A pesquisa envolveu e envolverá investigações geológico-geotécnicas incluindo ensaios de campo e de laboratório, que permitem a obtenção de informações detalhadas sobre o comportamento das encostas da região, incluindo a concepção e a instalação de um plano de monitoramento, que permitirá a avaliação dos mecanismos que controlam a estabilidade de taludes, correlacionando-os futuramente com eventos pluviométricos. Serão criados mapas geológicos, de declividade, de uso e ocupação do solo e de fatores de segurança, para assim estudar as dinâmicas das encostas através de abordagens probabilísticas, mensurando os riscos através de critérios econômicos.

Palavras-chave: taludes rodoviários, Serra do Mar, monitoramento geológico-geotécnico, avaliação de riscos.

1. Introdução

Um dos maiores desafios à operação e manutenção de rodovias no Brasil se refere ao fato das mesmas frequentemente atravessarem maciços de Serra do Mar, cuja dinâmica é fortemente influenciada por agentes ambientais, dentre os quais destacam-se eventos pluviométricos. Como consequência disso, deslizamentos de terra representam uma ameaça concreta à sociedade, podendo refletir em bloqueios parciais ou totais da rodovia, causando prejuízos ambientais, sociais e financeiros.

Análises tradicionais para avaliações de estabilidade de taludes estão normalmente associadas à obtenção de um fator de segurança a partir de análises do tipo equilíbrio limite. Tais metodologias baseiam-se na adoção de valores médios de parâmetros de resistência, deformabilidade e poropressão e, muitas vezes não refletem condições reais de heterogeneidade e variabilidade espacial dos maciços. Contudo, análises do tipo probabilísticas onde coeficientes de variação dos parâmetros do solo e curvas de distribuição para cada variável relevante são utilizados representam uma alternativa de maior confiabilidade. Como resultados, busca-se inferir a probabilidade de ocorrência de um evento de ruptura.

Com base nesse contexto, iniciou-se na Autopista Régis Bittencourt uma pesquisa onde busca-se consolidar critérios para a gestão de riscos geológico-geotécnicos mediante o conhecimento das probabilidades de ocorrência de eventos críticos e de suas consequências. O estudo propõe tanto um entendimento amplo das consequências (estabilização do maciço rompido e interrupção do tráfego, por exemplo) como uma análise que envolve quantificá-los financeiramente. A partir de uma correlação entre a probabilidade de ocorrência de um evento e suas consequências (em valores monetários), define-se o risco da seguinte forma:

$$\text{RISCO (R\$)} = \text{PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (\%)} \times \text{CONSEQUÊNCIA (R\$)}$$

Este artigo descreve os avanços obtidos ao longo das etapas iniciais dessa pesquisa, incluindo a caracterização geológica-geotécnica das áreas de interesse (Serra do Azeite e Serra Pelada), subsidiada por uma campanha de investigação de campo e laboratório. Um levantamento do histórico de ocorrências relacionadas a processos de movimentos de massa e pontos identificados como de maior suscetibilidade permitiu definir pontos de maior interesse nos quais propõe-se um monitoramento contínuo das precipitações pluviométricas e parâmetros como poropressões positivas, negativas e deslocamentos horizontais na massa de solo.

2. Localização e caracterização da área de estudo

O estudo de caso desta pesquisa se desenvolve ao longo de um trecho da BR-116 (rodovia Régis Bittencourt), que se inicia em Curitiba (PR) e chega à cidade de São Paulo (SP). Tal via é o principal meio de interligação das regiões Sul e Sudeste, onde foram identificadas duas áreas de relevância geotécnica, que correspondem as Serras do Azeite e Pelada. Um maior detalhamento desses locais pode ser encontrado em Kormann *et al.* (2015).

Nessa região existem pluviômetros instalados próximos às serras (Figura 1), onde dados históricos de precipitação desde 1970 provenientes de sete estações pluviométricas podem ser identificadas, porém algumas se encontram inativas. Foram instaladas mais 3 pluviômetros vinculados ao projeto de pesquisa supracitado, conforme será descrito a seguir, estando as mesmas distribuídas ao longo do trecho analisado.



