



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

# **RBGEA**

## **REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**

**REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**

*Publicação Científica da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*

### **EDITORES**

Alessandra Cristina Corsi - IPT  
Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso - UFRJ  
Prof. Dra. Kátia Canil - UFABC  
Prof. Dra. Malva Andrea Mancuso - UFSM  
Prof. Me. Marcelo Denser Monteiro - Metrô - SP / UAM

### **REVISORES**

|  |  |
|--|--|
| Adalberto Aurélio Azevedo - IPT                                  | José Domingos Gallas - USP                 |
| Alberto Pio Fiori - UFPR   | José Eduardo Rodrigues - USP               |
| Aline Freitas da Silva - DRM-RJ                                  | José Eduardo Zaine - UNESP                 |
| Alessandra Cristina Corsi - IPT                                  | José Luiz Albuquerque Filho - IPT          |
| Angelo José Consoni - TSAP                                       | Kátia Canil - UFABC                        |
| Antonio Cendrero - Univ. da Cantabria (Espanha)                  | Leandro Eugênio da Silva Cerri - UNESP     |
| Antonio Manoel Santos Oliveira - UNG                             | Lídia K. Tominaga - IG/SMA                 |
| Candido Bordeaux Rego Neto - IPUF                                | Luis de Almeida Prado Bacellar - UFOP      |
| Clovis Gonzatti - CIENTEC  | Luiz Nishiyama - UFU                       |
| Denise de la Corte Bacci - USP                                   | Luiz Fernando D'Agostino - Nucleo          |
| Diana Sarita Hamburger - UFABC                                   | Malva Andrea Mancuso - UFSM                |
| Dirceu Pagotto Stein - Geoexec                                   | Marcelo Fischer Gramani - IPT              |
| Edilson Pissato - USP  | Marcilene Dantas Ferreira - UFSCar         |
| Eduardo Brandau Quitete - IPT                                    | Marcelo Denser Monteiro - Metrô - SP / UAM |
| Eduardo Goulart Collares - UEMG                                  | Marcia Pressinotti - IG/SMA                |
| Eduardo Soares de Macedo - IPT                                   | Marcio A. Cunha - Consultor                |
| Emilio Velloso Barroso - UFRJ                                    | Maria Cristina Jacinto Almeida - IPT       |
| Eraldo L. Pastore - Consultor                                    | Maria Heloisa B.O. Frascá - Consultora     |
| Fábio Soares Magalhães - Vogbr                                   | Maria José Brollo - IG/SMA                 |
| Flávio Almeida da Silva - Engecorps                              | Marta Luzia de Souza - UEM                 |
| Frederico Garcia Sobreira - UFOP                                 | Nelson Meirim Coutinho - GEORIO            |
| Ginaldo Campanha - USP   | Newton Moreira de Souza - UnB              |
| Guido Guidicini - Geoenergia                                     | Noris Costa Diniz - UnB                    |
| Helena Polivanov - UFRJ  | Oswaldo Augusto Filho - USP                |
| Jair Santoro - IG/SMA  | Reinaldo Lorandi - UFSCar                  |
| João Francisco Alves Silveira - Consultor                        | Renato Luiz Prado - USP                    |
| Jorge Kazuo Yamamoto - USP                                       | Ricardo Vedovello - IG/SMA                 |
| José Alcino Rodrigues de Carvalho - Univ. Nova de Lisboa (Port.) | Yociteru Hasui - Consultor                 |
| José Augusto de Lollo - UNESP                                    |  |

### **APOIO EDITORIAL**

Luciana Marques, Nill Cavalcante, Renivaldo Campos

### **PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO**

Rita Motta - Editora Tribo da Ilha

---

**Volume 5 - Número 2**

2015

ISSN 2237-4590

---

## DIRETORIA ABGE GESTÃO 2016/2018

---

**Presidente:** Adalberto Aurélio Azevedo  
**Vice Presidente:** Lídia Keiko Tominaga  
**Diretor Secretário:** Alessandra Cristina Corsi  
**Diretor Secretário Adjunto:** Deyna Pinho  
**Diretor Financeiro:** José Luiz Albuquerque Filho  
**Diretor de Cursos:** Ivan José DELatim  
**Diretora de Eventos:** Fábio Augusto Gomes Vieira Reis  
**Diretora de Eventos Adjunto:** Renata Augusta Rocha N. de Oliveira  
**Diretor de Comunicação:** Marcelo Denser Monteiro  
**Diretor de Comunicação Adjunto:** Tiago Antonelli  
**Diretor de Publicação:** Andrea Bartorelli  
**Diretor de Publicação Adjunto:** Edilson Pissato

### CONSELHO DELIBERATIVO

Adalberto Azevedo, Alessandra Corsi, Andrea Bartorelli, Deyna Pinho, Edilson Pissato, Fábio Reis, Flávio Almeida, Glaucia Cuchierato, Ivan Delatim, José Luiz Albuquerque Filho, Leandro Castro, Lídia Tominaga, Luiz Fernando, Marcelo Denser, Mateus Delatim, Renata Rocha, Silvia Kitaraha e Tiago Antonelli.

### NÚCLEO RIO DE JANEIRO - Aline Freitas das Silva

**Conselho Deliberativo:** Aline Freitas Silva, Hugo Machado, Rodrigo França, Rodney Nascimento, Rúbia Azevedo e Thiago Santos

### NÚCLEO MINAS GERAIS - Fábio Magalhães

**Conselho Deliberativo:** Alberto Amaral, Fábio Magalhães, Gilvan Sá, Luis Bacellar, Maria Giovana Parizzi, Sandra Fernandes e Thiago Teixeira

### NÚCLEO SUL - Malva Andrea Mancuso

**Conselho Deliberativo:** Alberto P. Fiori, Andrea V. Nummer, Débora Lamberty, Eduardo C.B. Carvalho, Erik Wunder, Hermann Vargas, Juan Antonio A. Flores, Luiz A. Bressani e Malva Andrea Mancuso.

### NÚCLEO CENTRO OESTE - Ingrid Lima

**Conselho Deliberativo:** Bruno Diniz, Dário Peixoto, Getúlio Ezequiel, Ingrid Lima, João Armelin, Kurt Albrecht, Juliana Sobreira e Ricardo Vilhena

### NÚCLEO NORTE - Cláudio Szlafstein

**Conselho Deliberativo:** Dianne Danielle Farias Fonseca, Lenilson José Souza de Queiroz, Luciana de Jesus P.P. Miyagawa, José Antonio da Silva, Renato R. Mendonça, Jubal C. Filho e Nilton de Souza Campelo, Loury Bastos, Patrícia Mara Lages Simões, Raimundo Almir C. da Conceição, Sheila Gatinho Teixeira, Túlio A. de Araújo Mendes.

### NÚCLEO NORDESTE - Carlos Henrique Medeiros

**Conselho Deliberativo:** Edval Lopes da Silva, Fagner França, Francisco Said Gonçalves, Heitor Neves Maia, José Braz Diniz Filho, Kleiton Cassimiro, José Vitoriano de Britto Neto, Marcos Paulo Souza Novais, Olavo Santos Junior, Ubiratã Maciel, Ricardo Farias do Amaral e Vanildo Fonseca



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

### SECRETARIA EXECUTIVA

**Secretária Executiva:** Luciana Marques  
Av. Profº Almeida Prado, 532 – Prédio 11 –  
Cidade Universitária – São Paulo – SP  
Telefone: (11) 3767-4361 / (11) 3719-0661  
Email: [abge@abge.org.br](mailto:abge@abge.org.br) – Home Page: [www.abge.org.br](http://www.abge.org.br)

---







É com grande satisfação que apresentamos o segundo número da Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) do ano de 2015. Os artigos publicados abordam diferentes temas na área da Geologia de Engenharia e Ambiental, sendo de interesse de todos os associados da ABGE.

Maurício Pozzobon e colaboradores tratam da análise da suscetibilidade a deslizamentos da unidade geomorfológica Serrania do Baixo e Médio Itajaí-Açu, no município de Blumenau/SC. Os autores aplicaram a regra de Bayes da probabilidade condicional, através da técnica de pesos de evidência, para analisar as relações espaciais entre um conjunto de potenciais fatores condicionantes de deslizamentos e um conjunto de 205 cicatrizes de deslizamentos ocorridos em 2008, na área de estudo. São apresentadas 6 diferentes combinações de integração dos fatores.

O artigo apresentado por Daniela Garroux Gonçalves de Oliveira e colaboradores aborda a aplicação do televisionamento de sondagens em uma fase de projeto básico do Metrô de São Paulo. A partir dos dados de estruturas obtidas em 17 sondagens, com a perfilagem de 503 metros de rocha, foram definidos os principais blocos formados e analisada a estabilidade destes ao longo dos trechos de túnel e nas paredes de vala de estações e poços.

Marcos Tanaka Riyis e coautores apresentam um estudo de caso onde diversas ferramentas de investigação de alta resolução foram utilizadas em conjunto para determinar, delimitar e caracterizar as diversas camadas estratigráficas de um

solo residual contaminado por óleo lubrificante para a estimativa da massa de contaminantes.

Uma metodologia alternativa para determinação do escoamento superficial por chuva e dos sedimentos gerados por erosão em taludes naturais ou construídos, aplicada por meio da adoção de um sistema de chapas de coletas é proposto no trabalho de Jucielli Quatrin Nunes e colaboradores da UFTPR e da UNESP.

Vitor Santini Müller e coautores da UFSC publicam um artigo onde apresentam um protocolo para a realização, em campo, de ensaios de cisalhamento direto em regime de múltiplos estágios no contexto de mapeamento geotécnico; uma alternativa que possibilita a obtenção expedita de parâmetros de resistência a partir de uma adaptação do equipamento tradicionalmente utilizado em laboratório.

O artigo de Fábio Conrado de Queiróz e colaboradores apresenta uma compilação de dados de propriedades e parâmetros físicos do acervo de rochas silicatadas do IPT, composto por um universo de 412 amostras. Os resultados desta compilação contribuem significativamente com a definição de parâmetros para estudos futuros.

Estamos certos de que o conjunto das informações disponíveis em mais este número da RBGEA configura uma contribuição relevante de profissionais da área de Geologia de Engenharia e Ambiental para a aplicação de novas metodologias e novos procedimentos na área.

Desejamos a todos uma ótima leitura!





- 9** ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DA UNIDADE GEOMORFOLÓGICA SERRANIA DO BAIXO E MÉDIO ITAJAÍ-AÇU, NO MUNICÍPIO DE BLUMENAU/SC  
*Maurício Pozzobon*  
*Gustavo R. Curcio*  
*Claudinei T. da Silveira*
- 26** APLICAÇÃO DO TELEVISIONAMENTO DE SONDAgens EM FASE DE PROJETO BÁSICO DO METRÔ DE SÃO PAULO  
*Daniela Garroux Gonçalves de Oliveira*  
*Marcelo Denser Monteiro*  
*Fabio Taioli*  
*Hugo Cassio Rocha*  
*Gabriel Guimarães Facuri*  
*Alessandro Lugli Nascimento*
- 38** ESTIMATIVA DA MASSA DE CONTAMINANTES COMPARANDO TÉCNICAS TRADICIONAIS COM FERRAMENTAS DE INVESTIGAÇÃO DE ALTA RESOLUÇÃO (HRSC)  
*Marcos Tanaka Riyis*  
*Heraldo Luiz Giacheti*  
*Mauro Tanaka Riyis*  
*Rafael Muraro Derrite*
- 50** METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA DETERMINAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL POR CHUVA E DOS SEDIMENTOS GERADOS POR EROSÃO EM ENCOSTAS  
*Jucielli Quatrin Nunes*  
*Vitor André Genehr*  
*Simone Andrea Furegatti*
- 61** PROPOSIÇÕES PARA UM CISALHAMENTO DIRETO DE CAMPO: ALTERNATIVA EM MAPEAMENTOS GEOTÉCNICOS  
*Vitor Santini Müller*  
*Nilo Rodrigues Júnior*  
*Matheus Klein Flac*  
*Murilo da Silva Espíndola*  
*Regiane Mara Sbroglia*  
*Rafael Augusto dos Reis Higashi*  
*Juan Antonio Altamirano Flores*



# ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DA UNIDADE GEOMORFOLÓGICA SERRANIA DO BAIXO E MÉDIO ITAJAÍ-AÇU, NO MUNICÍPIO DE BLUMENAU/SC

*LANDSLIDES SUSCEPTABILITY ANALYSIS OF THE GEOMORPHOLOGICAL UNIT  
"SERRANIA DO BAIXO E MÉDIO ITAJAÍ-AÇU" IN BLUMENAU, SOUTHERN BRAZIL*

**MAURÍCIO POZZOBON**

*Biol., Dr., Universidade Regional de Blumenau (FURB),  
(47) 99183-7627. E-mail: pozzobonmauricio@gmail.com*

**GUSTAVO R. CURCIO**

*Eng. Agr., Dr., Embrapa Florestas: Colombo – PR, (41) 3675-5600  
E-mail: gustavo.curcio@embrapa.br*

**CLAUDINEI T. DA SILVEIRA**

*Geog., Dr., Universidade Federal do Paraná, (41) 99682-8819.  
E-mail: claudineits@ufpr.br*

## RESUMO ABSTRACT

Os movimentos gravitacionais de massa classificados como deslizamentos resultam da combinação favorável de condições. Apoiado na premissa da existência de relações funcionais entre a distribuição espacial desses fatores com os processos de deslizamentos é possível calcular a probabilidade de sua ocorrência e gerar cartas de suscetibilidade. Com base nesse preceito, o objetivo do trabalho é analisar as relações espaciais entre deslizamentos ocorridos e um conjunto de potenciais fatores condicionantes e testar modelos de suscetibilidade para a área correspondente à unidade geomorfológica Serrania do Baixo e Médio Itajaí-Açu, situada no município de Blumenau. A aplicação da regra de Bayes da probabilidade condicional, através da técnica pesos de evidência, permitiu analisar as relações espaciais entre um conjunto de potenciais fatores condicionantes (geológicos, geomorfológicos e de uso e cobertura do solo) e 205 deslizamentos ocorridos no evento de 2008 na área de estudo. Seis diferentes combinações de integração dos valores ponderados de cada fator foram elaboradas no intuito de identificar àquela que resulta no melhor ajuste em relação à independência espacial entre os temas e às eficiências de classificação e predi-

Gravitational mass movements classified as landslides result from the combination of favorable conditions. Assuming the existence of functional relationships between the spatial distribution of conditioning factors and the landslides is possible to calculate the probability of its occurrence and generate charts of susceptibility. The objective of this work is analyze the spatial relationships between landslides and a set of potential conditioning factors and, from these analyzes, propose and testing susceptibility models for geomorphological unit named Serrania do Baixo e Médio Itajaí-Açu in the municipality of Blumenau. The application of Bayes rule of conditional probability, using the technique weights of evidence, allowed to analyze the spatial relationship between a set of potential conditioning factors (related to geological, geomorphological and land cover aspects) and 205 landslides occurred in 2008 event in the study area. The combination of the weights of the factors distance from lineaments, aspect, plan curvature and slope (model 6) presents the best settings, between models that meet the independence requirements. From these models, it is possible to recognize that situations of high to very

ção. A combinação dos pesos dos temas orientação das vertentes, curvatura horizontal, declividade e NDVI (modelo 6) foi a que apresentou os melhores indicadores de eficiência de classificação e de predição, entre os modelos que atenderam os requisitos de independência. A partir destes modelos, é possível reconhecer que as situações de alta a muito alta suscetibilidade podem variar de 22% (modelo 2) a 37% (modelo 4) da área deste compartimento, na escala 1:25.000.

**Palavras-chave:** análise da suscetibilidade; probabilidade condicional; compartimentação geomorfológica.

high susceptibility may vary between 22% (model 2) to 37% (model 4) of the area of this compartment, on 1:25.000 scale.

**Keywords:** Susceptibility analysis; conditional probability; geomorphological compartmentalization

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os importantes processos geomórficos modeladores da superfície terrestre, destacam-se os movimentos gravitacionais de massa, que compreendem diferentes processos, incluindo os deslizamentos (Summerfield 1991, Cruden & Varnes 1996, Dikau 2004).

Os deslizamentos referem-se aos processos em que há desprendimento de material e a mobilização se processa sobre um ou mais planos de deslizamento. As superfícies de ruptura podem se desenvolver com geometrias variadas e em diferentes profundidades, envolvendo diferentes tipos de materiais inconsolidados (Cruden & Varnes 1996, Augusto Filho & Virgili 1998, Dikau 2004, Fiori & Carmignani 2009).

Ao longo da costa atlântica brasileira, a deflagração natural desses fenômenos está fortemente vinculada a episódios de chuvas intensas (Wolle & Pedrosa 1981, Ahrendt 2005, Vedovello & Macedo 2007). As instabilidades se manifestam preferencialmente em zonas de convergência hídrica, onde o manto de regolito atinge uma máxima espessura, conforme um limite crítico de declividade imposto por relações locais de equilíbrio dinâmico (Matsushi et al. 2006, Fiori & Carmignani 2009). Nas condições em que houver água suficiente e a topografia favorecer a convergência dos detritos nos canais naturais de escoamento, o material mobilizado poderá originar corridas de massa, amplificando seus efeitos diretos e indiretos (Cruden & Varnes 1996, Dikau 2004, Matsushi et al. 2006).

Em razão dos efeitos decorrentes, os deslizamentos podem representar sérias ameaças às sociedades modernas, sobretudo na perspectiva de crescimento da população humana e do processo de ocupação desordenada do solo. Danos e perdas ambientais, de ordem social, econômica e natural de diferentes portes e extensões estão associados à ocorrência de deslizamentos, que afetam regiões ricas ou pobres, áreas urbanas ou rurais, e comunidades preparadas ou não para enfrentá-los (Vedovello & Macedo 2007).

O planejamento do uso e ocupação do solo é apontado como a medida mais eficiente para evitar ou reduzir os danos e prejuízos decorrentes de processos do meio físico potencialmente perigosos. Neste caso, a identificação dos locais que apresentam predisposição natural para a ocorrência do fenômeno, constitui etapa primária no processo de análise e avaliação dos riscos associados, e elemento norteador do ordenamento territorial (Vedovello & Macedo 2007, Macedo & Bressani 2013).

A análise de suscetibilidade permite a identificação da potencialidade de ocorrência do fenômeno, e pode ser conduzida por modelos empíricos (análise da distribuição dos movimentos de massa e de mapeamentos geológico-geotécnicos), ou através da aplicação de modelos matemáticos (determinísticos ou probabilísticos) (Montgomery & Dietrich 1994, Soares et al. 2002, Araújo 2004, Pereira et al. 2012, Macedo & Bressani 2013). A abordagem probabilística permite delimitar unidades do meio conforme o grau de suscetibilidade, utilizando um modelo de evento e um conjunto de

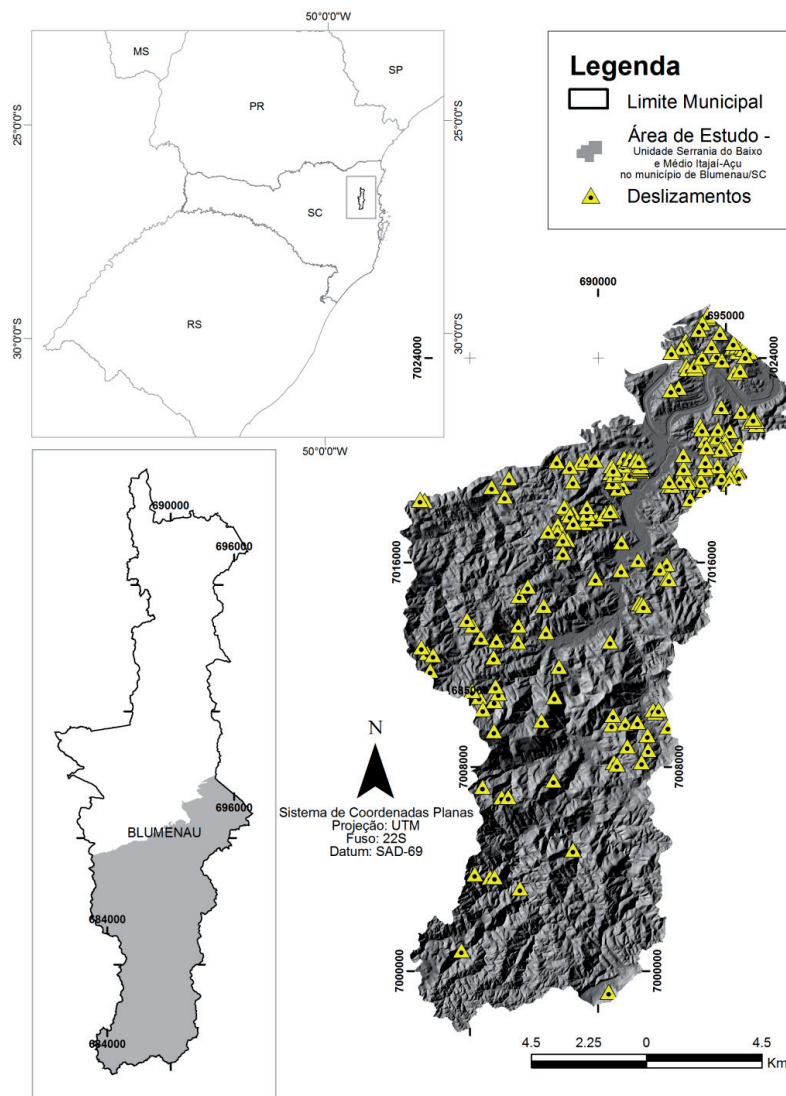
variáveis espaciais georreferenciadas (Soares et al. 2002). Assumindo a ideia de que os deslizamentos resultam da combinação de condições favoráveis, pode-se presumir a existência de relações funcionais entre a distribuição dos mesmos e dos respectivos fatores condicionantes, tornando possível calcular a probabilidade de sua ocorrência e gerar cartas com distribuição de valores, organizados em classes de suscetibilidade.

No presente estudo foi empregada a técnica de modelagem espacial pesos de evidência (Bonham-Carter 1994), pautada nos princípios da regra de Bayes da probabilidade condicional, com o objetivo de identificar condicionantes ambientais regentes da distribuição espacial dos deslizamentos,

propor e testar modelos de suscetibilidade para a área correspondente a unidade geomorfológica Serrania do Baixo e Médio Itajaí-Açu no município de Blumenau/SC, na escala 1:25.000.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A área do município de Blumenau/SC foi segregada segundo a abrangência das unidades geomorfológicas representadas em seu território, quais sejam, “Serras Cristalinas Litorâneas” e “Serranias do Baixo e Médio Itajaí-Açu”. Esta última compreende o recorte que é objeto do presente estudo, com área de 222,2 km<sup>2</sup> (Figura 1).



**Figura 1.** Localização geral do município de Blumenau/SC, da área de estudo e a distribuição dos deslizamentos utilizados como pontos de treinamento. Relevo representado pelo modelo de elevação sombreado.



Constitui área onde o relevo apresenta maior grau de dissecação, conformando montanhas e escarpas com contrastes altimétricos acentuados, vertentes de alta declividade com fases de relevo predominantemente ondulado a escarpado, fina densidade de drenagem, vales profundos (“V” fechado) normalmente balizados por planos aluviais descontínuos e localizados nos altos cursos de rios que pertencem à bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (IBGE 2002b) (Figura 1).

Considerando a distribuição dos condicionantes de natureza litoestrutural, a área de estudo está inserida no contexto do domínio morfoestrutural dos Cinturões Móveis (Cinturão Dom Feliciano), designado como Coberturas Molassóides e Vulcanitos Associados (IBGE 2004a). Está representado na área de estudo pelas unidades *foreland* (Grupo Itajaí) e *supracrustal* (Complexo São Miguel e Grupo Brusque) (Basei 1985, Castro et al. 2003, Basei et al. 2011).