Figura 1 – Localização das estações pluviométricas no trecho de estudo

Realizaram-se estudos buscando identificar as unidades geológicas desse local, as quais são: Gnaisse Bandado Barra do Azeite, Formação Turvo-Cajati: composta pelas

Unidades Paragnáissica de Micaxisto e Filito (Serra do Azeite) e Granito Alto Turvo (Serra Pelada) (APRB, 2016).

O Gnaiss Bandado Barra do Azeite ocorre principalmente nos trechos do km 504 ao 507 e km 512 ao 514 (pista norte), sendo comum a presença de lineações de estiramento mineral nos planos de falha e fratura. Já a Formação Turvo-Cajati, mais predominante ao norte da região, apresenta unidades compostas por características metamórficas com lentes de xisto feldspático, podendo-se notar as intercalações de camadas métricas de quartzito fino bandado e laminado, camadas ricas em biotita e porções quartzofeldspáticas irregulares (Unidade de Micaxistos). Ainda na Serra do Azeite, encontra-se a composição Paragnáissica que é associada aos gnaisses anfibolíticos bandados, onde ocorrem corpos expressivos de paragnaises cinza, caracterizados pela alternância de camadas de composições, granulometrias e espessuras diferentes, ou então por um bandamento centimétrico, dando origem a um forte deslocamento de rochas. Por fim, é possível identificar restritamente corpos de rochas metasedimentares de metamorfismo menos intenso, característicos da Unidade Filito.

Na Serra Pelada, o Granito Alto Turvo é a principal formação presente, tratando-se de uma rocha de granulometria fina a média e localmente grosseira. Como característica principal, o granito apresenta-se fraturado, mas sem exibir um padrão regular. Em algumas encostas podem ser observados matacões de tamanhos e formas diversificadas e que podem colocar em perigo alguns trechos da rodovia, em caso de desprendimento e rolamento dos mesmos.

Essas unidades foram identificadas através de estudos em campo e por meio do mapa geológico da área (folha Eldorado Paulista, na escala de 1:100.000), confirmando-se assim o mapeamento geológico de superfície. O mapa foi subdividido conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde a rodovia Régis Bittencourt e seus marcos quilométricos estão sobrepostos, tanto para a pista norte (PN), como para a pista sul (PS), de acordo com Faleiros *et al.*, (2013).

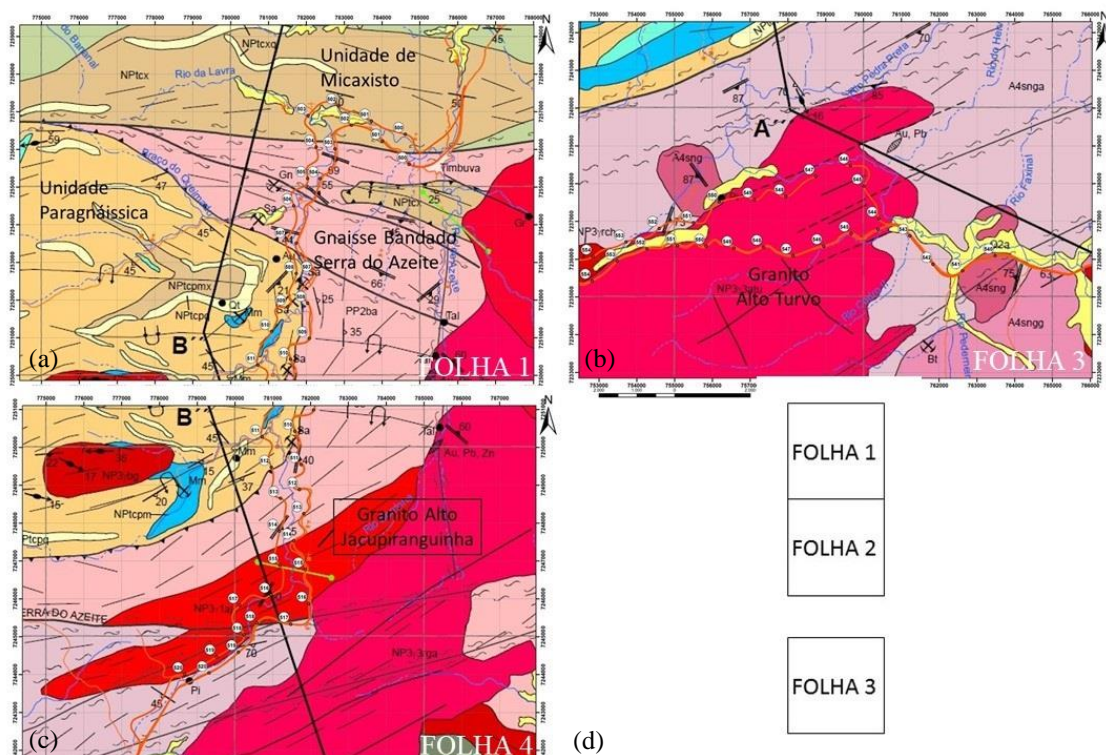


Figura 2 – Mapa de Geológico: (a) Unidades geológicas da Serra do Azeite, (b) Unidades geológicas da Serra Pelada, (c) Unidades geológicas da Serra do Azeite, continuação e (d) Articulação das folhas
 Fonte: Adaptado de Faleiros *et al.* (2013)

3. Seleção de pontos para o monitoramento geotécnico

Para a escolha dos trechos a serem monitorados, considerou-se aspectos como características geológico-geotécnicas, geometria e dados históricos de movimentos de massa, além da localização das estações pluviométricas existentes.

De modo a aumentar o entendimento do histórico de eventos existentes nas duas serras de interesse e com base nos aspectos supracitados, realizou-se um mapeamento, onde locaram-se as informações existentes envolvendo tanto pontos com registros de ocorrências de movimentos de massa, como aqueles com obras de contenções e terraplenos. O estudo também consistiu em uma análise dos relatórios de monitoramento destas contenções e terraplanos, para identificação dos locais com possibilidade de tombamento de blocos rochosos ou de maior risco de escorregamento. A escolha final baseou-se ainda no mapeamento de alguns pontos a partir de visitas ao sítio de estudo com características interessantes para o monitoramento geotécnico. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e a Figura 4 apresentam um resumo das informações avaliadas para a Serra do Azeite e a Serra Pelada, respectivamente, onde 6 áreas de interesse foram identificadas.

Optou-se pela realização de monitoramento em 3 áreas distintas (km 508+700 PS, km 513+630 PS e km 552+000 PN). O talude situado no km 552+000 PN, pertencente à unidade geológica Granito Alto Turvo, apresentou uma das maiores declividades identificadas, de 45% de inclinação, característica essa de importância para análises de estabilidade de taludes, além de uma altura de 232 m. Desse modo optou-se por instalar uma densidade maior de equipamentos para o monitoramento geotécnico neste talude, conforme se apresenta a seguir.

Em um estudo proposto por Kormann *et al.* (2015), dados históricos de 4 pluviógrafos instalados em diferentes altitudes, próximos a Serra do Azeite e Serra Pelada foram analisados e observou-se a ocorrência de eventos pluviométricos distintos entre os equipamentos avaliados nessa região, justificando-se assim a instalação de pluviógrafos próximos a rodovia e em altitudes distintas.