Neste compartimento se destacam as feições geradas durante a transição Neoproterozoico/Cambriano na formação do Gondwana ocidental, bem como as relacionadas à reativação mesozoica, responsável pelo rifteamento precursor do oceano Atlântico Sul. A sequência vulcano-sedimentar do Grupo Brusque foi deformada e metamorfizada no Ciclo Brasileiro, em um primeiro evento colisional. Um segundo evento orogenético deformou inclusive os sedimentos mais jovens do Grupo Itajaí, com vergência para NW, colocando as litologias situadas a SE sobre os terrenos granulíticos do Cráton Luis Alves (Basei 1985, IBGE 2002, Castro et al. 2003, Basei et al. 2011).

A despeito de não ter sido feito levantamento sistemático visando o mapeamento pedológico da área de estudo em escala de detalhe, mas tomando-se como referência os trabalhos de IBGE (2003) e Potter et al. (2004), e observações de campo, é possível afirmar que a área de estudo é composta, predominantemente, por Neossolos Flúvicos, Gleissolos Háplicos, Cambissolos Háplicos e Argissolos Vermelho-Amarelos.

Quanto aos aspectos vinculados à vegetação natural da área de estudo, cabe mencionar que esta integra o Bioma Mata Atlântica, no domínio da região fitoecológica da Floresta Ombrófila Densa, representada pelas classes de formação conhecidas como Fluvial, Submontana, Montana e

Altomontana (Vibrans et al. 2013). Limitando o relato de Sevegnani et al. (2013) para a realidade da área de estudo, a alta representatividade de espécies arbóreas pioneiras nos remanescentes florestais constitui forte argumento na afirmação de que essas formações encontram-se muito alteradas e em processo de sucessão secundária, resultando em um padrão de mosaico, onde se manifestam todos os estágios sucessionais (Vibrans et al. 2013).

O clima da região pode ser caracterizado como temperado úmido com verões quentes e invernos brandos (cfa) segundo a classificação de Köppen (1948), com temperaturas médias anuais entre 18°C e 20°C e com pluviosidade variando entre 1.600 e 1.800 mm anuais. O comportamento climatológico da precipitação mensal de Blumenau apresenta uma estação chuvosa no verão (dezembro a março), um período mais seco entre abril e julho e uma estação chuvosa secundária nos meses de setembro e outubro (Severo 2009).

O evento meteorológico extremo de 2008, ao qual se vincula a ocorrência dos deslizamentos utilizados como referência no presente trabalho, pode ser compreendido como a associação de dois cenários predisponentes à manifestação generalizada das instabilidades em taludes e encostas naturais registradas na área de estudo (Silva Dias 2009, Severo 2009). O primeiro deles resulta de um acumulado de precipitações contínuas a partir do mês de julho e que se intensificaram a partir de outubro daquele ano, quando foram registradas as primeiras anomalias, com valores acumulados (353,2 mm) que superaram as médias históricas em cerca de três vezes (Silva Dias 2009, Severo 2009). O segundo cenário passa a se configurar a partir do dia 18 de novembro, com o ápice nos dias 22 e 23, quando os totais diários registrados ficaram torno de 250 mm de chuva. O acumulado mensal resultou em 1.001,7 mm, superando em seis vezes a média histórica (Severo 2009).

A despeito da histórica recorrência de desastres naturais, o evento pluviométrico extremo de novembro de 2008 figura como um novo paradigma regional no que se refere à gestão de riscos e desastres naturais. Revelou de forma contundente a existência de condições de elevada suscetibilidade natural, em virtude da manifestação generalizada de movimentos gravitacionais de massa e



processos correlatos, incorrendo em sérios prejuízos humanos, ambientais e materiais (Aumond & Sevegnani 2009, Frank & Sevegnani 2009).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Obtenção e preparo dos dados

A delimitação da área de estudo, através da compartimentação geomorfológica, foi realizada considerando os limites entre as unidades do Complexo Granulítico de Santa Catarina (C.G.SC) e as unidades do Grupo Itajaí, resultante de dados de campo obtidos através de mapeamentos realizados pela Diretoria de Geologia, Análise e Riscos Naturais da prefeitura de Blumenau, na escala 1:25.000 (Perdoncini *et al.*, não publicado).

As etapas envolvidas para a análise de suscetibilidade através da aplicação da técnica pesos de evidência podem ser sintetizadas da seguinte maneira: i) preparação dos mapas temáticos das evidências potencialmente úteis para a predição dos locais favoráveis a ocorrência de deslizamentos com dinâmica translacional; ii) seleção e definição dos pontos de treinamento obtidos através do inventário das cicatrizes de deslizamentos; iii) determinação da probabilidade a priori; iv) determinação dos ponderadores bayesianos ( $W+$  e  $W-$ ) de cada tema/evidência, tendo em vista as relações de frequências observadas entre a evidência

e a cicatriz do deslizamento, fase esta também denominada como estimativa de favorabilidade; v) reclassificação binária, maximizando a associação espacial mediante a seleção das classes favoráveis através do cálculo do contraste (C) e do valor de confiança (Studentized Contrast -  $S(C)$ ); vi) integração dos mapas binários e determinação da probabilidade a posteriori; vii) aplicação de testes estatísticos para avaliar a condição de independência dos planos de informação entre si, e identificação do melhor esquema de combinação entre os temas selecionados; viii) realização dos testes de validação dos modelos preditivos gerados, através da análise de eficiência de classificação; ix) seleção e definição do melhor modelo e elaboração da carta de suscetibilidade.

Foram utilizados sete temas de evidências conforme a disponibilidade dos dados aplicáveis na escala de referência adotada. Os temas selecionados representam potenciais indicadores de favorabilidade para a composição de modelos de suscetibilidade a deslizamentos, quais sejam, unidades geológicas, faixas de distância de lineamentos morfoestruturais, de orientação de vertentes, curvaturas horizontal e vertical, declividade e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). A relação dos temas de evidências utilizados para a análise de favorabilidade e as respectivas fontes de dados e escalas de referência, encontra-se disposta no Quadro 1.

**Quadro 1.** Relação dos temas de evidências utilizados para análise de favorabilidade e composição de modelos de suscetibilidade a deslizamentos da área de estudo.

| Nº | Tema de Evidência                                    | Fonte  | Escala de Mapeamento | Resolução Espacial                |
|----|--|--|----------------------|-----------------------------------|
| 1  | Unidades geológicas                                  | A partir da compilação de:                       |                      |                                   |
|    |  | Basei <i>et al.</i> (2011)                       | 1:250.000            | -----                             |
|    |  | Iglesias <i>et al.</i> (2011)                    | 1:250.000            | -----                             |
|    |  | Perdoncini <i>et al.</i> (não publicado)         | 1:25.000             | -----                             |
| 2  | Distância de lineamentos morfoestruturais            | Interpretação do Modelo Digital do Terreno (MDT) | 1:25.000             | 5 m                               |
| 3  | Orientação de vertente                               | Extraído a partir do MDT                         | 1:10.000             | 5 m                               |
| 4  | Curvatura horizontal                                 | Extraído a partir do MDT                         | 1:10.000             | 5 m                               |
| 5  | Curvatura vertical                                   | Extraído a partir do MDT                         | 1:10.000             | 5 m                               |
| 6  | Declividade  | Extraído a partir do MDT                         | 1:10.000             | 5 m                               |
| 7  | Índice de vegetação por diferença normalizada - NDVI | Imagens TM Landsat 5® (2006)                     | -----                | 30 m com reclassificação para 5 m |

O mapa das unidades geológicas resulta da integração de dados de distintas fontes (Basei *et al.* 2011, Iglesias *et al.* 2011, BLUMENAU, não publicado), e que representam a geologia da área através de diferentes escalas de mapeamento. As expressões topográficas retilíneas foram adotadas como critérios na identificação dos lineamentos morfoestruturais a partir da interpretação do mapa de relevo sombreado com iluminação simulada em diferentes direções, derivado do modelo digital do terreno (MDT). Através do MDT foram realizadas as derivações básicas da informação topográfica através do cálculo de atributos primários e secundários do relevo (clinografia, curvatura - vertical e horizontal, orientação das encostas e mapas de sombreado). Os dados utilizados para a elaboração do modelo digital do terreno (MDT) da área de estudo, advém da base planialtimétrica do município de Blumenau, produto da restituição de levantamento aerofotogramétrico (Aeroimagem 2003), elaborada na escala 1:10.000, com curvas de nível equidistantes em 5 m. Para o cálculo do NDVI foram utilizados os dados do sensor Thematic Mapper (TM) do satélite Landsat 5 (bandas TM3 e TM4), com resolução de 30 m, e reamostrados com 5 m.

A definição dos pontos de treinamento (deslizamentos) contou com a triagem e complementação do banco de dados da Diretoria de Geologia, Análise e Riscos Naturais da Prefeitura Municipal Blumenau (BLUMENAU, Não publicado). O inventário das cicatrizes de deslizamento foi conduzido através de levantamentos de campo apoiados pela interpretação visual de imagens de satélite (QUICKBIRD®, mosaico de 2008 e de 2009, resolução espacial de 60 cm). Os critérios adotados para a distinção entre as diferentes partes dos movimentos foram adaptados da proposta de Highland & Bobrowsky (2008). Para cada cicatriz considerada, foram traçados os polígonos relativos a toda a área diretamente afetada pelo movimento, distinguindo-se a zona de depleção e a área de dejeção. A partir de então, foi definido um ponto de treinamento, correspondente ao centróide da área considerada como a zona de depleção, em concordância com a abordagem adotada por Poli & Sterlachini (2007), Neuhauser & Terhorst (2007), Dahal *et al.* (2008) e Pereira *et al.* (2012).

No presente trabalho foram adotados 205 deslizamentos como pontos de treinamento, associados ao evento de 2008 e que supostamente expressariam condições de suscetibilidade natural, distinguindo-se daqueles típicos de talude de corte ou aterro, e que, portanto, representariam as situações de suscetibilidade induzida.

As zonas de depleção dos 205 deslizamentos utilizados como referência para o compartimento 2, abrange uma área total aproximada de 0,37 Km<sup>2</sup> (370.625 m<sup>2</sup>) o que, segundo a resolução espacial adotada, corresponde a 14.825 unidades de área (pixels). O tamanho médio das zonas de depleção no domínio do Cinturão Dom Feliciano é de 0,002 Km<sup>2</sup> (1.807,9 m<sup>2</sup>), sendo que a menor apresenta área de 237 m<sup>2</sup> e a maior de 19.010 m<sup>2</sup>.

### 3.2 Análise dos dados

No presente trabalho foi utilizada a técnica de modelagem espacial pesos de evidência (*WofE - Weights of Evidence*) (Bonham-Carter 1994).

A definição do tamanho da unidade de área para a análise de favorabilidade obedeceu a resolução espacial derivada da base planialtimétrica utilizada, ou seja, 0,000025 km<sup>2</sup> (25 m<sup>2</sup>) e, como função da abordagem adotada de representação das zonas de depleção através do ponto centróide (205 pontos de treinamento) e do tamanho da área de estudo (8.884.826 unidades), o valor obtido para a probabilidade *a priori* foi de 0,000023.

Os procedimentos de cálculo dos ponderadores ( e ) foram aplicados, aos dados geológicos (unidades geológicas e distância de lineamentos negativos), geomorfológicos (orientação de vertentes, curvatura horizontal e vertical e declividade) e de cobertura do solo (NDVI). O tema distância de lineamentos foi analisado através do método cumulativo ascendente, enquanto que os demais temas foram através do método categórico.

Com vistas à simplificação da análise, a área correspondente aos terraços e planícies oriundos da deposição fluvial, não foi tratada isoladamente e, portanto, incluída no somatório da área dos dois compartimentos delimitados. Ainda, em razão da natureza qualitativa discreta dos dados relativos às unidades geológicas, os mesmos foram consi-

derados apenas na etapa da análise de favorabilidade, não sendo utilizados para a composição dos esquemas de integração dos pesos.

A partir da análise de favorabilidade, foram gerados seis modelos, que compreendem diferentes combinações entre os temas de evidência, com vistas à determinação da probabilidade *a posteriori*, e identificação do resultado que melhor atende aos requisitos de independência dos dados e com o melhor ajuste quanto à eficiência de classificação e de predição.

A independência condicional entre os temas de evidência de cada compartimento foi avaliada através do emprego de dois testes de análise global, a saber, o teste da Razão de Independência Condicional (CIR – *Conditional Independence Ratio*) (Bonham-Carter 1994) e o teste de Agterberg & Cheng (2002) (ACCIT – *Agterberg & Cheng Conditional Independence Test*). O teste da hipótese de independência foi conduzido adotando-se um intervalo de confiança de 98% de probabilidade ( $z = 2,33$ ). Assim, o maior valor do indicador “ACCIT” foi utilizado como critério de escolha do modelo que melhor atende aos requisitos de independência.

A avaliação da qualidade de ajuste dos modelos com relação à eficiência de classificação, considerando os pontos de treinamento, e à eficiência de predição, considerando toda a área das zonas de depleção, foi conduzida através da análise da curva da taxa de sucesso (SRC – *Success Rate Curve*), utilizando como referência o valor da área sob a curva (AUC – *Area Under Curve*) para aferir o ajuste do modelo. Os valores de AUC foram calculados conforme sugerido por Sawatzky et al. (2007).

Os modelos que atenderam os requisitos de independência condicional e apresentaram razoáveis indicadores de eficiência de classificação

e predição, foram reclassificados, resultando em quatro classes que representam diferentes níveis de suscetibilidade a deslizamentos, quais sejam, baixa, média, alta e muito alta suscetibilidade. O limite estabelecido para a definição da classe média suscetibilidade foi o valor da probabilidade *a priori*, e para o das demais classes, através de avaliação visual, foram considerados os pontos significativos de inflexão na curva de distribuição dos valores de probabilidade *a posteriori* (CAPP Curve) em relação à proporção da área acumulada, conforme sugerido por Sawatzky et al. (2007). Trata-se de uma classificação relativa aplicada somente dentro da área de estudo, segundo sua suscetibilidade (probabilidade *a posteriori*). Por princípio, busca-se incluir o maior número de deslizamentos nas classes mais altas, em uma área mínima (Macedo & Bressani 2013).

O aplicativo *Arc-Spatial Data Modeller* (ArcSDM), versão 4 (Sawatzky et al. 2007), que opera como extensão livre na plataforma ArcGIS 9.2 (ESRI®), foi utilizado para realizar todas as etapas do processo de análise espacial.

## 4 RESULTADOS

Entre as quinze unidades geológicas representadas na área de estudo, cinco delas atenderam os requisitos de favorabilidade, quais sejam, as unidades síltico-arenosa ( $C/s(C) = 8,05$ ), conglomerática ( $C/s(C) = 2,32$ ) e arenosa ( $C/s(C) = 2,81$ ) da Formação Gaspar, que juntas somam 28% dos deslizamentos utilizados como referência, a Formação Ribeirão Carvalho ( $C/s(C) = 8,07$ ) com 43% dos deslizamentos, e os diques ácidos ( $C/s(C) = 2,43$ ) com apenas uma ocorrência registrada (Tabela 1).

**Tabela 1.** Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das unidades geológicas da unidade geomorfológica “Serras do Baixo e Médio Itajaí-Açu”, no município de Blumenau (SC), Brasil.

| Classes                                      | Área (Km²) | %     | Pontos de treinamento | %     | W*    | s(W*) | W-    | s(W-) | C     | s(C) | C/s(C) |
|--|------------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|
| Formação Gaspar: unidade siltico-arenosa     | 12,84      | 5,78  | 41                    | 39,05 | 1,24  | 0,16  | -0,16 | 0,08  | 1,41  | 0,17 | 8,05   |
| Formação Gaspar: unidade conglomerática      | 2,53       | 1,14  | 6                     | 5,71  | 0,94  | 0,41  | -0,02 | 0,07  | 0,96  | 0,41 | 2,32   |
| Formação Gaspar: unidade arenosa             | 5,16       | 2,32  | 11                    | 10,48 | 0,84  | 0,30  | -0,03 | 0,07  | 0,87  | 0,31 | 2,81   |
| Formação Ribeirão Carvalho                   | 43,90      | 19,76 | 89                    | 84,76 | 0,79  | 0,11  | -0,35 | 0,09  | 1,14  | 0,14 | 8,07   |
| Formação Ribeirão do Bode                    | 28,45      | 12,80 | 14                    | 13,33 | -0,63 | 0,27  | 0,07  | 0,07  | -0,69 | 0,28 | -2,51  |
| Formação Ribeirão Neisse                     | 21,65      | 9,74  | 17                    | 16,19 | -0,16 | 0,24  | 0,02  | 0,07  | -0,18 | 0,25 | -0,70  |
| Formação Nova Rússia                         | 12,76      | 5,74  | 2                     | 1,90  | -1,77 | 0,71  | 0,05  | 0,07  | -1,82 | 0,71 | -2,56  |
| Formação Nova Rússia: unidade conglomerática | 0,75       | 0,34  | 0                     | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| Complexo São Miguel                          | 19,52      | 8,78  | 17                    | 16,19 | -0,06 | 0,24  | 0,01  | 0,07  | -0,06 | 0,25 | -0,25  |
| Grupo Brusque                                | 57,74      | 25,98 | 6                     | 5,71  | -2,18 | 0,41  | 0,27  | 0,07  | -2,45 | 0,41 | -5,92  |
| Diques ácidos                                | 0,09       | 0,04  | 1                     | 0,95  | 2,43  | 1,00  | 0,00  | 0,07  | 2,44  | 1,00 | 2,43   |
| Granito Faxinal                              | 1,91       | 0,86  | 0                     | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| Granito Guabiruba                            | 1,41       | 0,63  | 1                     | 0,95  | -0,26 | 1,00  | 0,00  | 0,07  | -0,26 | 1,00 | -0,26  |
| Diques básicos                               | 0,01       | 0,00  | 0                     | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| Aluvião                                      | 11,83      | 5,32  | 0                     | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| Rio Itajaí-açu                               | 1,64       | 0,74  | 0                     | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00   |

**Onde:** W\* = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo); s(W\*) = desvio padrão do peso positivo; W- = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo); s(W-) = desvio padrão do peso negativo; C = contraste; s(C) = desvio padrão do contraste e; C/s(C) = valor de confiança.

Os resultados da análise de favorabilidade a deslizamentos das faixas de distância de lineamentos morfoestruturais (Tabela 2) indicam que, na área de estudo, a influência exercida manifesta-se até a distância de 300 m, onde foram registrados 77% dos deslizamentos.

**Tabela 2.** Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das faixas de distância de lineamentos morfoestruturais da unidade geomorfológica “Serras do Baixo e Médio Itajaí-Açu”, no município de Blumenau (SC), Brasil.

| Classes      | Área (Km²) | %      | Pontos de treinamento | %      | W*    | s(W*) | W-    | s(W-) | C      | s(C)  | C/s(C) |
|--------------|------------|--------|-----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 0 a 50 m     | 33,34      | 15,01  | 26                    | 12,68  | -0,17 | 0,20  | 0,03  | 0,07  | -0,20  | 0,21  | -0,93  |
| 50 a 100 m   | 64,51      | 29,03  | 56                    | 27,32  | -0,06 | 0,13  | 0,02  | 0,08  | -0,09  | 0,16  | -0,54  |
| 100 a 150 m  | 92,49      | 41,63  | 93                    | 45,37  | 0,09  | 0,10  | -0,07 | 0,09  | 0,15   | 0,14  | 1,08   |
| 150 a 200 m  | 116,47     | 52,42  | 119                   | 58,05  | 0,10  | 0,09  | -0,13 | 0,11  | 0,23   | 0,14  | 1,61   |
| 200 a 250 m  | 136,48     | 61,42  | 140                   | 68,29  | 0,11  | 0,08  | -0,20 | 0,12  | 0,30   | 0,15  | 2,01   |
| 250 a 300 m  | 153,23     | 68,96  | 157                   | 76,59  | 0,10  | 0,08  | -0,28 | 0,14  | 0,39   | 0,16  | 2,34   |
| 300 a 350 m  | 167,06     | 75,18  | 164                   | 80,00  | 0,06  | 0,08  | -0,21 | 0,16  | 0,28   | 0,17  | 1,58   |
| 350 a 400 m  | 177,86     | 80,04  | 169                   | 82,44  | 0,03  | 0,08  | -0,13 | 0,17  | 0,16   | 0,18  | 0,85   |
| 400 a 450 m  | 186,37     | 83,87  | 178                   | 86,83  | 0,03  | 0,08  | -0,20 | 0,19  | 0,23   | 0,21  | 1,14   |
| 450 a 900 m  | 218,45     | 98,31  | 198                   | 96,59  | -0,02 | 0,07  | 0,73  | 0,38  | -0,74  | 0,38  | -1,93  |
| 900 a 1350 m | 222,10     | 99,96  | 204                   | 99,51  | 0,00  | 0,07  | 4,07  | 1,00  | -4,08  | 1,00  | -4,06  |
| > 1350 m     | 222,20     | 100,00 | 205                   | 100,00 | 0,00  | 0,07  | 10,68 | 14,14 | -10,68 | 14,14 | -0,76  |

**Onde:** W\* = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo); s(W\*) = desvio padrão do peso positivo; W- = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo); s(W-) = desvio padrão do peso negativo; C = contraste; s(C) = desvio padrão do contraste e; C/s(C) = valor de confiança.

Com relação às classes de orientação das encostas, depreende-se que as vertentes voltadas para os quadrantes Norte ( $C/s(C) = 1,10$ ) e Leste ( $C/s(C) = 1,89$ ) apresentam-se como favoráveis na área de estudo, com 32% e 31% dos deslizamentos respectivamente (Tabela 3).

**Tabela 3.** Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de orientação das encostas da unidade geomorfológica “Serranias do Baixo e Médio Itajaí-Açu”, no município de Blumenau (SC), Brasil.

| Classes | Área (Km <sup>2</sup> ) | %     | Pontos de treinamento | %     | W <sup>+</sup> | s(W <sup>+</sup> ) | W <sup>-</sup> | s(W <sup>-</sup> ) | C     | s(C) | C/s(C) |
|---------|-------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------|------|--------|
| Plano   | 6,55                    | 2,95  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| Norte   | 62,73                   | 28,23 | 65                    | 31,71 | 0,12           | 0,12               | -0,05          | 0,08               | 0,17  | 0,15 | 1,10   |
| Leste   | 55,53                   | 24,99 | 63                    | 30,73 | 0,21           | 0,13               | -0,08          | 0,08               | 0,29  | 0,15 | 1,89   |
| Sul     | 45,81                   | 20,62 | 46                    | 22,44 | 0,08           | 0,15               | -0,02          | 0,08               | 0,11  | 0,17 | 0,64   |
| Oeste   | 51,51                   | 23,18 | 31                    | 15,12 | -0,43          | 0,18               | 0,10           | 0,08               | -0,53 | 0,20 | -2,71  |

**Onde:** W<sup>+</sup> = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo); s(W<sup>+</sup>) = desvio padrão do peso positivo; W<sup>-</sup> = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo); s(W<sup>-</sup>) = desvio padrão do peso negativo; C = contraste; s(C) = desvio padrão do contraste e; C/s(C) = valor de confiança.

As encostas lateralmente convergentes (51% dos casos) (Tabela 5), respectivamente para os dados de curvatura horizontal e vertical, foram as que apresentaram maior favorabilidade. As encostas longitudinalmente convexas ( $C/s(C) = 1,18$ , com 60% dos casos) (Tabela 4) e as que apresentaram maior favorabilidade.

**Tabela 4.** Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de curvatura horizontal da unidade geomorfológica “Serranias do Baixo e Médio Itajaí-Açu”, no município de Blumenau (SC), Brasil.

| Classes     | Área (Km <sup>2</sup> ) | %     | Pontos de treinamento | %     | W <sup>+</sup> | s(W <sup>+</sup> ) | W <sup>-</sup> | s(W <sup>-</sup> ) | C     | s(C) | C/s(C) |
|-------------|-------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------|------|--------|
| Convergente | 80,16                   | 36,08 | 124                   | 60,49 | 0,52           | 0,09               | -0,48          | 0,11               | 1,00  | 0,14 | 6,98   |
| Retilínea   | 27,69                   | 12,46 | 6                     | 2,93  | -1,45          | 0,41               | 0,10           | 0,07               | -1,55 | 0,41 | -3,75  |
| Divergente  | 114,27                  | 51,43 | 75                    | 36,59 | -0,34          | 0,12               | 0,27           | 0,09               | -0,61 | 0,15 | -4,19  |

**Onde:** W<sup>+</sup> = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo); s(W<sup>+</sup>) = desvio padrão do peso positivo; W<sup>-</sup> = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo); s(W<sup>-</sup>) = desvio padrão do peso negativo; C = contraste; s(C) = desvio padrão do contraste e; C/s(C) = valor de confiança.