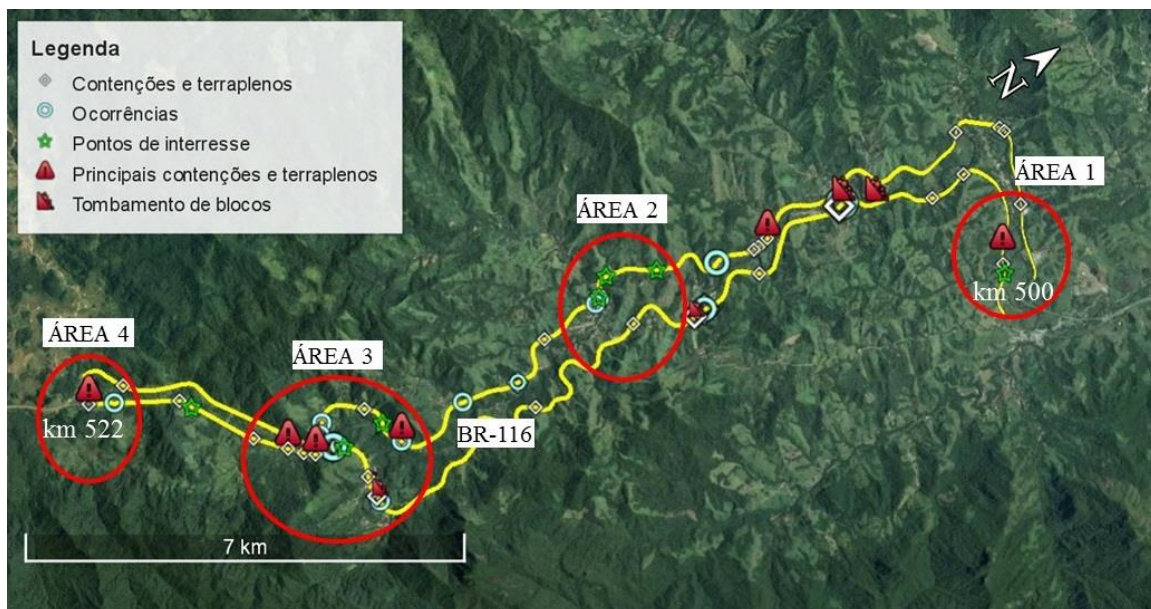


Figura 3 – Mapeamento de pontos de interesse na Serra do Azeite entre os km 500 e km 522

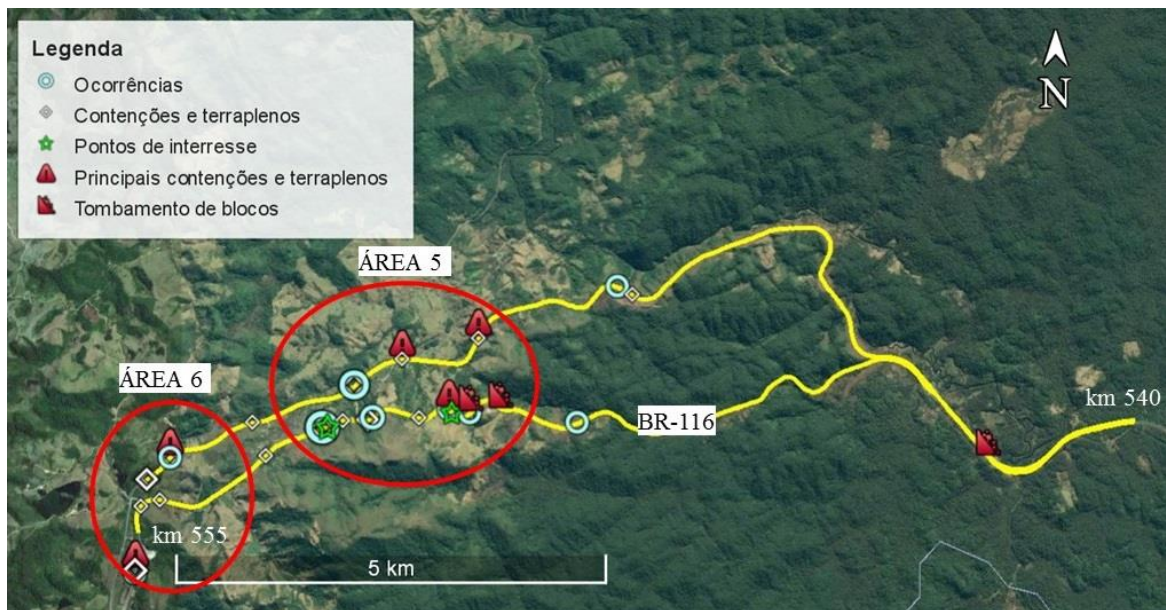


Figura 4 – Mapeamento de pontos de interesse na Serra Pelada entre os km 540 e km 555

4. Concepção e instalação do sistema de monitoramento

Um dos parâmetros mais importantes em avaliações de estabilidade de taludes é a pressão de água nos solos, estando à mesma diretamente relacionada com as variações de tensões efetivas (BRESSANI, 2010). Assim como a poropressão positiva, a poropressão negativa (sucção) possui grande contribuição na estabilidade de taludes, pois além de aumentar a resistência ao cisalhamento, ela pode fornecer uma indicação da característica de fluxo a que o solo estará sujeito. As trajetórias sazonais de sucção permitem a avaliação do grau de risco que determinado talude apresenta ao movimento de massa, ao se aproximar das estações chuvosas (MARINHO, 2005).

Com o intuito de realizar um monitoramento voltado para o entendimento de poropressões positivas, poropressões negativas, deslocamentos horizontais da massa de solo e regime de precipitação, instalou-se os equipamentos listados na Tabela conforme o respectivo local a ser monitorado.

Tabela 1 – Relação de instrumentos instalados por local de monitoramento

Local de monitoramento	Unidade Geológica	Cota (m)	Instrumentação
km 508+700 PS	Serra do Azeite	192	Um pluviógrafo com <i>datalogger</i> e sistema de transmissão automatizada de dados
km 513+630 PS	Serra do Azeite	337	Um pluviógrafo com <i>datalogger</i> e sistema de transmissão automatizada de dados
km 552+000 PN	Serra Pelada	727	Um pluviógrafo, dois piezômetros, dois tensiômetros, um <i>datalogger</i> , sistema de transmissão de dados automatizado e um inclinômetro.

O pluviógrafo instalado foi do tipo caçamba basculante, sendo que seu princípio de funcionamento baseado em um sistema de tombamento. As leituras são registradas em intervalos de tempo pré-programados, sendo a precipitação computada e acumulada nos

tombamentos. O equipamento inclui ainda um nível de bolha para garantir sua instalação de forma nivelada (DUALBASE, 2016).

Nos km 508+700 PS e km 513+630 PS, uma caixa de leitura foi utilizada para armazenar os dados de precipitação registrados pelos pluviógrafos, através de um *datalogger* CR200X Campbell Scientific (2014). A transmissão remota desses registros foi composta por um sistema que possui um modem Robustel, com um chip de dados, e assim, com auxílio do programa LoggerNet 4.4, os dados são coletados remotamente. Na Figura 5 (a) e na Figura 5 (b) é possível observar os equipamentos que compõem as estações pluviométricas nos km 508+700 PS e km 513+630 PS, respectivamente.

No km 552+000 PN, o *datalogger* utilizado foi o CR6 Campbell Scientific (2015), o qual apresenta maior número de canais, sendo possível conectar todos os equipamentos. Para maior segurança contra intempéries e vandalismo, o mesmo foi instalado dentro de uma casa de leituras de alvenária. Para compor o monitoramento desse talude, além do pluviógrafo foram instalados: dois piezômetros de corda vibrante 4500S, para monitorar a poropressão positiva 10 m e 16 m de profundidade (GEOKON, 2016); dois tensiômetros modelo 2725A, com transdutores modelo 5301, para o monitoramento da poropressão negativa nas camadas não saturadas de solo superficiais (SOILMOISTURE, 2011) e um inclinômetro. A Figura 5 (c) apresenta a disposição destes instrumentos de monitoramento após sua instalação no km 552+000 PN.

As estações pluviométricas encontram-se operantes desde o final do mês de junho de 2016, registrando precipitação diária. Registraram-se 51,4 mm e 57,8 mm de precipitação acumulada para o mês de julho nos pluviógrafos dos km 508+700 PS e km 513+630 PS, respectivamente. O pluviógrafo instalado no km 552+000 PN, por outro lado, sofreu um episódio de vandalismo logo após sua instalação e no momento está inoperante.