**Tabela 5.** Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de curvatura vertical da unidade geomorfológica “Serranias do Baixo e Médio Itajaí-Açu”, no município de Blumenau (SC), Brasil.

| Classes   | Área (Km <sup>2</sup> ) | %     | Pontos de treinamento | %     | W <sup>+</sup> | s(W <sup>+</sup> ) | W <sup>-</sup> | s(W <sup>-</sup> ) | C     | s(C) | C/s(C) |
|-----------|-------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------|------|--------|
| Convexa   | 104,59                  | 47,07 | 105                   | 51,22 | 0,08           | 0,10               | -0,08          | 0,10               | 0,17  | 0,14 | 1,18   |
| Retilínea | 21,79                   | 9,81  | 8                     | 3,90  | -0,92          | 0,35               | 0,06           | 0,07               | -0,99 | 0,36 | -2,73  |
| Côncava   | 95,74                   | 43,09 | 92                    | 44,88 | 0,04           | 0,10               | -0,03          | 0,09               | 0,07  | 0,14 | 0,51   |

**Onde:** W<sup>+</sup> = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo); s(W<sup>+</sup>) = desvio padrão do peso positivo; W<sup>-</sup> = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo); s(W<sup>-</sup>) = desvio padrão do peso negativo; C = contraste; s(C) = desvio padrão do contraste e; C/s(C) = valor de confiança.

Com relação às classes de declividade, a favorabilidade está expressa na faixa que varia de 25 a 75° (com 75% dos casos) (Tabela 6).



**Tabela 6.** Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes de declividade das encostas da unidade geomorfológica “Serranias do Baixo e Médio Itajaí-Açu”, no município de Blumenau (SC), Brasil.

| Classes  | Área (Km <sup>2</sup> ) | %     | Pontos de treinamento | %     | W <sup>+</sup> | s(W <sup>+</sup> ) | W <sup>-</sup> | s(W <sup>-</sup> ) | C     | s(C) | C/s(C) |
|----------|-------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------|------|--------|
| 0 a 5°   | 18,55                   | 8,35  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| 5 a 10°  | 11,54                   | 5,19  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| 10 a 15° | 19,17                   | 8,63  | 3                     | 1,46  | -1,77          | 0,58               | 0,08           | 0,07               | -1,85 | 0,58 | -3,18  |
| 15 a 20° | 30,18                   | 13,58 | 17                    | 8,29  | -0,49          | 0,24               | 0,06           | 0,07               | -0,55 | 0,25 | -2,18  |
| 20 a 25° | 40,34                   | 18,16 | 40                    | 19,51 | 0,07           | 0,16               | -0,02          | 0,08               | 0,09  | 0,18 | 0,50   |
| 25 a 30° | 40,48                   | 18,22 | 52                    | 25,37 | 0,33           | 0,14               | -0,09          | 0,08               | 0,42  | 0,16 | 2,63   |
| 30 a 35° | 30,52                   | 13,73 | 51                    | 24,88 | 0,59           | 0,14               | -0,14          | 0,08               | 0,73  | 0,16 | 4,53   |
| 35 a 40° | 17,85                   | 8,03  | 21                    | 10,24 | 0,24           | 0,22               | -0,02          | 0,07               | 0,27  | 0,23 | 1,16   |
| 40 a 45° | 8,47                    | 3,81  | 14                    | 6,83  | 0,58           | 0,27               | -0,03          | 0,07               | 0,61  | 0,28 | 2,22   |
| 45 a 75° | 5,01                    | 2,25  | 7                     | 3,41  | 0,42           | 0,38               | -0,01          | 0,07               | 0,43  | 0,38 | 1,11   |
| ≥75°     | 0,02                    | 0,01  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |

Onde: W<sup>+</sup> = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo); s(W<sup>+</sup>) = desvio padrão do peso positivo; W<sup>-</sup> = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo); s(W<sup>-</sup>) = desvio padrão do peso negativo; C = contraste; s(C) = desvio padrão do contraste e; C/s(C) = valor de confiança.

Para o tema NDVI, as faixas de valores que atenderam os requisitos de favorabilidade foram entre 0,25 e 0,30 (com 4% dos casos) e entre 0,35 a 0,50 (com 38% dos casos).

**Tabela 7.** Resultado da análise de favorabilidade a deslizamentos translacionais das classes do NDVI de cada compartimento geomorfológico delimitado no município de Blumenau (SC), Brasil.

| Classes       | Área (Km <sup>2</sup> ) | %     | Pontos de treinamento | %     | W <sup>+</sup> | s(W <sup>+</sup> ) | W <sup>-</sup> | s(W <sup>-</sup> ) | C     | s(C) | C/s(C) |
|---------------|-------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-------|------|--------|
| -0,65 a -0,60 | 0,01                    | 0,00  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,60 a -0,55 | 0,05                    | 0,02  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,55 a -0,50 | 0,30                    | 0,13  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,50 a -0,45 | 0,34                    | 0,15  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,45 a -0,40 | 0,10                    | 0,05  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,40 a -0,35 | 0,11                    | 0,05  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,35 a -0,30 | 0,08                    | 0,04  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,30 a -0,25 | 0,08                    | 0,04  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,25 a -0,20 | 0,05                    | 0,02  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,20 a -0,15 | 0,07                    | 0,03  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,15 a -0,10 | 0,21                    | 0,09  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,10 a -0,05 | 0,45                    | 0,20  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| -0,05 a 0,00  | 2,58                    | 1,16  | 1                     | 0,49  | -0,87          | 1,00               | 0,01           | 0,07               | -0,87 | 1,00 | -0,87  |
| 0,00 a 0,05   | 1,65                    | 0,74  | 2                     | 0,98  | 0,27           | 0,71               | 0,00           | 0,07               | 0,28  | 0,71 | 0,39   |
| 0,05 a 0,10   | 2,46                    | 1,11  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| 0,10 a 0,15   | 2,86                    | 1,29  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |
| 0,15 a 0,20   | 3,62                    | 1,63  | 5                     | 2,44  | 0,40           | 0,45               | -0,01          | 0,07               | 0,41  | 0,45 | 0,91   |
| 0,20 a 0,25   | 4,19                    | 1,88  | 3                     | 1,46  | -0,25          | 0,58               | 0,00           | 0,07               | -0,26 | 0,58 | -0,44  |
| 0,25 a 0,30   | 5,32                    | 2,40  | 8                     | 3,90  | 0,49           | 0,35               | -0,02          | 0,07               | 0,50  | 0,36 | 1,40   |
| 0,30 a 0,35   | 6,44                    | 2,90  | 5                     | 2,44  | -0,17          | 0,45               | 0,00           | 0,07               | -0,18 | 0,45 | -0,39  |
| 0,35 a 0,40   | 10,72                   | 4,82  | 11                    | 5,37  | 0,11           | 0,30               | -0,01          | 0,07               | 0,11  | 0,31 | 0,36   |
| 0,40 a 0,45   | 16,60                   | 7,47  | 20                    | 9,76  | 0,27           | 0,22               | -0,03          | 0,07               | 0,29  | 0,24 | 1,24   |
| 0,45 a 0,50   | 34,58                   | 15,56 | 47                    | 22,93 | 0,39           | 0,15               | -0,09          | 0,08               | 0,48  | 0,17 | 2,88   |
| 0,50 a 0,55   | 45,32                   | 20,40 | 44                    | 21,46 | 0,05           | 0,15               | -0,01          | 0,08               | 0,06  | 0,17 | 0,38   |
| 0,55 a 0,60   | 64,39                   | 28,98 | 46                    | 22,44 | -0,26          | 0,15               | 0,09           | 0,08               | -0,34 | 0,17 | -2,06  |
| 0,60 a 0,65   | 19,40                   | 8,73  | 13                    | 6,34  | -0,32          | 0,28               | 0,03           | 0,07               | -0,35 | 0,29 | -1,21  |
| 0,65 a 0,70   | 0,14                    | 0,07  | 0                     | 0,00  | 0,00           | 0,00               | 0,00           | 0,00               | 0,00  | 0,00 | 0,00   |

Onde: W<sup>+</sup> = razão de suficiência ajustada ao logaritmo natural (peso positivo); s(W<sup>+</sup>) = desvio padrão do peso positivo; W<sup>-</sup> = razão de necessidade ajustada ao logaritmo natural (peso negativo); s(W<sup>-</sup>) = desvio padrão do peso negativo; C = contraste; s(C) = desvio padrão do contraste e; C/s(C) = valor de confiança.

No que concerne à condição de independência dos modelos gerados (Tabela 9) todos os seis esquemas de combinação atenderam aos requisitos de independência, conquanto, entre eles, o modelo 1, que integra os dados dos temas curvatura horizontal e declividade foi o que apresentou

o maior valor para o indicador ACCIT (26,51) e, o modelo 6, que integra os dados dos temas orientação de vertentes, curvatura horizontal, declividade e NDVI foi o que apresentou o menor valor para o indicador ACCIT (6,74).

**Tabela 8.** Relação dos esquemas de integração dos diferentes temas de evidência e resultados da análise global de independência espacial dos dados, dos modelos de suscetibilidade da unidade geomorfológica Serrania do Baixo e Médio Itajaí-Açu no município de Blumenau (SC), Brasil.

| Nº | Modelos       | T      | (T-n) | s(T)  | ACCIT | CIR  |
|----|---------------|--------|-------|-------|-------|------|
| 1  | 4 + 6         | 210.90 | 5.90  | 13.91 | 26.51 | 0.97 |
| 2  | 5 + 6         | 209.00 | 4.00  | 12.75 | 25.71 | 0.98 |
| 3  | 2 + 4 + 6     | 210.40 | 5.40  | 11.44 | 21.26 | 0.97 |
| 4  | 2 + 3 + 4 + 6 | 210.60 | 5.60  | 7.00  | 10.71 | 0.97 |
| 5  | 2 + 4 + 6 + 7 | 211.00 | 6.00  | 6.74  | 9.70  | 0.97 |
| 6  | 3 + 4 + 6 + 7 | 209.00 | 4.00  | 4.61  | 6.74  | 0.98 |

2 - Distância de Lineamentos; 3 - Orientação de vertente; 4 - Curvatura horizontal; 5 - Curvatura vertical; 6 - Declividade e; 7 - NDVI; T - Somatório dos valores de probabilidade a posteriori; n - Número de pontos de treinamento; s(T) - Desvio padrão de T; ACCIT - Valor do teste Aterberg & Cheng de independência condicional; CIR - Razão de independência condicional.

Com relação à validação dos modelos, os resultados obtidos através das análises de eficiência de classificação e de predição demonstram respostas diferenciadas entre os modelos (Tabela 10). A maior eficiência de classificação ( $AUC^1 = 0,71$ ) resultou da integração dos pesos representada pelos modelos 5 e 6. Contudo, o modelo 6 foi o que

apresentou a maior eficiência de predição ( $AUC^2 = 0,68$ ). Por sua vez, o modelo 1 foi o que apresentou a maior proporção de pontos de treinamento (81%) e da área das zonas de depleção classificados corretamente, que, aliado ao razoável valor da área sob a curva para ambos os parâmetros, também atesta o seu bom desempenho.

**Tabela 9.** Indicadores de eficiência de classificação e predição dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos que atenderam os requisitos de independência espacial da unidade geomorfológica Serrania do Baixo e Médio Itajaí-Açu no município de Blumenau (SC), Brasil.

| Modelos | Temas combinados | AUC <sup>1</sup> | % <sup>1</sup> | AUC <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> |
|---------|------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| 1       | 4 + 6            | 0.70             | 81             | 0.58             | 73             |
| 2       | 5 + 6            | 0.65             | 70             | 0.54             | 57             |
| 3       | 2 + 4 + 6        | 0.70             | 76             | 0.59             | 63             |
| 4       | 2 + 3 + 4 + 6    | 0.69             | 70             | 0.64             | 58             |
| 5       | 2 + 4 + 6 + 7    | 0.71             | 70             | 0.66             | 59             |
| 6       | 3 + 4 + 6 + 7    | 0.71             | 68             | 0.68             | 59             |

2 - Distância de Lineamentos; 3 - Orientação de vertente; 4 - Curvatura horizontal; 5 - Curvatura vertical; 6 - Declividade; 7 - NDVI; AUC<sup>1</sup> - Valor da área sob a curva considerando os pontos de treinamento; %<sup>1</sup> - Frequência relativa dos pontos de treinamento classificados corretamente; AUC<sup>2</sup> - Valor da área sob a curva considerando a área total das zonas de depleção; %<sup>2</sup> - Proporção da área total das zonas de depleção classificada corretamente.

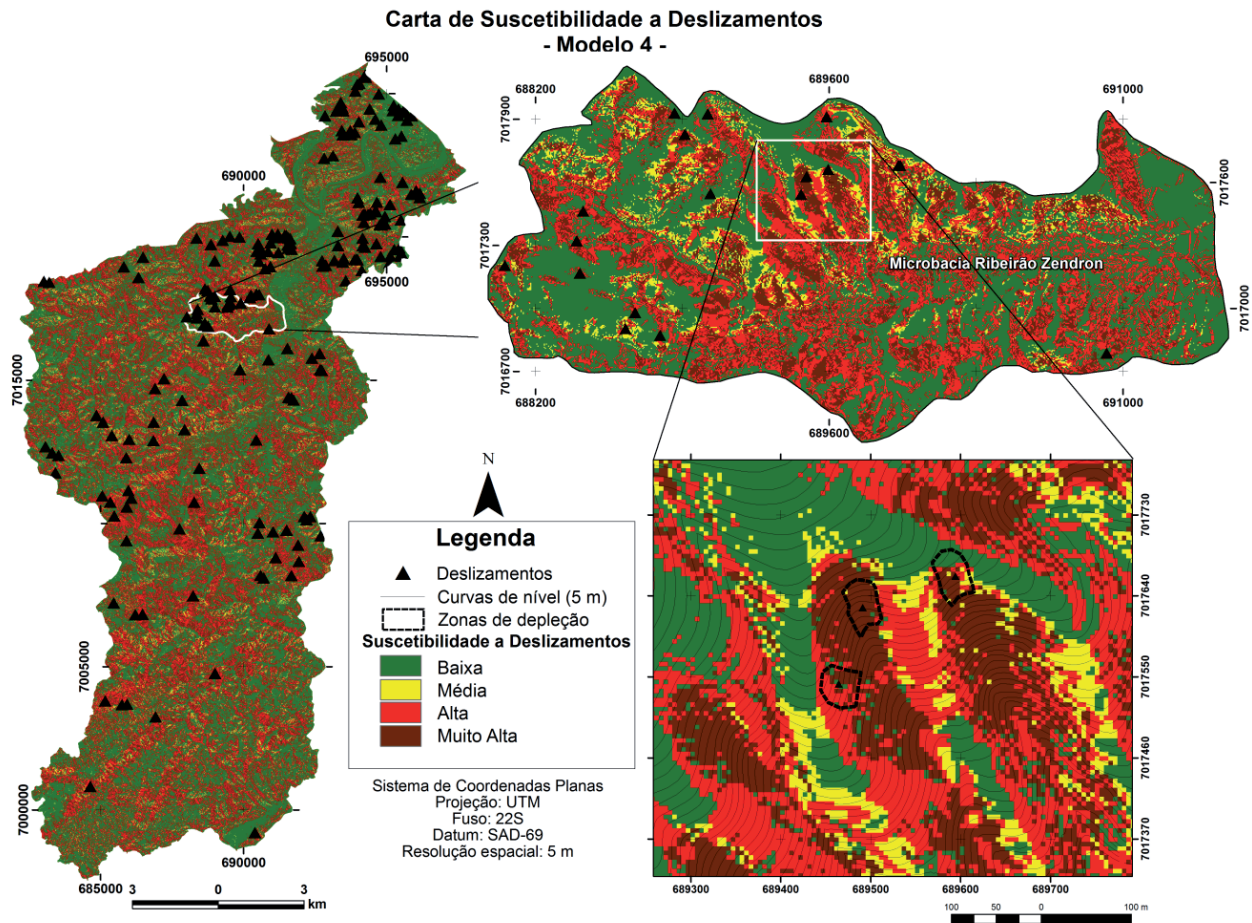
Através da metodologia adotada e dos modelos selecionados, é possível identificar que a probabilidade *a posteriori* variou entre 2 a 6 vezes

o valor da probabilidade *a priori*. Entre os seis modelos, as situações de alta e muito alta suscetibilidade variam entre 22% (modelo 2) a 37% (modelo

4) da área de abrangência da unidade geomorfológica Serrania do Baixo Médio Itajaí-Açu no município de Blumenau, na escala 1:25.000.

A distribuição espacial da suscetibilidade a deslizamentos do modelo 4 (que apresentou a

maior área classificada como de alta e muito alta suscetibilidade), que integra os pesos dos temas distância de lineamentos, orientação de vertente, curvatura horizontal e declividade, encontra-se representada na Figura 2.



**Figura 2.** Carta de suscetibilidade a deslizamentos (modelo 4) da unidade geomorfológica Serrania do Baixo e Médio Vale do Itajaí-Açu no município de Blumenau/SC. Articulação de recortes da área para ilustrar o resultado através de detalhamento progressivo da escala de representação.

Esse modelo resulta da combinação de pesos calculados de fatores predisponentes frequentemente associados à ocorrência de cicatrizes de deslizamento em literatura técnico-científica (CPRM/IPT 2014), quais sejam, distância de lineamentos morfoestruturais, orientação das encostas, curvatura horizontal e declividade. A combinação entre esses fatores pode refletir a ação combinada de aspectos geológicos, geomorfológicos e hidro-lógico-pedológico, influenciando a distribuição das cicatrizes de deslizamento (Stabile et al. 2013; CPRM/IPT 2014).

A importância da disposição das feições do relevo associadas aos lineamentos morfoestruturais (correlatos a fraturas, juntas, zonas de falhas e outras descontinuidades) traduz-se na influência destes exercida sobre o modelamento (Soares & Fiori 1975). A favorabilidade observada (dentro da faixa de distância de até 200 m) pode estar refletindo, de maneira geral, a influência de estruturas geológicas, condicionando o surgimento de descontinuidades mecânicas e hidráulicas, conferindo maior predisposição à instabilizações (Frasca & Sartori 1998, Magalhães & Cella 1998).



A orientação das vertentes mantém relação direta com a exposição à insolação, influenciando nas taxas de evapotranspiração e no teor de água do solo (Soares et al. 2002, Geroy et al. 2011). Neste sentido, é possível presumir que as encostas situadas nas faces de menor insolação apresentem maiores teores de umidade antecedente do solo, influenciando na quantidade de água que poderá infiltrar e ser estocada até o solo atingir a condição limite de estabilidade (Baum & Godt 2010, Hawke & McConchie 2011). A favorabilidade de vertentes voltadas para o quadrante sul pode refletir os efeitos decorrentes de menor exposição à insolação sobre a estabilidade das encostas na área de estudo. A concentração de fluxo hídrico orientada pela forma lateralmente côncava predispõe a formação de zonas com diferentes intensidades de saturação hídrica, muitas vezes traduzindo-se nos locais de maior sujeição à redução da coesão aparente ou às condições de poro-pressões positivas críticas, especialmente nos eventos de intensa precipitação pluviométrica (Montgomery & Dietrich 1994, Fernandes et al. 2004, Vieira & Fernandes 2004, Fiori & Carmignani 2009). A influência da declividade está vinculada com a magnitude das forças gravitacionais atuantes, e que se expressa através do peso por unidade de área dos materiais que constituem as vertentes (Holtz & Kovacz 1981).

## 5 CONCLUSÕES

Na área de abrangência da unidade geomorfológica Serrania do Baixo e Médio Itajaí-Açu, no município de Blumenau/SC, seis modelos de suscetibilidade atenderam os pressupostos de independência espacial, concorrendo com sutis diferenças quanto à eficiência de classificação e de predição.

O modelo que integra os valores das classes dos fatores orientação das vertentes, curvatura horizontal, declividade e NDVI, compreende àquele que apresentou os melhores indicadores de eficiência de classificação e predição. Contudo, o modelo que integra os valores das classes dos fatores distância de lineamentos morfoestruturais, orientação das encostas, curvatura horizontal e declividade, além de atender os requisitos de independência espacial e de eficiência de

classificação e predição, foi o que apresentou a maior área classificada como de alta e muito alta suscetibilidade.

A partir dos modelos selecionados, é possível identificar que as situações de alta e muito alta suscetibilidade variam entre 22% a 37% da área de estudo, detidamente às zonas potenciais de geração de deslizamentos.

A classificação relativa dos modelos gerados (muito alta, alta, média e baixa), aplicável somente dentro da área de estudo, indica os locais onde a propensão é maior ou menor para a geração de deslizamentos, não indicando a trajetória e o raio de alcance dos materiais mobilizáveis.

Aspectos positivos e negativos podem ser relacionados à aplicação da técnica pesos de evidência para a previsão de áreas suscetíveis a deslizamentos. Entre os aspectos positivos, convém destacar que: i) trata-se de um método que permite a determinação objetiva das relações espaciais entre os fatores condicionantes e os eventos conhecidos; ii) evita a subjetividade na escolha dos fatores condicionantes; iii) os pesos de múltiplos fatores podem ser combinados; iv) possibilita evitar a combinação de dados de fatores que apresentam alta correlação espacial; v) por se tratar de um método baseado nos dados, os resultados podem ser aprimorados a partir de novas observações e da aquisição de novos dados, desde que disponíveis e que apresentem significância na escala de referência. No tocante aos aspectos negativos da utilização da técnica pesos de evidência, destaca-se que: i) os pesos das classes dos fatores podem ser subestimados ou superestimados se a área de abrangência delas for muito pequena e se os deslizamentos não apresentarem uma distribuição uniforme na área de estudo; iii) exige a independência condicional entre os dados dos diferentes fatores utilizados na composição dos modelos, limitando o número possível de combinações; iv) os pesos obtidos para diferentes áreas não podem ser comparados entre si e; v) o método somente é aplicável em áreas onde os eventos são conhecidos.

A despeito das limitações inerentes à aplicação da técnica pesos de evidência, os resultados obtidos fornecem medidas adequadas e válidas (segundo o modelo de evento adotado e as condições modeladas) para a previsão de áreas

suscetíveis a deslizamentos no domínio da unidade geomorfológica do Baixo e Médio Vale do Itajaí-Açu no município de Blumenau/SC na escala de 1:25.000, uma vez que integram dados compatíveis com a escala de referência adotada e atestam os indicadores de validação. Conforme proposto em Macedo & Bressani (2013), considera-se ainda que o zoneamento apresentado atende os requisitos para enquadramento em nível básico e, em função da escala, é representativo de trabalhos efetuados em caráter semirregional ou de semidetalhe.