Figura 5 - Pontos de instalação dos equipamentos de monitoramento:
(a) km 508+700 PS, (b) km 513+630 PS e (c) km 552 PN

5. Caracterização geológico-geotécnica

Para a realização das análises de gestão de segurança de taludes rodoviários, vinculadas à mensuração de riscos geotécnicos, é necessária a exploração à estrutura geológico-geotécnica da área de interesse, com o objetivo de inferir possíveis movimentos de massa. Com isso, realizou-se no trecho do km 522+000 PN ensaios de campo relativos a três sondagens mistas (Tabela 2 e Figura 6), permeabilidade *in situ* e geofísica, assim como coleta de amostras para a realização de ensaios de laboratório, como umidade natural e sucção.

Tabela 2 – Dados das sondagens mistas realizadas no km 522+000 PN

Sondagem	Prof. (m)	Coordenadas UTM		Cota (m)	N.A. em 24 h (m)
SM-01	29,41	7.236.173,296 N	754.112,590 E	715,282	4,95
SM-02	16,32	7.236.151,132 N	754.126,415 E	727,060	6,38
SM-03	10,33	7.236.150,262 N	754.124,466 E	726,642	6,25

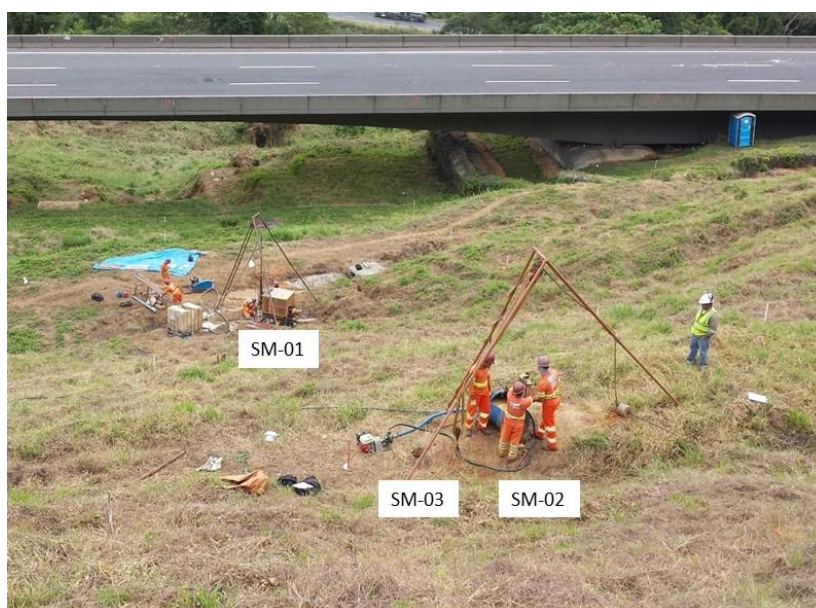


Figura 6 – Sondagens SM-01, SM-02 e SM-03 realizadas no km 522+000 PN

As sondagens mostram um talude com estratigrafia formada por uma camada superficial de colúvio, composto por argila siltosa de baixa resistência, com espessura em torno de 4,0 m (SM-02 e SM-03) a 8,5 m (SM-01), estando esse último localizado no pé do talude/viaduto. Abaixo da camada coluvionar encontrou-se um solo residual saprolítico, composto por areia fina a média, com pequena porcentagem de argila com mica, de resistência superior à camada anterior e espessura de aproximadamente 4,0 m (SM-01) a 6,0 m (SM-02 e SM-03). Subjacente ao solo residual saprolítico encontrou-se uma camada de alteração de rocha (saprólito), caracterizada por um solo composto de areia média à grossa siltosa com pouca fração de argila e mica e espessura de aproximadamente 5,0 m (SM-01 e SM-02). Em maior profundidade, a partir de 16,5 m atingiu-se a rocha sã de migmatito, composta por quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio e máficos e coloração cinza.