Assim, a identificação das áreas com maior potencial para a manifestação de deslizamentos, segundo as condições modeladas, representa um instrumento que pode ser útil como subsídio para a implantação de processos complementares através de detalhamento progressivo, sobretudo quanto à elaboração das cartas geotécnicas de aptidão à urbanização e às cartas de risco, orientando as medidas de planejamento e reordenamento territorial e a gestão de riscos na área de estudo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Prefeitura de Blumenau, Universidade Federal do Paraná (Programas de Pós Graduação em Engenharia Florestal e Geologia) e ao CNPq pelo suporte oferecido à realização das pesquisas. Manifestam ainda agradecimento especial aos senhores Dr. Alberto P. Fiori, Dr. Paulo C. Soares, Dr. Alexandre Uhlmann, Esp. Eduardo Zimmer, Esp. Henrique M. C. Carreirão, Dr.a Leila C. Perdoncini e Dr Manoel R. D. Correia pelo auxílio concedido, essencial à realização do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Agterberg F. P. & Cheng Q. 2002. Conditional independence test for Weights-of-Evidence modelling. *Natural Resources Research*, 11(4):249 - 255.
- Ahrendt A. 2005. Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão (SP). Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, 334 p.
- Araújo P. C. de 2004. Análise da suscetibilidade a escorregamentos: uma abordagem probabilística. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, 172pp.
- Augusto-Filho O. & Virgili, J. C. 1998. Estabilidade de taludes. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. (Eds.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE. p. 243-270.
- Aumond J. J. & Sevegnani L. 2009. Descrição do desastre: os escorregamentos de encostas. In: Frank, B.; Sevegnani, L. (Eds.). *Desastre de 2008: água, gente e política*. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí. p. 78-91.
- Basei M. A. S., Drukas C. O., Nutman A. P., Wemmer K., Dunyi L., Santos P. R., Passarelli C. R., Campos Neto M. C., Siga O. Jr., Osako L. 2011. The Itajaí foreland basin: a tectono-sedimentary record of the Ediacaran period, Southern Brazil. *International Journal of Earth Sciences*, 100(2-3): 543-569.
- Baum R. L. & Godt J. W. 2010. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in USA. *Landslides*, 7: 259-272.
- Perdoncini L. C., Lehnen R., BORGES A., Xavier F. F. Não publicado. Mapa geológico do município de Blumenau: versão preliminar - escala 1:25.000. Blumenau: Diretoria de Geologia, Análise e Riscos Naturais.
- Blumenau. Prefeitura Municipal de Blumenau - Diretoria Municipal de Geologia, Análise e Riscos Naturais. Não publicado. Banco de dados geoambientais: inventário de movimentos gravitacionais de massa.
- Bonham-Carter G.F. 1994. *Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS*. Ottawa: Pergamon. 398p.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil & IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2014. Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações

- Blumenau/Santa Catarina. Brasília: CPRM/IPT. Escala 1:25.000.
- Cruden D. M. & Varnes D. J. 1996. Landslides types and processes. In: Turner A. K. & Schuster R. L. (Eds.). *Landslides: investigation and mitigation*. Special Report 247/Transportation Research Board. Washington: National Academy Press.
- Dahal R. K., Hasegawa S., Nonomura A., Yamanaka M., Masuda T., Nishino K. 2008. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environ. Geol.*, 54:311-324.
- Dikau R. 2004. Mass Movement. In: Goudie, A. (Org.). *Encyclopedia of Geomorphology*. Londres: Routledge. p. 644-652.
- Fernandes N. F., Guimarães R. F., Gomes R. A. T., Vieira B. C., Montgomery D. R., Greenberg H. 2004. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modelling. *Catena*, 55: 163-181.
- Fiori A. P. & Carmignani L. 2009. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. Curitiba: UFPR. 602 p.
- Frank B. & Sevegnani L. 2009. *Desastre de 2008: água, gente e política*. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí.
- Frasca M. H. B. de O. & Sartori P. L. P. 1998. Minerais e rochas. In: OLIVEIRA, A. M. dos S. & BRITO, S. N. A. de. (Eds.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE. p.15-38.
- Geroy I. J., Gribb M. M., Marshall H. P., Chandler D. G., Benner S. G., Macnamara J. P. 2011. Aspect influences on soil water retention and storage. *Hydrol. Process.* 25: 3836-3842.
- Guidicini G. & Nieble C. M. 1984. *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher. 194p.
- Hawke R. & McConchie J. 2011. In situ measurement of soil moisture and pore water pressures in an "incipient" landslide: Lake Tutira, New Zeland. *Journal of Environmental Management*. 92: 266-274.
- Holtz R. D. & Kovacs W. D. 1981. *An introduction to geotechnical engineering*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 733p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2012. *Estimativas da população residente nos municípios brasileiros com data de referência em 1º de julho de 2012*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 28 de maio de 2013.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.- Divisão de Geociências do Sul 2002a. *Projeto Gerenciamento Costeiro. 3ª fase. Relatório Técnico Geologia*. Florianópolis. Disponível em: [www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Solos\\_final.pdf](http://www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Solos_final.pdf). Acessado em 24/10/2012.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.- Divisão de Geociências do Sul. 2002b. *Projeto Gerenciamento Costeiro. 3ª fase. Relatório Técnico Geomorfologia*. Florianópolis. Disponível em: [www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Geomorfologia.pdf](http://www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Geomorfologia.pdf). Acessado em 24/10/2012.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004a. *Mapa de Geomorfologia*. Rio de Janeiro, IBGE. Folha Joinville - SG.22-Z-B. Escala 1:250.000.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004b. *Mapa de Geomorfologia*. Rio de Janeiro, IBGE. Folha Florianópolis - SG.22-Z-D. Escala 1:250.000.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.- Unidade Estadual do IBGE em Santa Catarina. 2003. *Projeto Gerenciamento Costeiro. 3ª fase. Relatório Técnico Solos*. Florianópolis. Disponível em: <[www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Solos\\_final.pdf](http://www.morrodobau.ufsc.br/files/2011/03/Solos_final.pdf)>. Acessado em 24/10/2012.
- Iglesias C. M. da F., Zerfass H., da Silva M. A. S., Klein C. 2011. *Programa Geologia do Brasil: carta geológica - escala 1:250.000 (Folha SG-22-Z-B Joinville)*, Estado de Santa Catarina. Brasília,

- DNPM/CPRM. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>>. Acesso em: 17 de setembro de 2012.
- Köppen W. 1948. Climatologia: com um estudo de los climas de la tierra. México, Fondo de Cultura Económica, 466p.
- Macedo E. S. & Bressani L. A. (Org.). 2013. Diretrizes para o zoneamento da suscetibilidade, perigo e risco de deslizamentos para planejamento do uso do solo. São Paulo, ABGE & ABMS. 88 p.
- Magalhães F. S. & Cella, P. R. C. 1998. Estrutura dos maciços rochosos. In: OLIVEIRA, A. M. dos S. e BRITO, S. N. A. de. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo, ABGE. p.39-55. 1998.
- Matsushi Y., Hattanji T., Matsukura Y. 2006. Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrocks in the Boso Peninsula, Japan. *Geomorphology*, 76: 92-108.
- Montgomery D. R. & Dietrich W. E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resource Research*, 30(4):1153-1171.
- Neuhäuser B. & Terhorst B. 2007. Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to study area at the Jurassic escarpment (SW - Germany). *Geomorphology*, 86:12-24.
- Pereira S., Zêzere J. L., Bateira C. 2012. Technical note: assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. *Nat. Hazards Earth Sci.* 12: 979-988.
- Poli S. & Sterlacchini S. 2007. Landslide representation strategies in susceptibility studies using weights-of-evidence modeling technique. *Natural Resources Research*, 16(2): 121-134.
- Potter R. O., Carvalho A. P., Flores C. A., Bognola, I. 2004. Solos do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro, EMBRAPA Solos. CD ROM; mapa color. (Embrapa Solos, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 46).
- Sawatzky D. L., Raines G. L., Bonhanm-Carter G. F., Looney, C. G. 2007. Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.2 geoprocessing tools for spatial data modeling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks. Disponível em: <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=15341>. Acessado em 11/06/2009.
- Sevegnani L., Vibrans A. C., Gasper A. L. de. 2013. Considerações finais sobre a Floresta Ombrófila Densa e Restinga. In: Vibrans A. C., Sevegnani L., Gasper A. L. de, Lingner D. V. (Eds.). Inventário florístico florestal de Santa Catarina: Floresta Ombrófila Densa. Blumenau, Edifurb, v.4, p. 325-327.
- Severo D. A meteorologia do desastre. In: Frank, B.; Sevegnani, L. (Eds.). Desastre de 2008: água, gente e política. Blumenau, Agência de Água do Vale do Itajaí. p. 70-77.
- Silva Dias M. A. F. 2009. As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos. Nota técnica. São José dos Campos: INPE. 67p.
- Soares P. C. & Fiori A. P., 1975. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas. *Notícia Geomorfológica*. 16(32): 71-104.
- Soares P. C., Soares A. P., Fiori A. P. 2002. Raciocínio probabilístico aplicado à suscetibilidade de escorregamentos: um estudo de caso em Campo Largo, Paraná, Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências*. 51:59-76.
- Stabile R. A., Ferreira A. L., Carvalho A. M. de, Siqueira A. G., Bitar O. Y. 2013. Análise de fatores condicionantes de instabilizações em encostas como subsídio para a modelagem estatística da suscetibilidade a deslizamentos. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 14., 2013, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, ABGE, 2013. 1 CD ROM.
- Summerfield M. A. 1991. *Global Geomorphology: an introduction to the study of landforms*. Edinburgh: Pearson Prentice Hall. 537 p.



- Vedovello R. & Macedo E. S., 2007. Deslizamentos de encostas. In: Vulnerabilidade Ambiental (Santos, R. F. org.). Brasília, MMA, p. 75-93.
- Vibrans A. C., Sevegnani L., Gasper A. L. de, Lingner D. V. 2013. Inventário florístico florestal de Santa Catarina: Floresta Ombrófila Densa. Blumenau, Edifurb. v.4. 576p.
- Vieira B. C. & Fernandes N. F. 2004. Landslides in Rio de Janeiro: the role played by variations in soil hydraulic conductivity. *Hidrol. process.* 18:791-805.
- Wolle C.M. & Pedrosa J.A.B. 1981. Horizontes de transição condicionam mecanismos de estabilização de encostas na Serra do Mar. In: Anais... Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 3, 1981, Itapema. Itapema, 1981, v. 2, p. 121-135.

# ■ APLICAÇÃO DO TELEVISIONAMENTO ■ DE SONDAGENS EM FASE DE PROJETO ■ BÁSICO DO METRÔ DE SÃO PAULO

OPTICAL TELEVIEWER APPLICATION IN THE BOREHOLES IN BASIC  
DESIGN PHASE OF THE SÃO PAULO SUBWAY

*DANIELA GARROUX GONÇALVES DE OLIVEIRA*  
*PhD Student, Queen's University/EBEL, Kingston, ON, Canadá*  
*Email: d.oliveira@queensu.ca*

*MARCELO DENSER MONTEIRO*  
*Companhia do Metropolitano de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*  
*Email: mdmonteiro@metrosp.com.br*

*FABIO TAIOLI*  
*Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*  
*Email: ftaioli@usp.br*

*HUGO CÁSSIO ROCHA*  
*Companhia do Metropolitano de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*  
*Email: hcrocha@metrosp.com.br*

*GABRIEL GUIMARÃES FACURI*  
*CPRM – Serviço Geológico do Brasil, São Paulo, SP, Brasil*  
*Email: gfacuri@hotmail.com*

*ALESSANDRO LUGLI NASCIMENTO*  
*Telford Engenharia, Santo André, SP, Brasil*  
*Email: alessandro@telfordeng.com*

## RESUMO ABSTRACT

A caracterização de um maciço rochoso constitui um passo essencial na geologia de engenharia, proporcionando a possibilidade de previsão do comportamento deste maciço frente às solicitações de qualquer obra a ser realizada. No caso de obras subterrâneas urbanas, como linhas metroviárias, esta caracterização é fundamental para a identificação de condicionantes geológicos associados à sua estabilidade. Neste contexto, foram desenvolvidas novas tecnologias como, por exemplo, o televisionamento de sondagens (OPTV), que consiste na obtenção de imagens das paredes do furo, fornecendo o que pode ser chamado de testemunho virtual. Foi inicialmente proposta uma metodologia em Oliveira et al. (2013), e posteriormente desenvolvida em Oliveira (2015), tendo sido sistematicamente aplicada ao longo

The rock mass characterization is an essential step in engineering geology, providing the possibility of behaviour prediction of this rock mass towards requests for any work to be done, especially excavations. In the case of urban underground works, such as subway lines, this characterization is essential for identifying geological conditions linked to their stability. In this context, new technologies have been developed, for example, the optical televiewer (OPTV), which consists in imaging the borehole walls, providing what might be called a virtual core. It was first proposed a methodology in Oliveira et al. (2013), and later developed in Oliveira (2015), where this methodology has been systematically applied throughout the geological and geotechnical studies of the São Paulo Metro. This paper presents the

de campanhas de investigação geológico-geotécnica do Metrô de São Paulo. Este estudo aborda uma aplicação em um de seus projetos, por meio de dados obtidos de 17 sondagens, totalizando 503 metros de rocha filmados, que foram utilizados para a classificação geomecânica do maciço pelo sistema RMR e suas descontinuidades. Gráficos estatísticos foram criados com as características das descontinuidades, considerando parâmetros como fraturamento, frequência, abertura, rugosidade e o intemperismo das paredes. Além disso, os dados de orientação dos planos de fraturas foram processados usando o software DIPS e, em seguida, realizada análise cinemática de estabilidade do maciço, utilizando o software UNWEDGE, definindo os principais blocos formados ao longo do trecho de túnel, além de análises das paredes da vala de estações e poços. Este trabalho não só mostra esta metodologia sugerida para investigação com o televisionamento de sondagens, mas também como esta técnica poderá ser aplicada na elaboração de projetos de escavação subterrânea.

**Palavras-chave:** Televisionamento de sondagens, OPTV, túneis urbanos, análise e caracterização de estabilidade de maciço rochoso.

## 1 INTRODUÇÃO

O televisionamento de sondagens é uma tecnologia empregada no Brasil desde 2001. Em 2013, o Manual de Sondagens da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE 2013) inseriu tópicos sobre esta ferramenta de investigação, sem apresentar especificações mais detalhadas de uma interpretação sistemática dos dados. Por outro lado, há uma ausência de sugestões de como esses dados poderiam ser aplicados para projetos de infraestrutura, uma vez que não existem documentos normativos para este.

Levando em consideração o método sugerido por ISRM (1978), já utilizado como padrão para caracterização de maciços rochosos, foram propostas diretrizes para atingir a mesma padronização em dados obtidos no televisionamento de sondagens. Este estudo foi aplicado em uma campanha de investigação geológico-geotécnica do Projeto Básico de uma linha do Metrô de São Paulo; os dados de televisionamento foram amplamente utilizados para a caracterização do maciço geológico e suas descontinuidades ao longo do traçado do túnel, assim como efetuada

results of a project with the analysis of 17 boreholes data, totalizing 503 meters of filmed rock, was used for the rock mass geomechanical classification (RMR) and its discontinuities. Statistical graphics were created with the discontinuities characteristics, considering parameters such as fracturing, opening, roughness and weathering of the walls. Furthermore, the fracture planes orientation data were processed, using the Software DIPS and performed kinematic stability analysis, applying the Software UNWEDGE, defining the main blocks formed along the tunnel axis and along a Station trench walls, besides connection tunnels and shafts. This work not only presents this suggested methodology for investigation with the optical televiewer, but also how this technique can be applied in the tunnelling design.

**Keywords:** Borehole Imaging, Optical Televiewer, Urban Tunnelling, Rock Mass Characterization, Rock Mass Stability Analysis

a análise de estabilidade das paredes de estações, poços e túneis de ligação, resultando em uma contribuição essencial para as soluções de engenharia adotadas.

## 2 METODOLOGIA PROPOSTA PARA O TELEVISIONAMENTO DE SONDAJENS

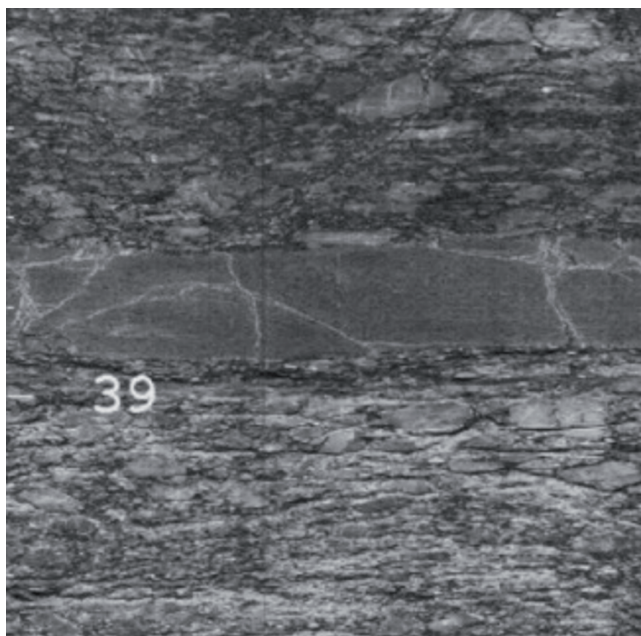
Os parâmetros sugeridos para a descrição do maciço rochoso que podem ser observados nas imagens do televisionamento de sondagens são litologia, estrutura, textura, composição mineralógica e grau de intemperismo. Sugere-se a utilização de uma planilha indicando as várias seções definidas para o maciço, como indicado na Tabela 1. Em sua caracterização é essencial descrever as estruturas penetrativas como foliação, xistosidade, bandamento, estratificação e venulação. A Tabela 2 apresenta a descrição dessas estruturas penetrativas. Sobre o grau de intemperismo da rocha, é possível apenas fazer uma caracterização limitada, onde podem ser notadas variações nas cores e no brilho dos minerais (Figura 1). Para descrever o grau de intemperismo é sugerida a Tabela 3.

**Tabela 1.** Caracterização do maciço rochoso.

| Prof. (m) | FURO SM-132   |                                   |           |   |  |  |                      |
|-----------|---------------|-----------------------------------|-----------|---|--|--|----------------------|
|           | Espessura (m) | Unidade                           | Litologia | Estrutura                                     | Textura  | Composição mineralógica  | Grau de intemperismo |
| 19,92     | 0,32          | Embasamento da Bacia de São Paulo | Gnaíse    | Gnáissica, com foliação evidente e bandamento | Inequigranular média a grossa, com megacristais de feldspato | Principalmente quartzo e feldspato, com minerais máficos subordinados como biotita | II                   |
| 20,24     | 5,46          |                                   |           |   |  |  | I                    |
| 25,7      | 2,8           |                                   |           |   |  |  | II                   |
| 28,5      | 0,95          |                                   |           |   |  |  | I                    |
| 29,45     | 0,19          |                                   |           |   |  |  | II                   |
| 29,64     | 11,19         |                                   |           |   |  |  | I                    |
| 40,83     | 0,95          |                                   |           |   |  |  | II                   |
| 41,78     | 8,4           |                                   |           |   |  |  | III                  |

**Tabela 2.** Estruturas penetrativas para o OPTV.

| Núm. | FURO SM-5902     |                |                     |          |           |                   |                      |
|------|------------------|----------------|---------------------|----------|-----------|-------------------|----------------------|
|      | Profundidade (m) | Espessura (cm) | Direção de mergulho | Mergulho | Litologia | Tipo de estrutura | Grau de intemperismo |
| 66   | 32,6             | 10             | 242                 | 28       | Quartzo   | Foliação          | I                    |
| 74   | 33,2             |                | 356                 | 30       |           | Veio              |                      |
| 75   | 33,4             |                | 244                 | 35       |           | Foliação          |                      |
| 90   | 33,5             | 20             | 250                 | 34       | Máfico    | Foliação          | II                   |
| 93   | 33,6             |                | 243                 | 42       |           | Bandamento        |                      |
| 97   | 34,4             | 8              | 312                 | 32       | Máfico    | Veio              | II                   |
| 99   | 34,6             |                | 236                 | 65       |           | Foliação          |                      |



**Figura 1.** Comparação entre trechos menos (superior) e mais (inferior) alterados (Fonte: Metrô-SP).

**Tabela 3.** Grau de intemperismo (adaptado de ISRM 1978).

| Grau         | Descrição                  | Descrição do maciço   |
|--------------|----------------------------|---|
| I            | Sã                         | Nenhum sinal visível de intemperismo da rocha ou ligeira descoloração.      |
| II           | Levemente intemperizado    | Todo o material rochoso pode estar descolorido pelo intemperismo.           |
| III          | Medianamente intemperizado | Menos da metade da rocha é decomposto e/ou desintegrou-se a solo.           |
| IV (IV a VI) | Altamente intemperizado    | Mais da metade do material rochoso é decomposto e ou desintegrou-se a solo. |

Nas imagens do televisionamento os parâmetros das discontinuidades que podem ser descritos são orientação (mergulho/direção de mergulho), tipo de estrutura, espaçamento, rugosidade, abertura, preenchimento, grau de

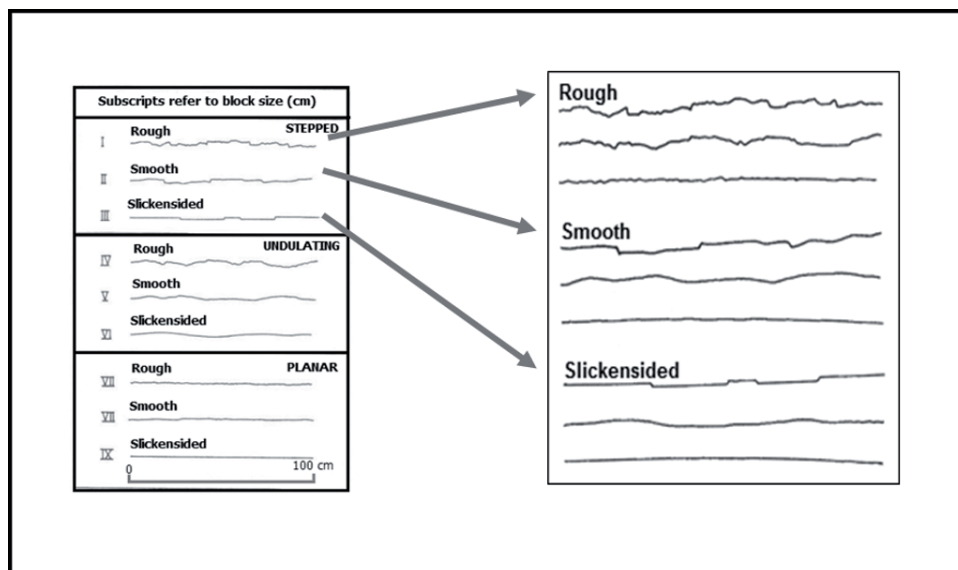


intemperismo e fluxo de água subterrânea. Todos os parâmetros podem ser descritos e apresentados em uma tabela, como sugerido na Tabela 4. Para o parâmetro de rugosidade das paredes só foi possível observar a rugosidade em escala de detalhe nos dados do televisionamento óptico. Os perfis de rugosidade sugeridos por Barton (1987), apresentados na Figura 2, foram modificados separando-os em perfis de menor detalhe, sendo possível

caracterizar as discontinuidades apenas em rugosas, lisas ou polidas (Figura 2). Pela condição de intemperismo da parede é possível deduzir o grau de intemperismo de uma discontinuidade, levando em conta o brilho do mineral ao longo das feições. As condições de intemperismo das paredes e a presença de preenchimento podem ser caracterizados usando a Tabela 5, modificada de IPT (1984).

**Tabela 4.** Exemplo de tabela de caracterização de discontinuidades em um log virtual.

| FURO SM-5902 |                  |                     |          |                   |                 |            |             |               |                |           |                   |                      |
|--------------|------------------|---------------------|----------|-------------------|-----------------|------------|-------------|---------------|----------------|-----------|-------------------|----------------------|
| Número       | Profundidade (m) | Direção de mergulho | Mergulho | Tipo de estrutura | Espaçamento (m) | Rugosidade | Abertura    | Preenchimento | Espessura (cm) | Alteração | Percolação D'Água | Grau de fraturamento |
| 1            | 52,86            | 290                 | 37       | Fratura           | 0               | Lisa       | Fecha-da    | Nenhum        | 0              | D1        | -                 |                      |
| 2            | 53,00            | 310                 | 39       | Fratura           | 0,14            | Lisa       | Fecha-da    | Máficas       | 1              | D2        | -                 | F2                   |
| 3            | 53,18            | 338                 | 25       | Fratura           | 0,18            | Rugosa     | Semi-aberta | Argila        | 0,5            | D3        | -                 |                      |
| 4            | 53,20            | 335                 | 27       | Falha             | 0,02            | Polida     | Semi-aberta | Argila        | 0,8            | D4        | -                 | F1                   |
| 5            | 53,25            | 20W                 | 35       | Fratura           | 0,05            | Rugosa     | Aberta      | Nenhum        | 2              | D4        | Oxidada           |                      |
| 6            | 53,41            | 116                 | 74       | Fratura           | 0,16            | Rugosa     | Fecha-da    | Quartzo       | 1              | D2        | -                 | F3                   |
| 7            | 53,49            | 111                 | 69       | Fratura           | 0,08            | Lisa       | Semi-aberta | Nenhum        | 0              | D4        | -                 |                      |



**Figura 2.** Perfis de rugosidade, à esquerda, segundo Barton (1987) e os perfis de rugosidade adaptados para perfis virtuais em escala de perfuração, à direita.