A utilização da geofísica (método de investigação indireto) pôde ser realizada preliminarmente à realização das sondagens, logo após a realização do levantamento topográfico do talude. O entendimento da estratigrafia do talude como um todo foi refinado com os resultados das sondagens. A realização da geofísica contou com o método geoeletrico de eletro-resistividade por meio de 12 caminhamentos elétricos (CE), sendo 7 CE transversais e 5 CE longitudinais à rodovia, delimitando as linhas de investigação através de pontos de

referência, totalizando 1800 m lineares. O arranjo adotado foi do tipo dipolo-dipolo com a cravação de eletrodos a cada 5 m, formando as linhas de caminhamentos elétricos.

A Figura 7 ilustra o resultado obtido por meio da geofísica de uma seção longitudinal de CE no talude. Na Figura 7(a) as regiões com maior e menor resistividade elétrica são ilustradas em escala cromática, e na Figura 7(b) as camadas inferidas correspondentes ao colúvio, solo saprolítico, migmatito e nível d'água, por meio da investigação geotécnica (sondagens mistas) juntamente com o resultado geofísico, são apresentadas.

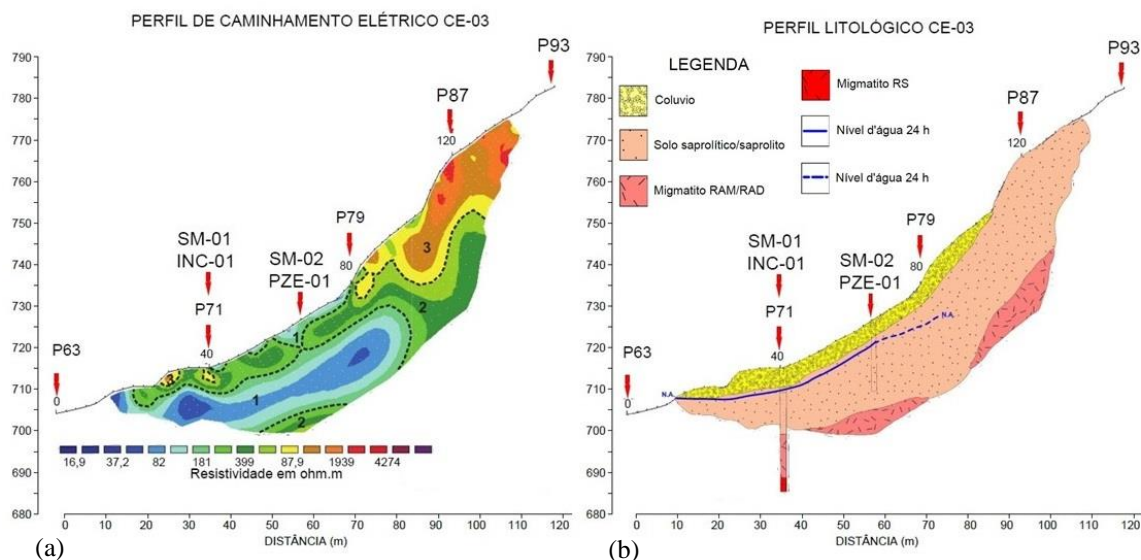


Figura 7 - Resultado geofísico para uma seção longitudinal do talude: (a) Perfil do caminhamento elétrico e (b) Perfil litológico

De modo a ampliar o entendimento sobre os parâmetros que controlam o comportamento das camadas superficiais de solo não saturados, ensaios de campo para obtenção da permeabilidade *in situ* e coletas de amostras foram realizados, em alguns pontos pré-definidos. Constatou-se que a camada subsuperficial de argila siltosa apresenta valor médio de condutividade hidráulica de $3,61 \times 10^{-5}$ cm/s, e umidade natural média de 22%, com amplitude de 13% até 35%, com maiores valores encontrados próximos do pé do talude, onde a linha freática é mais superficial. Através do ensaio de papel filtro, com 26 dias de armagem, utilizado para a obtenção da sucção, obteveram-se a amplitude dos resultados, em teores de umidade gravimétrica altas (37,22%) associadas a baixos valores de sucção matricial (334,90 kPa) e baixos valores de umidade gravimétrica (9,19%) correspondentes a altos valores de sucção matricial (18.551,22 kPa), enquadrando-se na curva característica com aspecto de argila siltosa, conforme FREDLUND & XING (1994 *apud* BOSZCZOWSKI, 2008).