**Tabela 5.** Preenchimento e a caracterização do intemperismo das paredes, modificado de IPT (1984).

| Grau | Condições de alteração e preenchimento das paredes de descontinuidades   |
|------|--|
| D1   | Contato rocha-rocha, paredes sãs, sem preenchimento, brilho intenso.   |
| D2   | Contato rocha-rocha, preenchimento de material pétreo rijo (Qtzo, calcita).                                    |
| D3   | Paredes com alteração incipiente, brilho mais fraco, sinais de percolação d'água, oxidadas, sem preenchimento. |
| D4   | Paredes alteradas, brilho fraco, preenchimento ausente, fratura aberta.  |
| D5   | Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento de fragmentos de rocha.                                       |
| D6   | Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento de argila e/ou areia.   |
| D7   | Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento distinto ou não identificado.                                 |

Para o grau de fraturamento, aqui exposto como planos de descontinuidade descritos por metro, definido em isofraturamento (trechos de similar grau de fraturamento), utiliza-se a Tabela 6. O grau de fraturamento das descontinuidades deve ser indicado como mostrado na Tabela 4, usando os parâmetros da Tabela 6. Somente descontinuidades relevantes devem levadas em consideração, que muito provavelmente envolveria

quebras no testemunho ao longo deste plano. E por isso o espaçamento pode ser diretamente calculado em função da distância entre cada fratura. Propõem-se também usar a frequência das descontinuidades para calcular o RQD teórico, como proposto por Priest & Hudson (1976), considerando aqui que um testemunho virtual pode ser diretamente análogo a uma scanline, linha de medida, conforme detalhado em Oliveira (2015).

**Tabela 6.** Grau de frequência de descontinuidades, modificado de IPT (1984).

| Grau | Descontinuidades/m | Frequência de descontinuidades |
|------|--------------------|--------------------------------|
| F1   | < 1                | Ocasionalmente fraturada       |
| F2   | 1 a 5              | Ligeiramente fraturada         |
| F3   | 6 a 10             | Medianamente fraturada         |
| F4   | 11 a 20            | Muito fraturada                |
| F5   | > 20               | Extremamente fraturada         |

### 3 APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

O trecho em estudo está localizado ao longo da borda sudoeste da Bacia Sedimentar de São Paulo, atravessando quase exclusivamente rochas do embasamento pertencentes ao Complexo Embu, localmente coberto por seu manto de intemperismo e por sedimentos do Paleógeno e Quaternário, além de uma fina camada de aterro. O maciço inteiro é caracterizado por rochas gnáissicas e migmatíticas, foliadas e fortemente condicionadas por um componente estrutural influenciado por grandes zonas de cisalhamento. Além da estrutura bandada, este maciço é caracterizado por topo rochoso bastante irregular, ocorrendo heterogeneidade tanto vertical como horizontal,

sendo certamente um desafio para a previsão do comportamento do maciço frente às escavações.

Levando em consideração os dados do televisionamento das paredes de 17 furos, após a aplicação da metodologia proposta no item 2, o grau de intemperismo, abertura e rugosidade das descontinuidades, bem como dados sobre o grau de fraturamento, foram descritos e considerados para a elaboração de gráficos tipo pizza, indicando a porcentagem de cada parâmetro ao longo do trecho filmado. Cada gráfico para cada furo foi considerado e plotado em um mapa do trecho da linha, usando o software ArcGIS e imagens do Google Earth, sendo possível, dessa forma, compreender como cada parâmetro variava ao longo da linha.

A Figura 3 mostra estes gráficos, considerando a variação do grau de intemperismo das descontinuidades como parâmetro principal, tendo a

Tabela 5 como base de classificação. No geral, as piores condições de intemperismo para descontinuidades concentram-se na região das sondagens 4536, 4539, 4540, 4545 e 4603 e na sondagem 4559, que também apresenta uma quantidade significativa de rocha fragmentada, juntamente com sedimentos argilo-arenosos. É importante mencionar que essas fraturas classificadas como D5 e/ou D6 são juntas abertas, onde este fator, juntamente com o tipo de preenchimento, implica em uma redução significativa da força de cisalhamento.

Para o parâmetro de abertura das descontinuidades considerou-se os métodos de ISRM (1978), classificando-as como abertas, semiabertas ou fechadas. Os resultados são apresentados na Figura 4 e apoiam os dados da Figura 3, onde as piores fraturas, neste caso as abertas, estão também na região supracitada. Os furos 4505, 4580 e 4596 também apresentaram uma quantidade significativa de fraturas semiabertas e abertas.

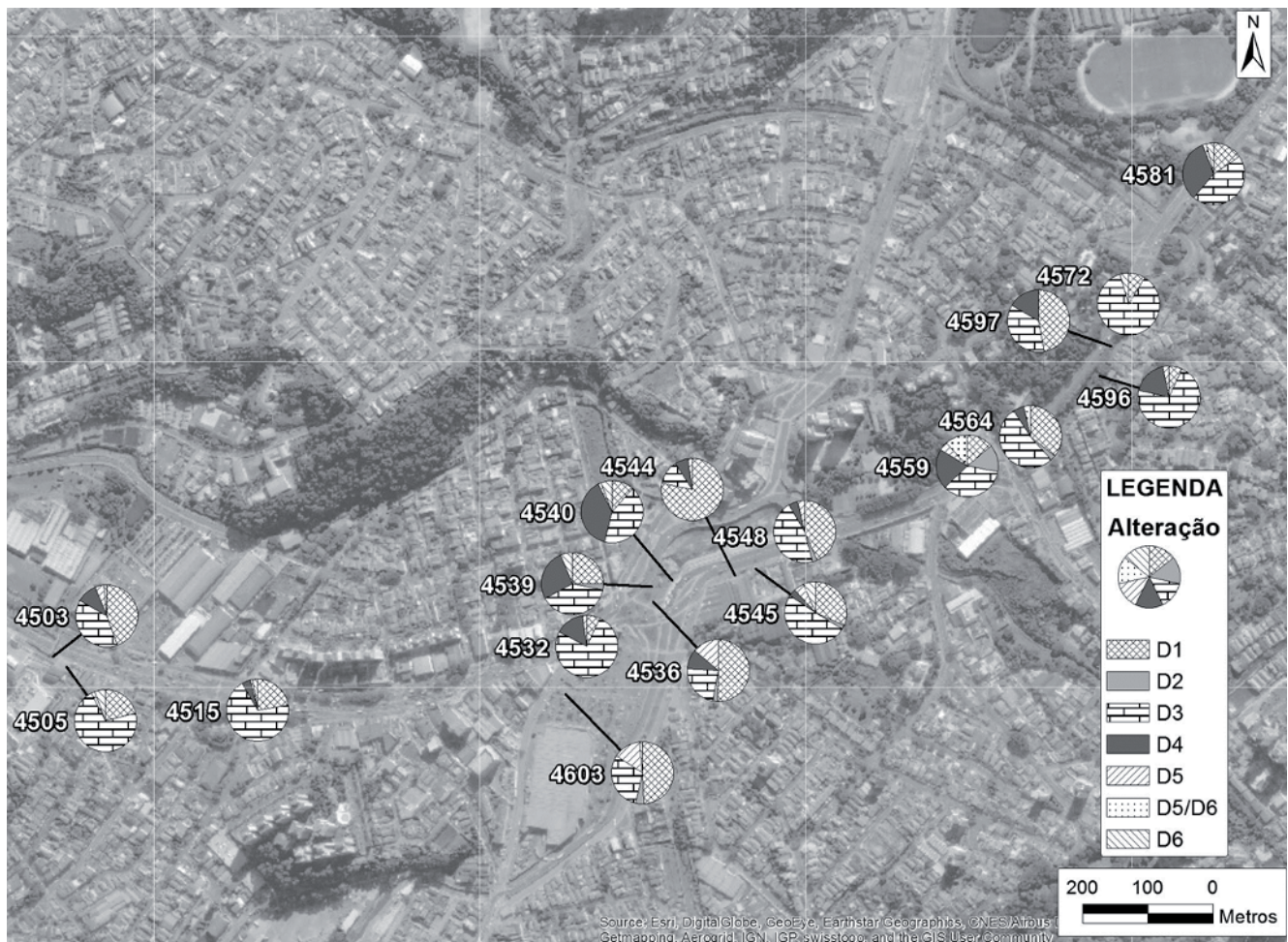


Figura 3. Variação do parâmetro alteração das paredes das descontinuidades ao longo do trecho.



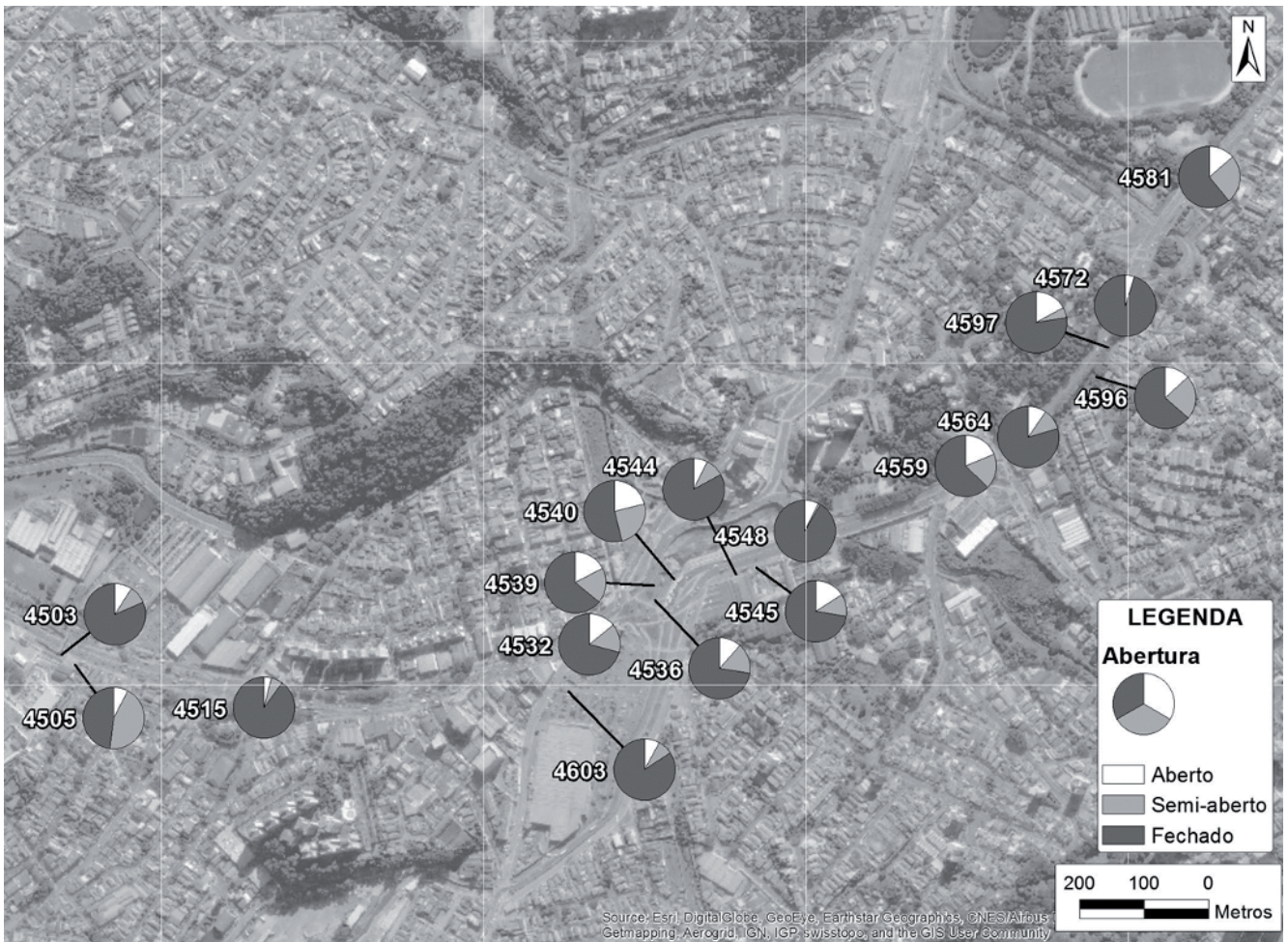


Figura 4. Variação do parâmetro abertura das descontinuidades ao longo do trecho.

A Figura 5 ilustra a variação do parâmetro rugosidade. As fraturas foram descritas como rugosas, lisas ou polidas, esta última quando verificada a influência de zona de falha. Nos furos 4503, 4505, 4539, 4545 e 4559, há um aumento da frequência de fraturas lisas, condição geomecânica inferior a de um plano rugoso. Também é possível observar a ocorrência de uma fratura com superfície polida no furo 4580, relacionada a um plano de falha observada na imagem de televisionamento, informação essencial ao projeto.

Finalmente, na Figura 6, considerou-se a variação do grau de fraturamento. Como observado

nesta figura, os furos mais fraturados são classificados, em sua maioria como F4, ao longo dos furos 4503, 4515, 4544, 4545, 4548, 4564 e 4597. A região das sondagens 4536, 4539, 4540, 4545 e 4603, apesar de apresentar descontinuidades mais intemperizadas e piores condições de abertura, não apresenta tantas fraturas como nas demais regiões. Ilustra-se, portanto, como o maciço rochoso pode ser caracterizado com as imagens de televisionamento óptico ao longo do trecho, complementando as informações dos testemunhos de sondagem.



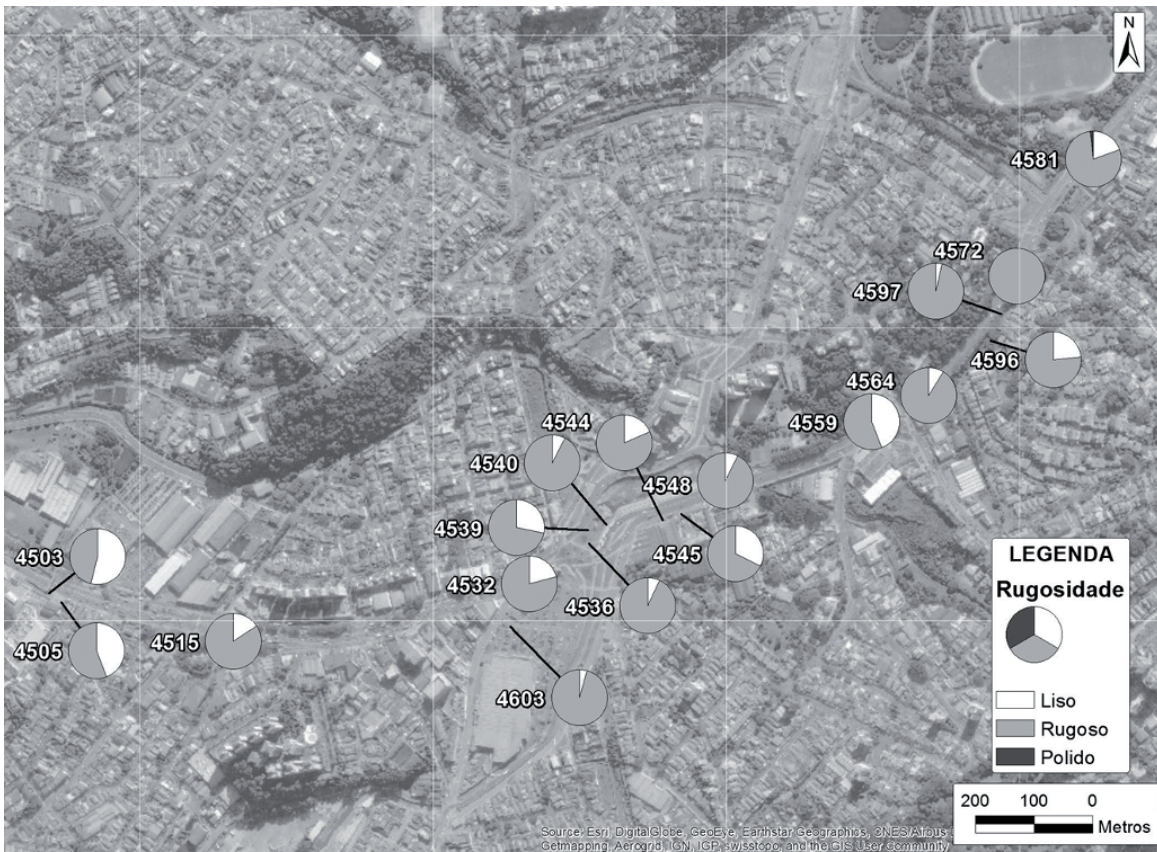


Figura 5. Variação do grau de rugosidade das descontinuidades ao longo do trecho.

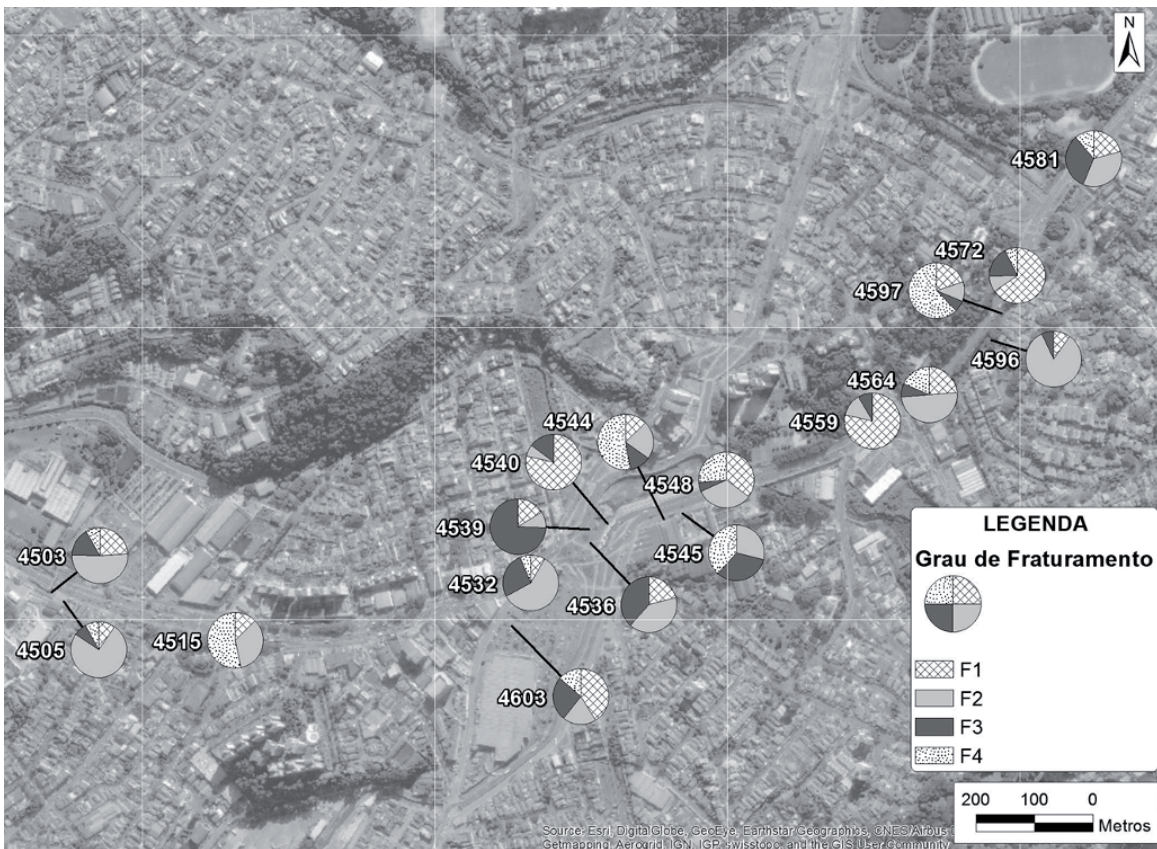


Figura 6. Variação do grau de fraturamento ao longo do trecho.



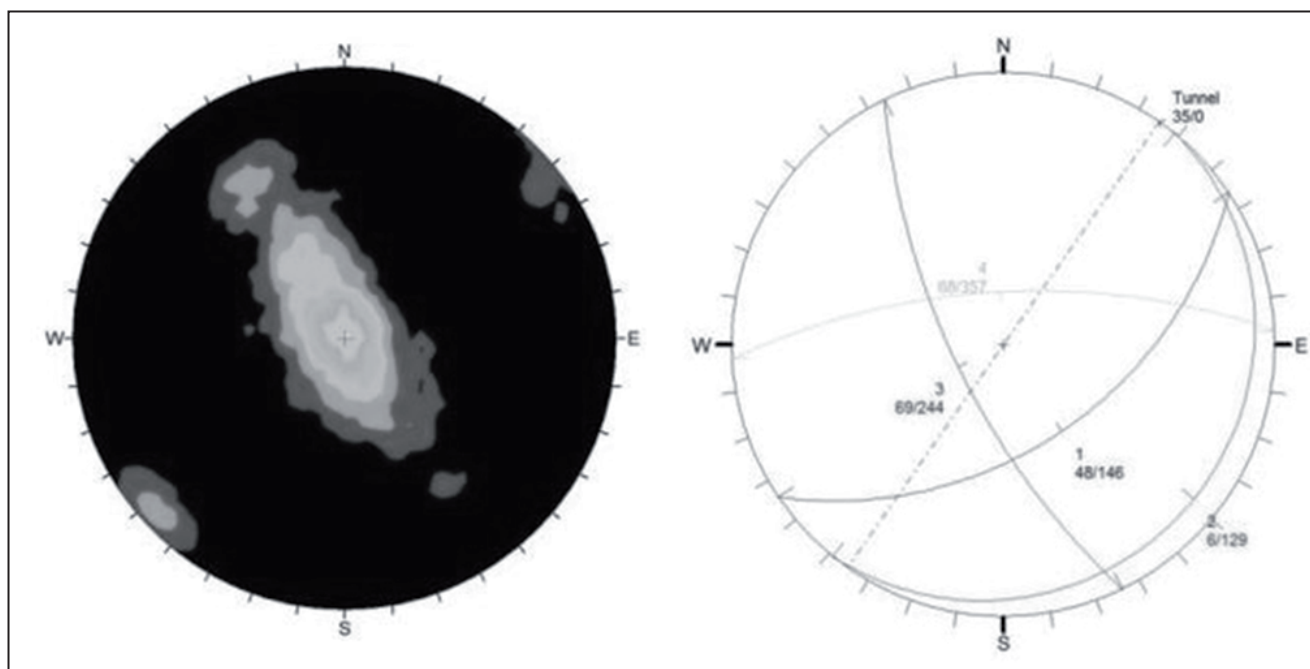
### 3.1 Análise da estabilidade do túnel e poços

Para a análise estrutural utilizaram-se os dados de orientação dos planos de descontinuidades obtidos no televisionamento óptico, considerando apenas as fraturas mais evidentes. O software Dips (Rocscience, 1999) foi empregado para a elaboração do diagrama Schmidt-Lambert, com a concentração dos polos dos planos. As principais famílias foram definidas e utilizadas para a análise cinemática bidimensional, de acordo com parâmetros definidos por Hoek & Bray (1981), bem como a análise tridimensional, definindo os principais blocos formados a partir da combinação de todos os conjuntos principais de descontinuidades, de acordo com a proposta de Goodman & Shi (1985), usando para isso o software Unwedge (Rocscience 2004). Inicialmente cada furo foi separadamente analisado, a fim de compreender o modelo estrutural da rocha e sua variação ao longo do trecho estudado. Depois, todos os furos foram analisados conjuntamente (Figura 7). O processo de análise estrutural é apresentado em detalhe em Oliveira (2015).

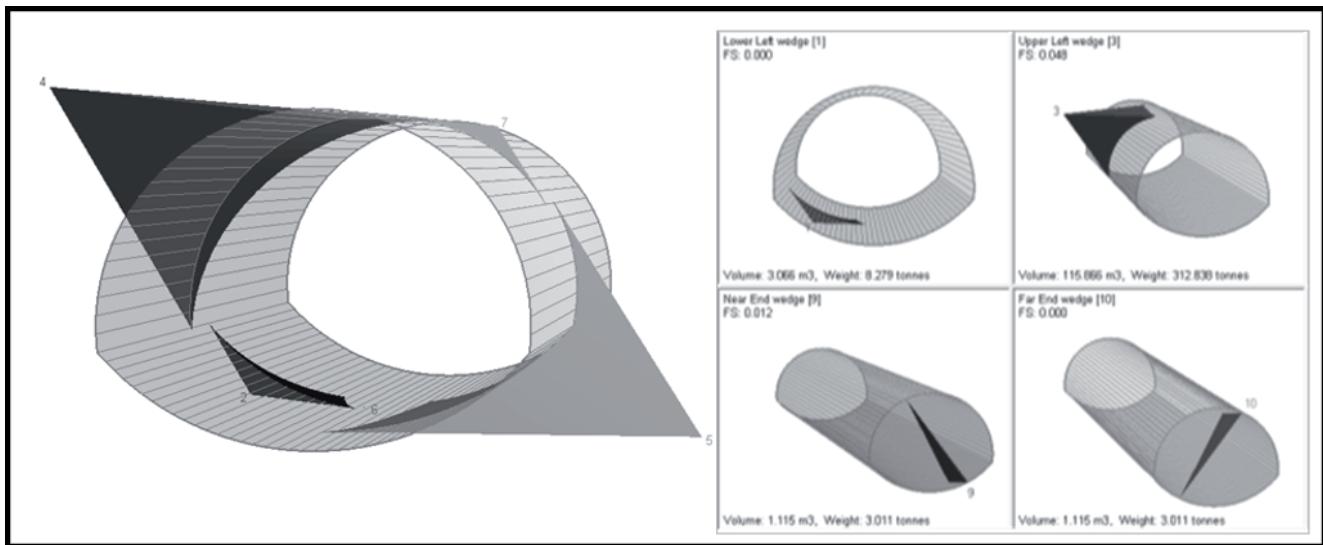
Para continuar com a análise estrutural e de estabilidade para o eixo do túnel, decidiu-se dividir

o trecho estudado em cinco setores, sendo que a principal mudança foi a direção do eixo em si. Depois de definir cada família estrutural principal por setor ao longo do trecho, o Software Unwedge foi então empregado para analisar a estabilidade do túnel, fornecendo informações valiosas e detalhadas sobre os blocos-chave que poderiam se formar. Foi desenvolvida tanto uma análise bidimensional (Figura 7) como uma análise tridimensional (Figura 8). No estudo, foi considerado para cada conjunto de fraturas apenas três famílias, devido às limitações do software. Na análise tridimensional foi apresentada a combinação dos blocos-chave com a direção do túnel para cada setor (Figura 8), bem como cada bloco apresentado isoladamente, indicando o seu fator de segurança, volume ( $m^3$ ) e o peso do bloco (toneladas), conforme o exemplo da Figura 8.

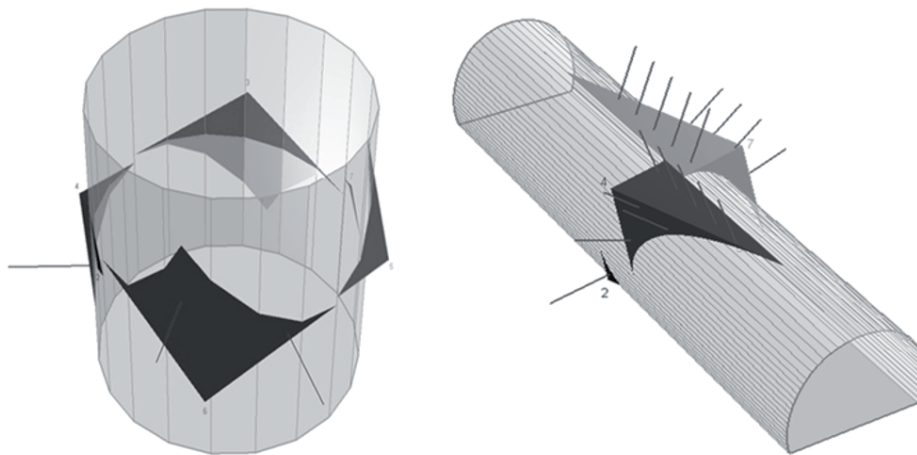
A mesma análise foi feita para todos poços previstos ao longo do trecho e túneis de ligação. Foram considerados apenas os furos televisionados próximos de cada poço. Na Figura 9, observam-se os exemplos de análise tridimensional para um poço e um túnel de ligação, respectivamente, tendo os dados do televisionamento óptico como principal entrada de dados.



**Figura 7.** Diagrama de concentração de polos com os dados de OPTV (à esquerda) e análise bidimensional para um setor do trecho.



**Figura 8.** Análises tridimensionais com identificação de blocos formados e combinação de blocos-chave, com saída de informação de fator de segurança, volume e peso dos blocos.



**Figura 9.** Análise tridimensional para avaliação de estabilidade de poço (à esquerda) e de túnel de ligação (à direita).

### 3.2 Análise de estabilidade das paredes de uma vala de Estação.

No projeto desenvolvido há o estudo de uma vala de Estação, que será escavada principalmente em rocha gnáissica. Estão previstas quatro paredes em sua vala principal (formato retangular), com aproximadamente 40 metros de altura, que serão escavadas em duas etapas. Todas as quatro paredes da vala foram analisadas considerando os dados do televisionamento das sondagens nesta área, tratando os dados estruturais em diagrama Schmidt-Lambert, conforme visto anteriormente para o túnel. Consideraram-se as possibilidades de ruptura plana e em cunha, além de tombamento,

para cada uma das paredes, como pode ser visto na Figura 10 para uma das paredes, por exemplo, considerando a análise de estabilidade de taludes de Hoek & Bray (1981). Para isso foram encontrados sete conjuntos de discontinuidades, que também foram confrontados com conhecimentos prévios sobre os dados estruturais da área.

Em seguida foi aplicada a Teoria dos Blocos-Chave (Goodman & Shi 1985), como ilustrada na Figura 11, para a mesma parede como exemplo. Então, conforme a teoria estabelece, dadas todas as possíveis combinações entre as discontinuidades principais, existem blocos críticos, chamados blocos-chave, que devem ser contidos, sendo que podem deslizar em espaço livre por conta da

gravidade, sem qualquer força externa, a menos que um sistema adequado de suporte seja fornecido. De acordo com o teorema dos blocos-chave, se este bloco crítico é contido, em seguida os outros blocos do maciço rochoso também estarão estáveis. Um bloco será considerado crítico se toda sua "pirâmide de juntas" (PJ - pirâmide de juntas da combinação de planos de juntas) cai inteiramente dentro da pirâmide de espaço (PS - pirâmide de espaço, espaço aberto após a escavação, oposta a PE - pirâmide de escavação, que seria a própria parede rochosa). Observam-se vários blocos-chave na parede da vala da Estação, considerando todos os sete conjuntos de descontinuidades. É importante mencionar que nem sempre todos esses conjuntos estarão presentes e a ausência de um ou mais moldariam blocos diferentes, o que também pode ser visto nesta figura, como a área sombreada.

As soluções de engenharia para a contenção desta vala levou em consideração a presença desses blocos, principalmente sugerindo que durante a implantação da estação esses blocos devem ser reconhecidos e estabilizados, conforme as instruções do A.T.O. (acompanhamento técnico de obra).

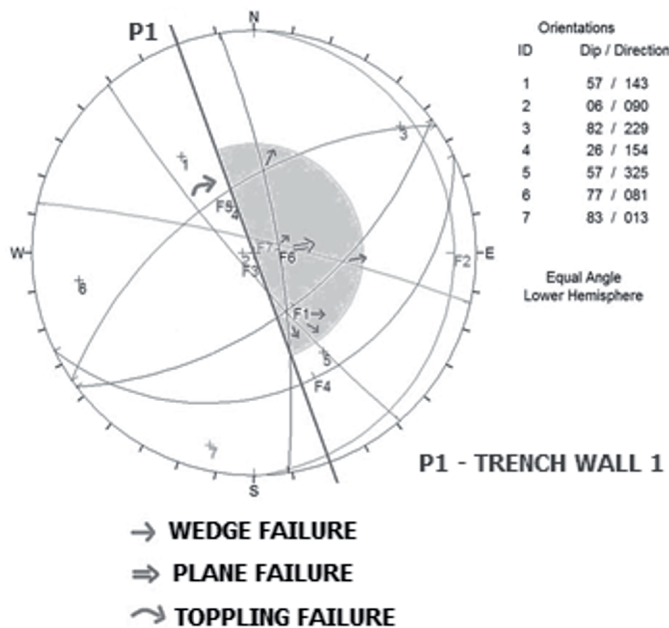


Figura 10. Análise de estabilidade usando o diagrama Schimidt-Lambert e considerando o modo de deslizamento para uma parede da vala.

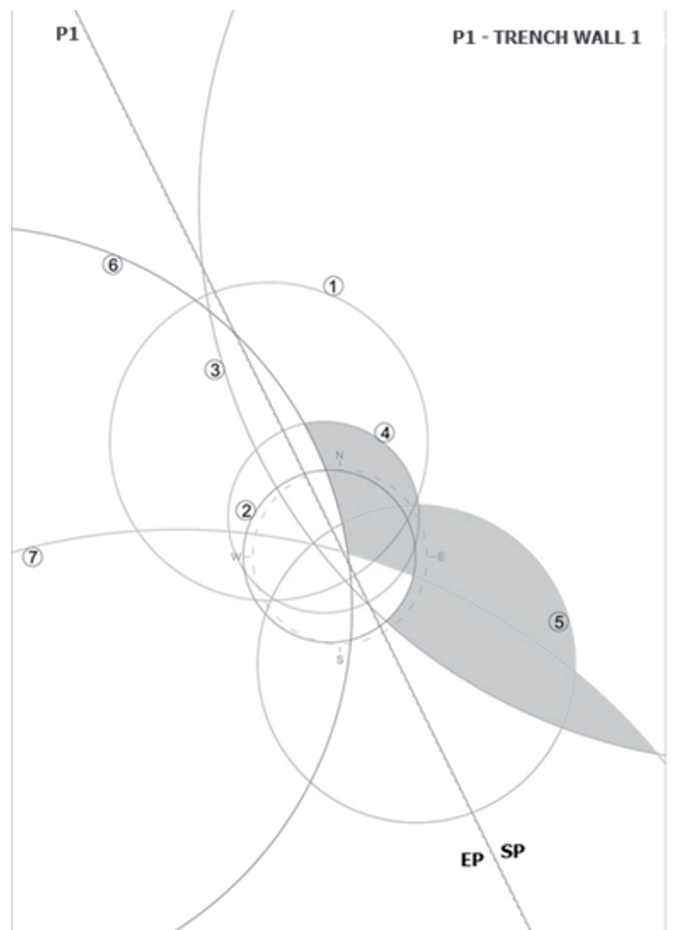


Figura 11. Análise de estabilidade usando a teoria dos blocos-chave e o diagrama tridimensional para o exemplo da mesma parede.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em obras subterrâneas urbanas o conhecimento do subsolo é essencial, uma vez que sua construção é uma atividade desenvolvida dentro de um contexto urbano, o que poderia causar interferência significativa no seu entorno. Somado a isso, há o fato de que um maciço pouco conhecido pode resultar em uma contenção superestimada, aumentando os custos da obra ou se subdimensionado, aumentando o seu risco.

Neste cenário, os dados do televisionamento óptico aumentam as possibilidades para a caracterização do subsolo, como mostrado neste trabalho. As aplicações aqui apresentadas poderão vir a ser utilizadas como possíveis alternativas para projetistas em análise estrutural, de estabilidade do túnel, poços e estações, assim como caracterização geológico-geotécnica dos maciços rochosos em obras de infraestrutura, servindo



como complemento das informações obtidas em testemunhos de sondagens, levantamentos em afloramentos rochosos e demais investigações geológico-geotécnicas. Novamente, cita-se que um subsolo mais bem conhecido e compreendido implicará em uma diminuição das incertezas do comportamento do meio físico frente às obras a serem realizadas, diminuindo riscos e otimizando as soluções de engenharia.

## AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRÔ) por apoiar e autorizar a publicação deste estudo. Agradecimentos também à equipe técnica da EBEI-Empresa Brasileira de Engenharia de Infraestrutura, pelo apoio neste trabalho e ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pelo apoio a esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE. 2013. Manual de sondagens. Boletim nº3, 5ª edição, São Paulo, 75p.
- Barton N. 1988. Predicting the behaviour of underground openings in rock. Manuel Rocha Memorial Lecture, Lisbon. NGI Publication 172, 1988. Also Geotecnia 53, July.
- Goodman R.E. & Shi G.H. 1985. Block theory and its application to rock engineering. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 338p.
- Hoek E. & Bray J.W. 1981. Rock slope engineering. 3. Ed. Rev. London: Institute of Mining and Metallurgy. 358 p.
- International Society for Rock Mechanics – ISRM. 1978. Suggested methods for the quantitative description of rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, vol. 15, n. 6, p. 319-368.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. 1984. Estudos geológico-geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens). São Paulo. (IPT - Relatório, 10342).
- Oliveira D.G.G. 2015. Televisionamento óptico de sondagens - proposta metodológica para execução e suas aplicações em obras subterrâneas. Dissertação de mestrado, IGC-USP, São Paulo, 187p.
- Oliveira D.G.G., França D.D., Monteiro M.D., Massoni F., Taioli F., Lemos Filho M.X., Rocha H.C. 2013. Evolução da proposta metodológica para execução e análise de televisionamento de sondagens: A especificação técnica do Metrô de São Paulo. Anais do 14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Rio de Janeiro.
- Priest S.D. & Hudson J.A. 1976. Discontinuity spacings in rock. International Journal Of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 13, p. 135-148.
- Rocscience Inc. 1999. DIPS Software. RocScience Inc. Toronto, Canada.
- Rocscience Inc. 2004. Unwedge© Software. RocScience Inc. Toronto, Canada.

# ESTIMATIVA DA MASSA DE CONTAMINANTES COMPARANDO TÉCNICAS TRADICIONAIS COM FERRAMENTAS DE INVESTIGAÇÃO DE ALTA RESOLUÇÃO (HRSC)

*HYDROCARBONS MASS ESTIMATION COMPARING CONVENTIONAL TOOLS WITH  
HIGH-RESOLUTION SITE CHARACTERIZATION TOOLS*

MARCOS TANAKA RIYIS

*ECD Sondagens Ambientais Ltda.; Centro Universitário SENAC. Faculdade de  
Engenharia de Bauru (FEB)/UNESP. Sorocaba-SP. E-mail: marcos@ecdambiental.com.br*

HERALDO LUIZ GIACHETI

*Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB)/UNESP – Departamento de  
Engenharia Civil. Bauru-SP. E-mail: giacheti@feb.unesp.br*

MAURO TANAKA RIYIS

*ECD Sondagens Ambientais Ltda. Sorocaba-SP. E-mail: mauro@ecdambiental.com.br*

RAFAEL MURARO DERRITE

*Stricto Soluções Ambientais Ltda e Faculdade de Engenharia de  
Bauru (FEB)/UNESP. Sorocaba-SP. E-mail: rafael@strictoambiental.com.br*

## RESUMO ABSTRACT

Uma das principais perguntas a serem respondidas pela investigação detalhada e pela investigação para remediação no Gerenciamento de Áreas Contaminadas é qual a massa de contaminante que precisa ser remediada, seja por remoção de massa, seja por transferência ou mudança de estado desse contaminante. Quando a maior parte da massa se encontra em fase retida, adsorvida ou residual, a abordagem tradicional de amostragem de solo apresenta muitas incertezas, que não permitem uma boa estimativa dessa massa. O presente trabalho mostra um estudo de caso em que diversas ferramentas de investigação de alta resolução foram utilizadas em conjunto para determinar, delimitar e caracterizar as diversas camadas estratigráficas de um solo residual contaminado por óleo lubrificante de cadeia longa. Além dessa avaliação em detalhe do meio físico, foram coletadas e encaminhadas ao laboratório de análises químicas várias amostras (variando entre 4 e 10) de cada ponto de amostragem. O cruzamento das informações em detalhe do meio físico com

One of the main questions to be answered by site assessment and remedial site investigation in Contaminated Sites is the contaminant mass to be removed, either by mass removal remediation technics, or by mass transfer process. When most of the mass is in adsorbed phase, the traditional soil sampling approach has many uncertainties that do not allow a reliable mass estimative. This paper shows a case study in which several high-resolution site characterization (HRSC) tools and interpretation approach were used together to determine, define and characterize the different stratigraphic layers of a lubricating oil contaminated soil. Besides this detailed geological evaluation, many soil samples (4 to 10) were selected and sent to chemical analysis laboratory in each soil sampling point. The crossing of the detailed hydrostratigraphic information with specific punctual concentrations allowed a very accurate estimate of the adsorbed lubricating oil total mass to be removed. The estimated mass by high resolution investigation is 30591 kg, while the mass

as concentrações pontuais permitiram uma estimativa muito precisa da massa total de óleo lubrificante a ser remediado. A massa estimada pela investigação de alta resolução é de 30.591 Kg, enquanto a massa estimada por abordagem tradicional era de 73.800 Kg, mostrando que uma investigação adequada reduz os custos na remediação.

**Palavras-chave:** Investigação geoambiental, investigação de alta resolução, amostragem de solo, remediação, áreas contaminadas

## 1 INTRODUÇÃO

O Decreto 59.263, que regulamenta a Lei Estadual 13.577, estabelece que, nos projetos de intervenção em áreas contaminadas, sejam priorizadas medidas de remoção de massa (São Paulo, 2013). Para que essa massa seja removida, é preciso que o Modelo Conceitual da área tenha definido, de forma clara, a quantificação dessa massa, onde ela está e qual a sua interação com o meio físico. Esse Modelo Conceitual é definido e refinado durante as etapas de diagnóstico. O Manual do Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB (1999) preconiza que, ao final do diagnóstico (no referido documento, ao final da Investigação para Remediação), é fundamental que esse Modelo Conceitual tenha poucas e gerenciáveis incertezas.

Quando o contaminante é um composto orgânico volátil (VOC) ou semivolátil (SVOC), a massa de contaminantes pode estar em fase livre, retida, dissolvida ou vapor, e a quantificação da massa deve ocorrer em todas as mídias de interesse.

Diversas referências, como Elis (2014), Pitkin (2008), Pitkin et. al. (1999), apontam que a maior parte da massa de contaminante está em fase retida, adsorvida ou residual no solo, normalmente na zona saturada (com exceção da área fonte, onde há boa parte da massa retida na zona não saturada), portanto, a quantificação dessa massa que está de alguma forma ligada ao solo é fundamental para qualquer plano de intervenção que envolva remediação. Mesmo para os que não envolvem a remoção de massa, essa quantificação é essencial para justificar a escolha por outro método alternativo de intervenção, como: contenção, medidas de engenharia ou de controle institucional.

was estimated by traditional approach of 73800 kg showing that a proper investigation reduces costs in remediation.

**Keywords:** Geo-environmental site characterization, high-resolution site characterization, soil sampling, contaminated sites

Os procedimentos da CETESB (2007) específicos para investigação de hidrocarbonetos de petróleo obrigam uma avaliação, em campo, da presença de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) no solo, medidos através de um equipamento apropriado de detecção desses VOCs, como um detector por oxidação catalítica ou um detector por fotoionização (PID). Essa medição de VOCs no solo é exigida somente até a franja capilar, portanto, não existe a obrigatoriedade (ou seja, se não é obrigado, dificilmente é feito) de amostrar o solo na zona saturada. Da mesma forma, o senso comum no Brasil entende que seguir o Manual do Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB (1999), mesmo para investigação de VOC clorados, significa amostrar o solo até a franja capilar, e a água subterrânea na zona saturada, ou seja, são raras as vezes em que ocorre amostragem de solo na zona saturada para determinação da massa retida, ou mesmo da massa total, mesmo sendo essa uma atividade essencial para a elaboração de um plano de intervenção adequado (Riyis, 2014).

O presente trabalho mostra a diferença entre a massa total de hidrocarbonetos de petróleo estimada através do método tradicional, com amostragem de solo somente até a franja capilar e encaminhamento de uma única amostra daquele ponto para análise química em laboratório e a massa calculada através da abordagem proposta, que prevê coleta de amostras de solo na zona saturada e não saturada, realização de *screening* de campo e seleção de múltiplas amostras por ponto para encaminhamento ao laboratório de análises químicas. Essa abordagem permite um entendimento muito mais completo da distribuição dos contaminantes e de sua interação com o meio físico.



## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

- Sonda Mecanizada marca AMS, modelo Power Probe 9100-ATV (Power Probe) – Figura 1;



**Figura 1.** Sonda AMS Power Probe 9100 ATV efetuando operação *Dual Tube Sampling*.

- Ferramental para Cravação Contínua (*Direct Push*) com amostrador tubular *liner* modelo *Dual Tube*, onde o amostrador é revestido pelo tubo externo, e ambos são cravados simultaneamente. Além do amostrador tubular, o ferramental é composto de hastes prolongadoras, revestimentos prolongadores, acoplamentos e um retentor de amostras para auxiliar na recuperação do solo dentro do amostrador (Figuras 2 e 3). O amostrador tem 1,20 m de comprimento e 37 mm de diâmetro. O revestimento tem 1,20 m de comprimento e 70 mm de diâmetro;



**Figura 2.** Parte superior do Amostrador Tubular *Liner* revestido pelo tubo externo do *Dual Tube*.



**Figura 3.** Parte inferior do Amostrador Tubular *Liner* revestido pelo tubo externo do *Dual Tube*.

- Lâmpada de luz ultravioleta UV-A com comprimento de onda 330-360 nm;
- Espátulas de inox;
- Frascos sem preservantes, fornecidos pelo laboratório Analytical Technologies (Anatech).

### 2.2 Métodos

Em cada ponto de amostragem de solo, foi realizado o seguinte procedimento:

1. Cravação do ferramental de amostragem de solo *Dual Tube* (Figura 5);



**Figura 5.** Cravação do equipamento *Dual Tube* para coletar amostras de solo.

2. Retirada do amostrador *liner* de dentro do revestimento;
3. Identificação do ponto e profundidade da amostra no próprio *liner* (Figura 6);
4. Colocação de um novo amostrador dentro do revestimento;

5. Acoplamento das hastes prolongadoras e revestimentos prolongadores para a coleta de nova amostra;
6. No final da amostragem, retirada dos revestimentos ao mesmo tempo em que ocorria a adição, por gravidade, de calda de bentonita, para evitar contaminação cruzada pelo furo de sondagem.



Figura 6. Amostras de solo nos *liners*, identificadas com suas respectivas profundidades.

Após a retirada da amostra, era realizado, com cada *liner*, o seguinte procedimento:

1. Abertura do liner através de dois cortes longitudinais, gerando uma abertura de, aproximadamente, 1/3 do diâmetro total do amostrador;
2. Registro fotográfico com uma trena;
3. Análise da amostra com a lâmpada UV-A para identificação dos *hot spots* de óleo lubrificante retido/adsorvido no solo (Figura 8);



Figura 8. Detecção visual de produto no solo através de UV-A.