6. Conclusões

No presente artigo foram descritos os métodos e as etapas já realizadas, de uma pesquisa que visa o desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento integrado de riscos geotécnicos em taludes rodoviários, por meio de relações entre a probabilidade de ocorrência de eventos críticos e suas consequências financeiras.

A identificação de estações pluviométricas próximas às áreas de interesse, representam uma importante ferramenta para o entendimento do regime de chuvas na região. Como complemento, propôs-se a instalação de mais três pluviógrafos em áreas consideradas como de maior suscetibilidade, permitindo a realização de análises comparativas com dados históricos.

Uma descrição das etapas iniciais que compõem o escopo da pesquisa foi apresentada, envolvendo campanhas de investigações geológico-geotécnicas de campo e laboratório. Buscou-se, em um primeiro momento, a caracterização e obtenção de parâmetros de permeabilidade e mecanismos de infiltração e fluxo transiente, com vistas ao desenvolvimento de um modelo constitutivo de descrição do comportamento geomecânico dos solos não saturados.

Como continuidade no desenvolvimento do projeto, busca-se i) aprofundar o entendimento dos mecanismos que controlam a resistência e a estabilidade dos taludes na região de estudo, avaliando-se a influência de eventos pluviométricos e piezométricos com base no histórico de leituras advindo dos dados de instrumentação, ii) aumentar as informações referentes a parâmetros de resistência e deformabilidade dos solos residuais e coluvionares encontrados ao longo do trecho da Serra do Mar.

Para as etapas futuras, além de análises dos dados do monitoramento proposto, serão realizados estudos buscando avaliar os níveis de segurança das encostas, para embasar a tomada de decisão, através de critérios econômicos de mensuração de riscos, com base em análises probabilísticas de estabilidade e monitoramento de condições plúvio-piezométricas.

7. Referências Bibliográficas

ACEVEDO, A. M. G. **Estudo de séries de leituras obtidas através do monitoramento da instrumentação geotécnica implantada em uma encosta litorânea**, 2013. mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

APRB - Autopista Régis Bittencourt. Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT. **Relatório II de acompanhamento**. PROJ_8_RELAT_I_REGIS_SUL-ANTT_JAN-16. 2016.

BRESSANI, L. A. Instrumentação em obras geotécnicas – taludes e escavações. In: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, 5, 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo. São Paulo: ABMS, 2010. v. 1. p. 3-18.

BOSZCZOWSKI, R. B. **Avaliação de Propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de Granito-gnaiss de Curitiba, PR**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2008.

CAMPBELL SCIENTIFIC, I. Operator's Manual CR200/CR200X Series Dataloggers. 2014.

DUALBASE. Manual De Instruções PluviDB-DVP. , p. 1–24, 2016.

FALEIROS, F. M.; PAVAN, M.; FERRARI, V. C.; et al. Mapa Geológico da Folha Eldorado Paulista, escala 1:100.000. **Programa Geologia do Brasil - PGB, CPRM, São Paulo**, 2013.

KORMANN, A. C. M.; FEDERAL, U.; ASAKAWA, S. Gestão da segurança de taludes rodoviários da rodovia Régis Bittencourt , trecho da Serra do Mar PR / SP : estudos probabilísticos e monitoramento geológico-geotécnico para mensuração de riscos através de critérios econômicos. **Revista ANTT**, p. 1–10, 2015.

MARINHO, F. A. M. Investigação Geotécnica Para Quê?. In: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, 4, 2005, Salvador. **Anais...** Bahia. Salvador: ABMS, 2005a. v. 2.

VICTORINO, M.M., SESTREM, L.P., KORMANN, A.C.M., BENETTI, L. Planejamento, Implantação e Operação de uma Rede de Pluviógrafos na Serra do Mar Paranaense, In: 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul. **Anais...** São Paulo: ABGE, 2015.