4. Registro fotográfico com a lâmpada UV-A ligada para evidenciar os *hot spots* (Figura 9);

5. Descrição do solo amostrado, para posterior elaboração do perfil estratigráfico;

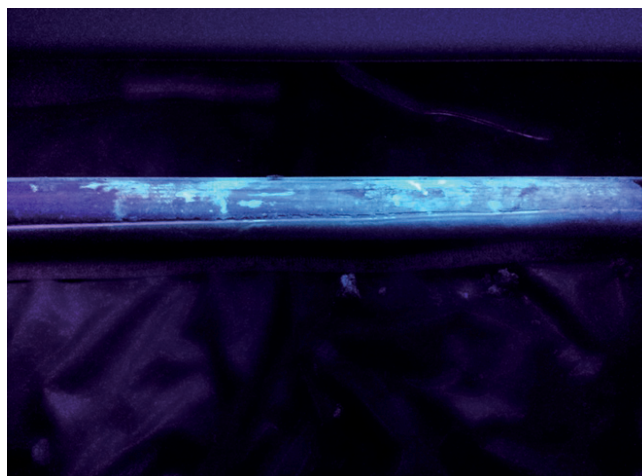


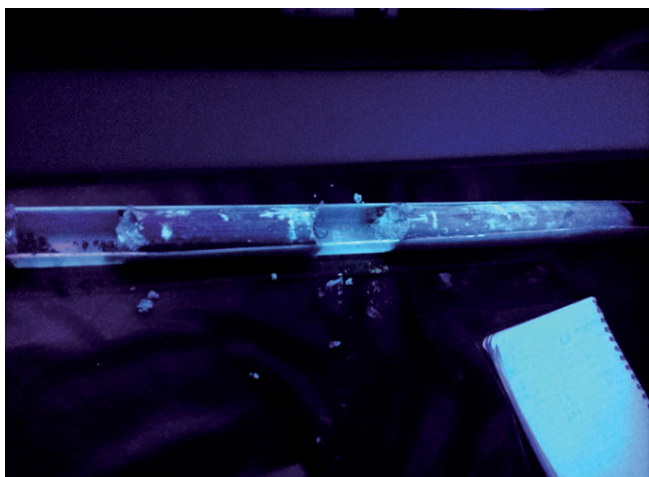
Figura 9. Detecção visual de produto no solo através de UV-A para registro fotográfico.

6. Eram selecionadas e colocadas nos fracos apropriados todas as amostras dos pontos em que fosse identificada, pela lâmpada UV-A, uma anomalia indicando presença de óleo no solo. Essa amostra correspondia a aproximadamente 3,0 cm do comprimento do *liner* (Figuras 10 e 11);
7. Após essa seleção, uma alíquota com a mesma quantidade de solo, retirada do ponto imediatamente superior àquele que foi selecionado no frasco, era colocada em um saco plástico tipo *Zip*, desagregada e medida com o aparelho tipo PID;
8. Nos *liners* que a lâmpada UV-A não indicava nenhuma anomalia, eram selecionadas alíquotas para avaliação no PID nos contatos litológicos, nas pontas e no centro do *liner*;



Figura 10. Seleção da amostra discreta a ser enviada ao laboratório após aplicação do UV-A.





**Figura 11.** Análise com UV-A do *liner* após amostra discreta ter sido retirada.

9. Nos pontos em que nenhum *liner* indicou anomalia no UV-A, foi selecionada 01 amostra de solo e encaminhada ao laboratório, na mesma camada hidrogeológica em que a fase retida foi detectada nos demais pontos;
10. Nos pontos em que muitas amostras foram selecionadas, optou-se por enviar ao laboratório apenas algumas alíquotas, que fossem mais representativas da heterogeneidade geológica vertical, e, limitada a seis amostras por ponto;
11. A descrição tátil-visual era completada, possibilitando a definição das zonas-alvo de monitoramento da água subterrânea (zonas preferenciais de fluxo), das diferentes camadas estratigráficas e hidroestratigráficas, e das camadas representantes das zonas de armazenamento (retenção) de contaminantes em fase retida;

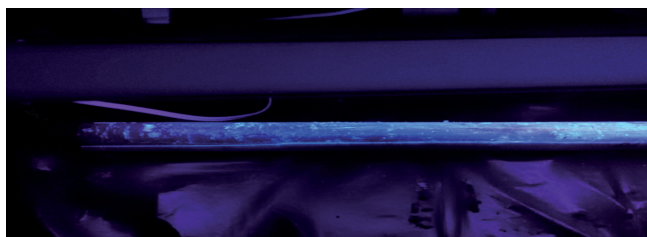
Antes de cada sondagem, foi executada uma sondagem de reconhecimento a trado manual em torno de 1,0 m de profundidade, como procedimento de segurança, no intuito de identificar possíveis interferências subterrâneas (rede pluvial, esgoto, energia). Após cada sondagem, era efetuada a lavagem e descontaminação de todo o ferramental, evitando contaminação cruzada de um ponto a outro.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas 29 sondagens Direct Push aplicando o procedimento descrito no item 2, com

o objetivo de determinar o perfil estratigráfico inicial, fazer um *screening* de fase retida em campo com equipamento de luz UV-A, coletar amostras para análise química para delimitar tridimensionalmente a possível fase retida e identificar as camadas de fluxo preferencial (unidades aquíferas significativas). De acordo com o procedimento, nos pontos em que o equipamento indicasse a presença de fase retida de Hidrocarbonetos de Petróleo (HP), seriam selecionadas as amostras para encaminhamento ao laboratório de análises químicas. Um exemplo desse *screening* pode ser visto na Figura 12, que mostra o *liner* de 1,20 m a 2,40 m do ponto SD-07.

As descrições do perfil de cada ponto de sondagem e as profundidades exatas onde cada amostra de solo foi encaminhada ao laboratório estão exemplificadas na Figura 13, que mostra oito desses pontos (SD-01 a SD-08).



**Figura 12.** *Screening* com equipamento de luz UV-A indicando a presença de fase retida no *liner* de 1,20-2,40 m no ponto SD-07

Com base na descrição dos perfis de solo das amostras coletadas, foi estabelecido o modelo estratigráfico inicial da área de interesse, apresentando 09 unidades distintas:

1. Argila arenosa, plástica, pouco consistente, cinza clara;
2. Argila rija, não plástica, marrom avermelhada;
3. Argila arenosa, não plástica, pouco consistente, marrom amarelada;
4. Argila plástica, pouco consistente, marrom escuro;
5. Areia fina argilosa, marrom amarelada;
6. Argila arenosa, não plástica, consistente, marrom avermelhada;
7. Argila arenosa, plástica, consistente, cinza/marrom;
8. Areia média/grossa, marrom amarelada;
9. Areia fina, cinza clara.

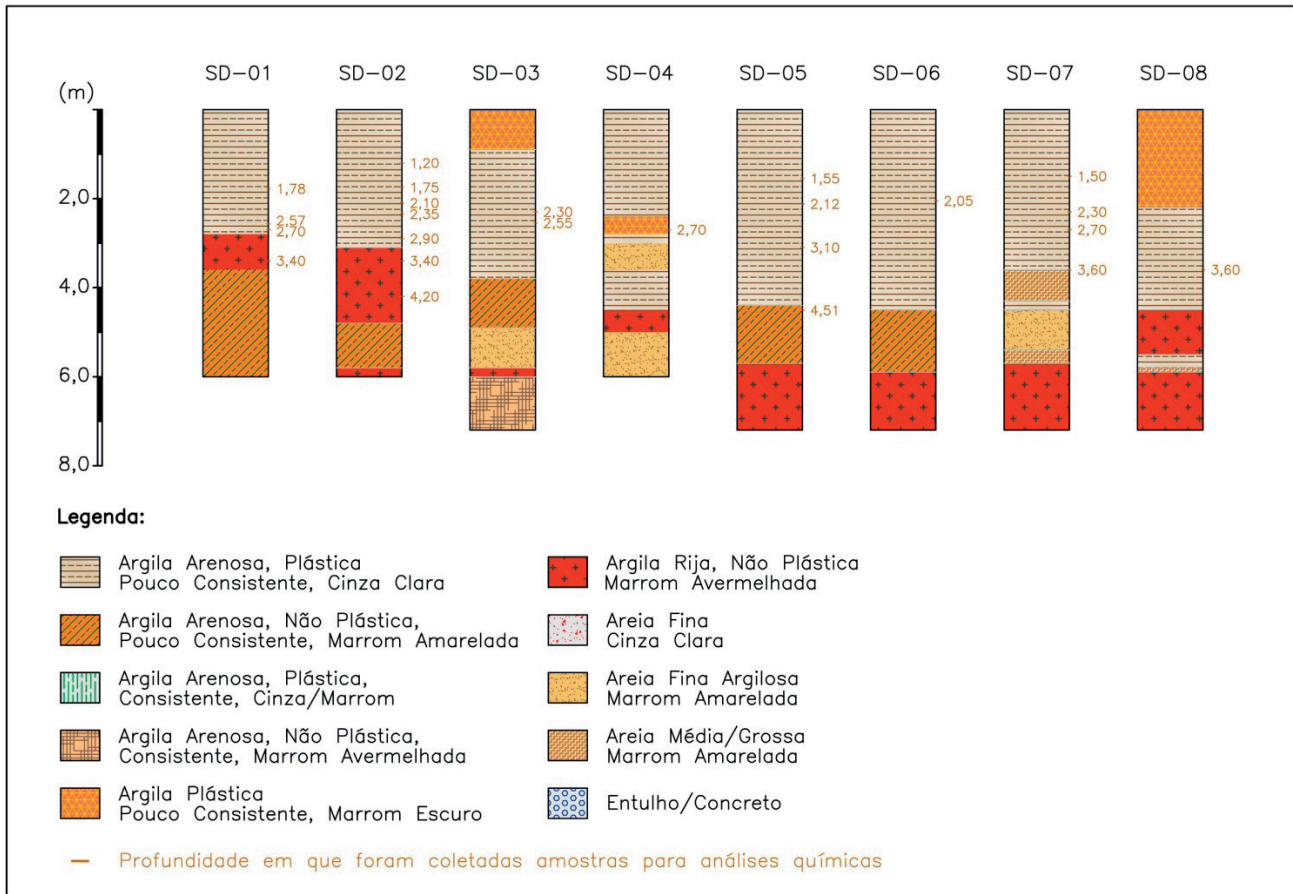


Figura 13. Exemplo de descrição do perfil do subsolo com as profundidades de coleta de amostras

A camada mais representativa – argila arenosa, plástica, pouco consistente, cinza clara, apresenta as seguintes características físicas: composição granulométrica 46,3% de areia; 32,75% de argila; 20,95% de silte; fração de carbono orgânico total de 1,64%, porosidade total 39,4% e densidade 1,61 g/cm<sup>3</sup>. Outra camada significativa é a que foi descrita tátil-visualmente como “argila arenosa, não plástica, pouco consistente, marrom amarelada”. As características dessa camada são:

composição granulométrica: 36,93% de areia, 40,25% de argila e 22,83% de silte, fração de carbono orgânico desprezível, porosidade total de 48,1%, porosidade efetiva de 8,89% e densidade de 1,21 g/cm<sup>3</sup>. A camada de fluxo mais significativa é a “areia média/grossa, marrom amarelada”. A composição granulométrica dela é de 61,95% de areia, 26,4% de argila e 11,40% de silte.

Os resultados das análises químicas encontram-se na Tabela 1

**Tabela 1.** Resultados das análises químicas de solo para o parâmetro TPH-Total

| Valor de Intervenção para TPH-Total = 5.000 mg/Kg |                  |                      |       |                  |                      |
|---|------------------|----------------------|-------|------------------|----------------------|
| Ponto   | Profundidade (m) | Concentração (mg/Kg) | Ponto | Profundidade (m) | Concentração (mg/Kg) |
| SD 01   | 1,78             | 12.330,57            | SD 13 | 0,95             | 5.541,34             |
|   | 2,57             | 13.546,77            |       | 1,83             | 8.509,16             |
|   | 2,70             | 8.860,70             |       | 1,93             | 7.070,98             |
|   | 3,40             | 1.592,45             |       | 2,35             | 6.774,04             |
| SD 02   | 1,20             | 9.115,14             | SD 14 | 2,75             | 4.976,42             |
|   | 1,75             | 12.098,77            |       | 2,85             | 5.519,25             |
|   | 2,10             | 4.372,08             |       | 3,18             | 3.867,69             |
|   | 2,35             | 6.345,48             |       | 4,50             | < 35                 |
|   | 2,90             | 11.591,20            |       | 2,00             | 343,7                |
|   | 3,40             | 2.333,57             |       | 2,30             | 1.653,97             |
| SD 03   | 4,20             | 1.357,97             | SD 15 | 3,30             | < 33                 |
|   | 2,30             | < 362                |       | 2,30             | < 37                 |
| SD 04   | 2,55             | 8.232,88             | SD 16 | 1,15             | 7.094,71             |
|   | 2,70             | < 35                 |       | 1,98             | 12.614,31            |
| SD 05   | 1,55             | 8.614,04             | SD 17 | 3,50             | 6.697,69             |
|   | 2,12             | 5.721,39             |       | 4,05             | 696,12               |
|   | 3,10             | 3.221,51             |       | 3,30             | < 34                 |
| SD 06   | 4,51             | < 37                 | SD 18 | 1,00             | 6.844,56             |
|   | 2,05             | 5.560,98             |       | 2,25             | 1.422,67             |
|   | 2,80             | 1.184,60             |       | 3,60             | < 36                 |
| SD 07   | 1,50             | 4.258,70             | SD 19 | 2,20             | 7.442,95             |
|   | 2,30             | 6.748,76             |       | 2,80             | 3.409,62             |
|   | 2,70             | 9.299,78             |       | 3,70             | 359,07               |
|   | 3,60             | 1.640,74             |       | 3,50             | < 34                 |
| SD 08   | 3,60             | < 36                 | SD21  | 3,30             | < 37                 |
| SD 09   | 3,50             | < 35                 | SD 22 | 3,90             | 1.326,68             |
| SD 10   | 3,00             | < 34                 |       | 1,10             | < 320                |
| SD 11   | 3,30             | < 34                 |       | 1,80             | < 339                |
|   | 1,10             | 7.572,24             | SD29  | 2,60             | 17.302,80            |
|   | 1,93             | 3.762,62             |       | 3,20             | 10.301,70            |
|   | 2,10             | 4.963,29             |       | 3,50             | 5.540,50             |
|   | 2,23             | 2.669,21             |       | 3,80             | < 335                |
|   | 2,75             | 4.751,20             |       | 5,00             | < 332                |
|   | 2,90             | 2.342,34             |       |                  |                      |
|   | 3,47             | 4.065,22             |       |                  |                      |
| 3,85  | 444,22           |                      |       |                  |                      |
|   | 4,25             | < 37                 |       |                  |                      |

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Interpretação Tradicional

A interpretação tradicional das amostras de solo, determinada pelo Manual do Gerenciamento de Áreas Contaminadas e pelos procedimentos da CETESB (1999), indicariam a necessidade de se enviar uma amostra de solo por ponto para o laboratório de análises químicas, na profundidade em que se obtivesse o maior valor de VOC medido em campo, ou da franja capilar. A amostragem de solo tradicional também seria diferente, seria de metro em metro, onde um amostrador *liner* seria serrado ao meio, com metade dele servindo de base para a medição de VOC e a outra metade armazenada em temperatura menor que 4°C. Se aquela alíquota

fosse selecionada, o solo da metade do *liner* seria colocado em parte dentro do frasco e enviado ao laboratório, que faria sub-amostras para submeter à análise química (CETESB, 2007). Nessa abordagem, as incertezas são muito grandes, pois um frasco representa 1,0 m do perfil do solo e, como pode ser visto nos resultados, há uma grande variação de concentração dentro de 1,0 m.

Considerando o maior valor obtido do ponto e extrapolando esse valor para o perfil inteiro desse ponto, seriam plotadas as isolinhas de concentração de TPH-Total em fase retida da forma como podem ser vistas na Figura 14. Essa plotagem dá um resultado em planta (bidimensional) que, de acordo com a abordagem tradicional, é considerado representativo de toda a zona vadosa (para esse caso, 3,50 m).

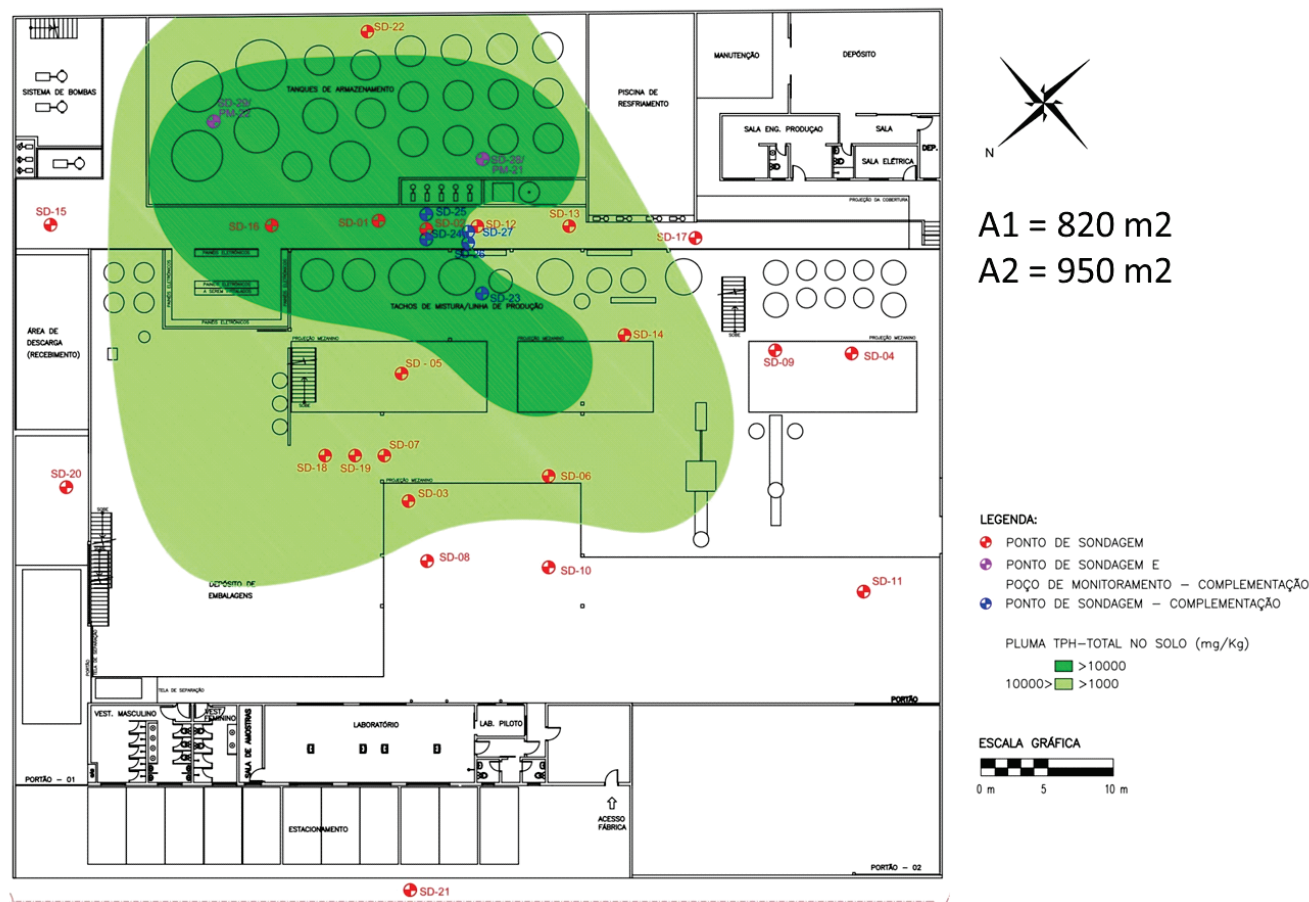


Figura 14. Isolinhas de concentração de TPH-Total retido plotadas de acordo com o método tradicional

Para calcular a massa de contaminantes em fase retida, portanto, multiplica-se a área representativa da pluma, pela espessura da zona vadosa, pela densidade média estimada de todo esse

volume de solo pela concentração média dessa pluma. Para a área de maior concentração, utilizou-se 11.750 mg/Kg, pois é a média entre o limite (10.000 mg/Kg) e a maior concentração obtida



(13.500 mg/Kg). Para a área de menor concentração, utilizou-se a média entre o limite inferior, de 1.000 mg/Kg e superior, de 10.000 mg/Kg. A média, portanto, é de 5.500 mg/Kg. Utilizou-se o valor médio da literatura de 1400 Kg/m<sup>3</sup> como densidade do solo. Com esses valores, obtém-se a massa de 73,8 toneladas de TPH retido no solo.

#### 4.2 Interpretação de Alta Resolução (HRSC)

A interpretação da massa retida através da abordagem de alta resolução visa diminuir as incertezas ao avaliar, em escala de detalhe, não a concentração média, mas sim, a distribuição desse contaminante e sua interação com o meio físico. A importância dessa interação está de acordo com as mais recentes abordagens para investigação de áreas contaminadas, como Suthersan et al (2015) que chamou de “*SMART Characterization*” a abordagem que busca otimizar a remediação aplicando técnicas de investigação que priorizem a determinação da massa e do fluxo de massa. Chapman et al (2011), Ellis (2014), Quinnan et al (2010), Pitkin (2008), entre outros mostram que o olhar detalhado para os dados da interação contaminante/meio físico são fundamentais para a determinação da massa “imóvel”, que, de alguma forma (residual, retida ou adsorvida) está ligada ao solo, em oposição à massa “móvel” que está dissolvida na água subterrânea. O cálculo mais acurado da massa total é fundamental para que seja realizado um plano de intervenção adequado (RIYIS, 2014) e que obedeça a legislação (SÃO PAULO, 2013).

O protocolo de amostragem seguiu o procedimento denominado por Ellis (2014) e referendado por Suthersan et al (2015), de *whole-core soil sampling* (WCSS), que é parte fundamental de uma abordagem maior de investigação de alta resolução (HRSC) descrita por Pitkin (2008), Riyis (2012), Dymont (2011), Crumbling (2004), e consiste em determinar a massa de contaminantes que está ligada ao solo, seja em fase retida, residual ou adsorvida, especialmente nas zonas de armazenamento (Quinnan et al, 2010) ou de baixa permeabilidade, onde costuma estar 90% da massa total dos contaminantes em uma área fonte (Dymont, 2011; CHERRY et al, 2009).

O cálculo da massa total de TPH em fase retida, nessa abordagem, foi feito da seguinte forma:

- Em cada ponto de amostragem de solo, são delimitadas as camadas de acordo com suas características físicas. Cada camada possui uma espessura, em metros;
- Tomando-se uma área-base, de 1,0 m<sup>2</sup>, obtém-se o volume de solo dessa camada;
- Com o valor de densidade dessa camada específica (obtido através das análises físicas das amostras de solo), obtém-se a massa (Kg) de solo relativa a esse volume;
- Com os valores de concentração de TPH (mg/Kg), obtém-se a massa de TPH retida no solo por m<sup>2</sup> de área. Quando há mais de uma concentração na mesma camada, considera-se um valor médio para toda a camada, ou o maior valor até o ponto em que há um valor menor. Se não há amostra em alguma das camadas significativas, toma-se o valor mais próximo dela na camada superior e considera-se a camada inteira com a metade da concentração desse valor mais próximo;
- Por fim, em planta, verifica-se a área que cada ponto representa e multiplica-se a massa obtida (Kg/m<sup>2</sup>) por essa área calculada, obtendo-se a massa total retida;

O cálculo da massa total de TPH retido no solo está na Tabela 2.

Observa-se que a massa de TPH ligada ao solo (retida, adsorvida ou residual) calculada pela metodologia da alta resolução, seguindo os protocolos do *whole-core soil sampling* (ELLIS, 2014) e a abordagem *SMART* (SUTHERSAN et al, 2015), com menores incertezas, corresponde a 41% da massa de 73,8 toneladas calculada pela metodologia tradicional utilizando a abordagem consagrada e considerada como o mínimo necessário pelos órgãos ambientais.

Byrnes (2009) já indicava a importância de uma investigação para remediação em escala de detalhe, em oposição às investigações confirmatórias e detalhadas, que, respectivamente, têm o objetivo de detectar a presença de contaminação e verificar se essa contaminação vai causar risco a algum receptor. Mesmo sem citar ferramentas sofisticadas de obtenção de dados em tempo real, o autor considera que a investigação para remediação deve ir além do tradicional e buscar encontrar o centro de massa da contaminação e sua interação com o meio físico.

**Tabela 2.** Cálculo da massa de TPH-total retida no solo

|                                       | Massa de TPH retida<br>(Kg <sub>TPH</sub> /m <sup>2</sup> ) | Área representativa<br>(m <sup>2</sup> ) | Massa Total de TPH retida (Kg <sub>TPH</sub> ) |
|---------------------------------------|---|--|--|
| SD-01                                 | 41,03   | 33,75                                    | 1.384,89                                       |
| SD-02                                 | 34,7  | 19,74                                    | 684,98   |
| SD-03                                 | 27,19   | 70,59                                    | 1.919,36                                       |
| SD-04                                 | 0   | 95,59                                    | 0,00   |
| SD-05                                 | 19,62   | 57,59                                    | 1.130,06                                       |
| SD-06                                 | 19,70   | 90,35                                    | 1.779,63                                       |
| SD-07                                 | 18,62   | 33,7                                     | 627,40   |
| SD-08                                 | 0   | 204,51                                   | 0,00   |
| SD-09                                 | 0   | 79,45                                    | 0,00   |
| SD-10                                 | 0   | 110,22                                   | 0,00   |
| SD-11                                 | 0   | 266,15                                   | 0,00   |
| SD-12                                 | 26,64   | 27,46                                    | 731,57   |
| SD-13                                 | 32,07   | 35,52                                    | 1.139,26                                       |
| SD-14                                 | 1,96  | 82,21                                    | 161,29   |
| SD-15                                 | 0   | 180,98                                   | 0,00   |
| SD-16                                 | 50,62   | 93,93                                    | 4.754,92                                       |
| SD-17                                 | 0   | 328,95                                   | 0,00   |
| SD-18                                 | 26,80   | 134,69                                   | 3.609,66                                       |
| SD-19                                 | 19,06   | 10,03                                    | 191,16   |
| SD-20                                 | 0   | 289,89                                   | 0,00   |
| SD-21                                 | 0   | 666,51                                   | 0,00   |
| SD-22                                 | 8,97  | 110,5                                    | 2.961,87                                       |
| SD-23                                 | 38,62   | 88,23                                    | 3.407,65                                       |
| SD-28                                 | 52,80   | 107,96                                   | 5.699,97                                       |
| SD-29                                 | 3,69  | 110,32                                   | 407,45   |
| <b>Massa Total de TPH Retida (Kg)</b> |   |  | <b>30.591,13</b>                               |

Há, evidentemente, um aumento dos custos de uma investigação que priorize os detalhes do meio físico e da interação desses com o contaminante, porém, esse incremento nos custos de investigação é compensado pela redução dos custos de remediação, uma vez que a massa calculada é significativamente menor. Outra vantagem importante da investigação em alta resolução que pode ser observada nesse estudo é a redução do tempo da remediação, pois, imaginando uma estimativa de 73,8 toneladas como verdadeira, uma redução de massa de contaminante de 30 toneladas corresponderia a 42% da massa estimada, quando, na verdade, a redução seria de 98%, pois a massa

encontrada com a investigação de alta resolução foi de 30,6 toneladas. Por fim, outro aumento da eficiência e eficácia da remediação após uma investigação em detalhe se daria pela obtenção da posição tridimensional exata dos principais centros de massa da contaminação, que seria impossível de obter por uma investigação tradicional.

Em resumo, a redução dos custos e o aumento da eficiência e eficácia da remediação compensam o aumento nos investimentos em investigação, se essa for feita com uma abordagem que priorize os detalhes do meio físico e da interação meio físico/contaminante, como o presente estudo indicou.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração de um Modelo Conceitual adequado é condição primordial para um projeto de remediação minimamente eficaz. Para se elaborar esse Modelo Conceitual, é preciso que a etapa de investigação da área contaminada seja conduzida corretamente, com as melhores ferramentas disponíveis, mas isso nem sempre é feito, ou devido ao (aparentemente) custo mais elevado e/ou ao desconhecimento dos profissionais sobre as metodologias mais eficazes para cada caso, que preferem seguir o passo-a-passo dos procedimentos tradicionais, acarretando em erros no diagnóstico.

Um desses erros é a estimativa de massa retida, que, se for feita pela abordagem tradicional, leva em conta apenas a zona não saturada e toma uma única amostra (com erros no processo de amostragem) para representar toda a extensão vertical daquele ponto, sem levar em conta o meio físico em que a massa está inserida. A abordagem de alta resolução, por outro lado, prioriza a investigação detalhada do meio físico, da interação massa/meio e o entendimento da distribuição vertical do contaminante, na zona não saturada e na zona saturada, particularmente nas regiões de baixa permeabilidade.

O presente trabalho mostrou que a diferença no cálculo da massa retida pelas duas abordagens foi muito grande nesse caso (73,8 toneladas na abordagem tradicional e 30,6 toneladas na abordagem de alta resolução), e se a abordagem tradicional fosse utilizada como único diagnóstico da área, os custos de revitalização seriam muito superiores ao necessário. Portanto, um custo mais alto na etapa de investigação se justifica plenamente, na medida em que esse recurso será economizado na etapa posterior.

## REFERÊNCIAS

- Byrnes, M. E. 2009. *Field Sampling Methods for Remedial Investigation, 2<sup>nd</sup> Edition*. CRC Press, Boca Raton, FL, 348p.
- CETESB - Companhia Ambiental de São Paulo. 1999. *Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas*. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadas/manual.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/manual.asp)>
- CETESB - Companhia Ambiental de São Paulo. 2007. *Procedimento para Identificação de Passivos Ambientais em Estabelecimentos com Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC)*. São Paulo.
- Chapman S., Parker B. 2011. *High-Resolution Field Characterization and Numerical Model of Contaminant Storage and Release for Low Permeability Zones*. SERDP/ESTCP Partners in Environmental Technology Technical Symposium and Workshop. Washington/DC.
- Cherry J., Parker B. 2009. *DNAPL Contamination on Groundwater*. Anais do I Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo (CIMAS). São Paulo-SP.
- Crumbling D. M. 2004. *Building a Second-Generation Data Quality Model*. Triad Training, EPA National Site Assessment Symposium. San Diego.
- Dyment, S. 2011. *Using High-Resolution Site Characterization to Improve Remediation Design and Implementation*. Federal Remediation Technologies Roundtable. Washington-DC.
- Ellis R. E. 2014. *Summary of Findings for the 2013; High-Resolution Groundwater Hydraulic Investigation and Geochemical Investigation; Former Burgess-Norton Mfg. Co., Inc.; 660 Nims Street; Muskegon, MICHIGAN; MDEQ Site ID 61000410*. Relatório Técnico submetido ao Michigan Department of Environmental Quality. Arcadis-US. Michigan Office. 09/04/2014. Disponível em [http://nimsreport.com/documents/2F2013\\_660\\_Nims\\_Investigation\\_Report\\_MDEQ\\_Text-Tables-Figures\\_Final.pdf](http://nimsreport.com/documents/2F2013_660_Nims_Investigation_Report_MDEQ_Text-Tables-Figures_Final.pdf)
- Pitkin S., Cherry J. A., Ingleton R.A., Broholm M. 1999. *Field demonstrations using the Waterloo ground water profiler*. Ground Water Monitoring and Remediation, Spring: 122-131.
- Pitkin S.. 2008. *High Resolution Site Characterization at TRIAD Approach*. In: Triad Investigation: New Approaches and Innovative Strategies.. Disponível em [www.clu-in.org/conf/tio/triad4/prez/triad4ppt.ppt](http://www.clu-in.org/conf/tio/triad4/prez/triad4ppt.ppt)

- Quinnan J.A, Welty N.R.W, Killenbek E. 2010. *Hydrostratigraphic and permeability profiling for groundwater remediation projects*. Paper 3-33 do CPT'10. Huntington Beach, CA. Maio/2010. Disponível em: [http://www.cpt10.com/PDF\\_Files/3-33Quihap.pdf](http://www.cpt10.com/PDF_Files/3-33Quihap.pdf)
- Riyis, M. T. 2014. *A Revitalização de Áreas Contaminadas passa por Correta Amostragem de Solo*. Revista Pollution Engineering – Brasil. Edição Jul-Set.
- Riyis, M. T. 2012. *Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – FEB/UNESP. Bauru.
- SÃO PAULO. Decreto N° 59.263, de 05 de Junho de 2013. *Regulamenta a Lei n° 13.577, de 08 de julho de 2009, que dispõe sobre as diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá providências correlatas*. São Paulo. 2013. Legislação Estadual.
- Suthersan S., Quinnan J., Welty N. 2015. *The New ROI: Return of Investigation by Utilizing SMART Characterization Methods*. Ground Water Monitoring and Remediation, 35-n3. Summer: 25-33.



# METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA DETERMINAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL POR CHUVA E DOS SEDIMENTOS GERADOS POR EROSÃO EM ENCOSTAS

ALTERNATIVE METHODOLOGY FOR THE DETERMINATION OF RAIN RUNOFF AND SEDIMENTS GERATED BY EROSION IN SLOPES

JUCIELLI QUATRIN NUNES

*Graduada em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo – PR, Brasil. Email: jucielli\_@hotmail.com*

VITOR ANDRÉ GENEHR

*Graduado em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo – PR, Brasil. Email: vitorgenehr@hotmail.com*

SIMONE ANDREA FUREGATTI

*Eng., Dra., Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Bauru – SP, Brasil. Email: furegatti@feb.unesp.br*

## RESUMO ABSTRACT

A erosão é a principal forma de degradação do solo, causando entre outros problemas, o assoreamento de rios, perda de nutrientes do solo, deslizamentos e desmoronamentos em encostas. O escoamento superficial gerado pela sobra de água na superfície é um dos principais responsáveis pelo destacamento e carreamento de partículas sólidas em encostas. Para a determinação da quantidade de sedimentos gerados pelo escoamento superficial em um talude, seja ele natural ou construído, são utilizados vários tipos de sistemas de coleta, com emprego de diferentes materiais e diferentes formas, agredindo mais ou menos o local de instalação do sistema. Dependendo da importância do talude em que se trabalha, as restrições quanto à movimentação do solo inviabilizam a utilização de sistemas de coleta comumente utilizados, impulsionando novas pesquisas e desenvolvimento de metodologias alternativas para determinação do escoamento superficial e dos sedimentos gerados por erosão, como é o caso do presente trabalho. No decorrer da aplicação de uma metodologia é possível perceber vários pontos onde a teoria se mostra diferente da prática, possibilitando a partir dessas observações, o aprimoramento da metodologia

Erosion is the major form of soil degradation, causing the silting of rivers, loss of soil nutrients, mudslides, landslides on slopes, and many other problems. The runoff generated by the water left on the surface is a main contributor to the detachment and carrying of solid particles on slopes. To determine the amount of sediments generated by runoff on a slope, be it natural or built, numerous types of collecting systems composed by different materials are used in many different ways, deteriorating somewhat the location of the system. Depending on the importance of the slope where the work is being done, restrictions on the movement of the soil do not allow the use of common collecting systems, stimulating research and development of alternative methods to determining the runoff generated and sediments erosion. During the application of a methodology, it is possible to notice several aspects where the theory differs from the practice. In addition, these analyses allow the improvement of the method to be further applied in different situations in a practical and simple way to

para ser aplicada posteriormente em diferentes situações de forma prática e de fácil execução. Os primeiros resultados obtidos comprovaram a eficiência do método, bem como indicaram considerações que devem ser levadas em conta sobre os valores obtidos.

**Palavras-chave:** Erosão; escoamento superficial; geração de sedimentos; sistema de coleta.

## 1 INTRODUÇÃO

A erosão é a principal forma de degradação do solo, causando redução de capacidade produtiva e danos ambientais, como poluição e assoreamento (Cogo *et al.* 2003). Inúmeros fatores relativos ao solo e relativos à chuva influenciam nos processos erosivos, somente para citar a erosão hídrica. A intensidade e quantidade de chuva, o tamanho das gotas, o escoamento superficial gerado e o regime de chuvas de uma determinada região, constituem fatores relacionados à ação do processo. Enquanto fatores relacionados ao solo, como a umidade e grau de saturação do solo, as características físicas (textura, porosidade, massa específica do solo seco, *etc*), as características geométricas da superfície (declividade e rugosidade), a taxa de infiltração, a capacidade de campo, a resistência do solo ao cisalhamento, entre outros, estão relacionados com a reação do solo aos processos erosivos.

O escoamento superficial gerado pela sobra de água na superfície é um dos principais fatores de destacamento e transporte de sedimentos nas encostas. A geração de escoamento superficial e a produção de sedimentos em taludes são altamente variáveis, dependendo das condições de superfície, captação e características pluviométricas (Huang *et al.* 2001). A declividade do terreno é um dos fatores preponderantes quanto à erosão hídrica. Quanto maior a inclinação maior o volume e a velocidade da enxurrada e, conseqüentemente, maior a capacidade de desgastar o solo, por ação de cisalhamento (Cogo *et al.* 2003).

Pesquisas relacionadas à erosão hídrica são realizadas, em sua maioria, por meio de coleta de sedimentos gerados por enxurrada com a utilização de parcelas delimitadas e recipiente para coleta

perform. The first results obtained proved the efficiency of the method, as well as pointed considerations which should be taken into account on the obtained values.

**Keywords:** Erosion; runoff; sediments generation; collection systems.

do material gerado. A delimitação das parcelas é feita, geralmente, com a utilização de chapas de aço (Yair *et al.* 2011, Silva 2006, Freitas *et al.* 1980, Carvalho 1992, Oliveira *et al.* 2010, Cogo *et al.* 2003, Hernani *et al.* 1999) ou com a utilização de parede de alvenaria ou concreto (Souza *et al.* 2001, Bertoni 1949, Cruz 2006, Lima 1988).

Em metodologias encontradas na literatura, em geral, os sistemas coletores utilizados causam alterações na estrutura dos taludes, através de escavações para delimitação das parcelas ou para fixação de recipiente coletor de enxurrada e sedimentos gerados. Essas escavações causam danos à estrutura do talude, promovendo o desprendimento de partículas do solo e, conseqüentemente a geração de sedimentos. A sugestão de uma metodologia alternativa busca minimizar tais danos e facilitar a montagem e realização do sistema, bem como a aquisição dos dados.

O presente artigo é parte de um projeto desenvolvido em parceria com Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB) e Itaipu Binacional, na Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME). Dois sistemas coletores de escoamento superficial (ES) e sedimentos gerados (SG), iguais, foram montados na BTME para gerar dados para análise da quantidade de sedimentos gerados na superfície do talude. Os dados estão sendo obtidos a partir de chuvas naturais, desde o mês de janeiro de 2015. Até o momento os dados obtidos foram insuficientes para qualquer análise, servindo somente para testar e aprimorar os sistemas. O objetivo deste artigo, portanto, é a formulação de uma alternativa de metodologia de coleta do escoamento superficial gerado por chuva natural no talude, assim como dos sedimentos gerados. O desenvolvimento dos sistemas na barragem visou o mínimo de alterações possível, por

motivos de segurança. Fato que impulsionou o desenvolvimento de um sistema de coleta efêmero, porém reutilizável, de fácil instalação e remoção, alterando pouco o talude.

## 2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

Os estudos que geraram o presente artigo foram realizados nas dependências da Usina Hidrelétrica Itaipu Binacional, localizada na tríplice fronteira entre o Brasil, Paraguai e Argentina, próximo à cidade de Foz do Iguaçu, no oeste do estado do Paraná, Brasil (Figura 1).

A área em estudo está localizada na Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME) de Itaipu. A BTME compreende uma extensão de 2294 metros, localizada entre a estaca 122 + 47,17 e a estaca 142 + 36,50 (Itaipu, 2009).



Figura 1. Localização da Usina Hidrelétrica de Itaipu

## 3 DESCRIÇÃO E JUSTIFICATIVA DAS DIMENSÕES DA PARCELA

A área de captação (parcela) adotada para a coleta dos sedimentos possui as dimensões de 4 m de largura por aproximadamente 18 m de comprimento de rampa, totalizando 72 m<sup>2</sup> de área. Tais medidas são equivalentes às utilizadas por Hudson (1993), o qual utilizou parcelas com 100 m<sup>2</sup>, considerando essa área representativa em ensaios comparativos ao efeito real, principalmente para testes de cobertura vegetal. Porém, Hudson (1993) indica que as medidas de largura e comprimento da parcela são arbitrárias e a opção pela padronização parte da facilidade na comparação de resultados. O autor aponta, entretanto, que parcelas com largura superior a 6 metros são mais suscetíveis à ocorrência de efeito de borda e, portanto, suscetíveis a falhas nos resultados. Portanto, as dimensões das parcelas coletoras devem ser adequadas a fatores de execução do ensaio como, topografia, tipo de solo e utilização de simuladores, ou consideração da chuva natural.

Ensaio realizado com simuladores de chuva devem utilizar parcelas com dimensões adequadas ao raio de dispersão de água dos equipamentos utilizados. Dessa forma, as dimensões são inferiores àquelas utilizadas em ensaios que utilizam precipitações naturais.

Analisando alguns ensaios realizados por meio de simuladores de chuva, mostrados na Tabela 1, nota-se que as dimensões utilizadas para as parcelas diferem entre si. Isso se deve às particularidades de cada equipamento e à dimensão do raio de dispersão de água, ou então das particularidades do local da pesquisa.

Para pesquisas utilizando chuvas naturais, as dimensões das parcelas utilizadas são maiores, na maioria dos casos. Observando a Tabela 2, nota-se que apenas dois autores utilizaram dimensões menores, se aproximando das medidas utilizadas em pesquisas envolvendo simuladores de chuva. Nota-se também que dois pesquisadores utilizaram parcelas com área próxima ao valor indicado por Hudson (1993) e, também, aos valores utilizados para os sistemas coletores instalados na BTME.

Portanto, as dimensões acabam não condicionando os resultados obtidos, sendo adequadas

conforme as particularidades do local a ser estudado e aos métodos utilizados. No caso da BTME de Itaipu, as dimensões escolhidas foram delimitadas pelo comprimento de rampa do trecho estudado e pela largura das chapas metálicas, obtendo uma área de aproximadamente 72 m<sup>2</sup>.

tadas pelo comprimento de rampa do trecho estudado e pela largura das chapas metálicas, obtendo uma área de aproximadamente 72 m<sup>2</sup>.

**Tabela 1.** Características de parcelas para chuvas simuladas

| Autor                                  | Características da Parcela |                |            |
|--|----------------------------|----------------|------------|
|  | Área (m <sup>2</sup> )     | Dimensões (m)  | Formato    |
| Braida J. A. <i>et al.</i> (1999)      | 0,375                      | 0,500 x 0,750  | Retangular |
| Butzen V. <i>et al.</i> (2013)         | 0,280                      | φ: 0,600       | Circular   |
| Huang J. <i>et al.</i> (2012)          | 3,000                      | 3,000 x 1,000  | Retangular |
| Mello E. L. <i>et al.</i> (2003)       | 38,500                     | 3,500 x 11,000 | Retangular |
| Oliveira J. R. de <i>et al.</i> (2010) | 0,800                      | 1,000 x 0,800  | Retangular |
| Schäfer, M. J. <i>et al.</i> (2003)    | 0,375                      | 0,750 x 0,500  | Retangular |

**Tabela 2.** Características de parcelas para chuvas naturais

| Autor                               | Características da Parcela |                 |            |                     |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------------|------------|---------------------|
|                                     | Área (m <sup>2</sup> )     | Dimensões (m)   | Formato    | Delimitação lateral |
| Moody J. A. <i>et al.</i> (2014)    | ~1,000                     | φ: ~0,600       | Circular   | Chapa de aço        |
| RDCSEC Perieni (2014)               | 100                        | 25,000 x 4,000  | Retangular | Chapa de aço        |
| Silva P. M. O. (2006)               | 30                         | 3,000 x 10,000  | Retangular | Chapa de aço        |
| Silva R. L. <i>et al.</i> (2011)    | 1250                       | 25,000 x 50,000 | Retangular | Camalhões de terra  |
|                                     | 1875                       | 25,000 x 75,000 | Retangular |                     |
| de Souza J. L. <i>et al.</i> (2001) | 100                        | 25,000 x 4,000  | Retangular | Alvenaria           |
| Yair A. <i>et al.</i> (2011)        | 8                          | -               | Retangular | Chapa de aço        |

#### 4 EFEITO DE BORDA

Ao se delimitar uma área para obtenção de dados, como amostragem de uma região, é necessário considerar o efeito de borda. O efeito de borda consiste em considerar que qualquer delimitação altera, mesmo que minimamente as características da área. No caso de geração de sedimentos, por exemplo, a delimitação pode gerar uma quantidade de sedimentos que pode interferir no resultado, dependendo da proporção e do tamanho da área amostral. Nas pesquisas levantadas, podemos observar que em geral se utilizam chapas de aço, ou muretas de alvenaria, ou ainda camalhões de terra (Tabela 2). Moody (2014) utiliza parcelas circulares, sendo dessa maneira delimitada em todas as extremidades. RDCSEC Perieni (2014) utiliza delimitação lateral com chapas de aço e trabalha com talude artificial. Silva (2011) utiliza camalhões de terra para delimitação,

trabalhando em um talude natural utilizado para atividade agrícola. Souza (2001) utiliza alvenaria como delimitador de sua parcela, trabalhando em talude natural e também em atividade agrícola. Yair *et al.* (2011) e Silva (2006) utilizam delimitação com chapas de aço em talude natural sendo o último aplicado em atividade agrícola. Observa-se que as parcelas são delimitadas lateralmente, uma vez que os locais de implantação dos sistemas de coleta não exigem maiores restrições quanto a movimentação de solo ou por se tratar de encostas que devido ao seu formato exijam delimitações.

Ao trabalhar com uma encosta natural observam-se diferentes formatos, segundo o modelo proposto por Troeh (1965, *apud* Rodrigues 1982) que aponta quatro tipos de formato, conforme se observa na Figura 2.

Além de Troeh (1965, *apud* Rodrigues 1982), Ruhe (1975 *apud* Xujiongxin 1996) propõe classificações das encostas como linear (L), côncavo (C)



e convexo (V). Combinando classificações de comprimento e largura das encostas diversos tipos de geometria podem ser analisados, conforme Figura 3.

Tratando-se de um talude rigorosamente construído, como é o caso do talude da BTME e por meio da análise das declividades da região do talude

onde foram implantados os sistemas de coleta, é possível observar que a água que entra no talude escoou, saindo do talude pela mesma linha em que entrou, já que a declividade do talude é constante, podendo ser comparado a forma co-linear proposta por Ruhe (1975 *apud* Xujiongxin 1996).

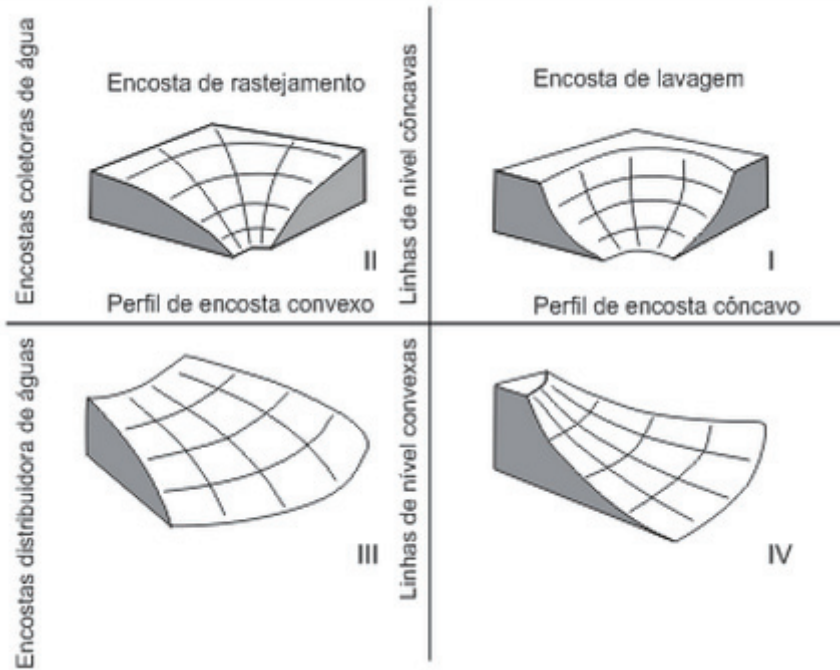


Figura 2. Forma de encostas Troeh (1965, *apud* Rodrigues 1982).

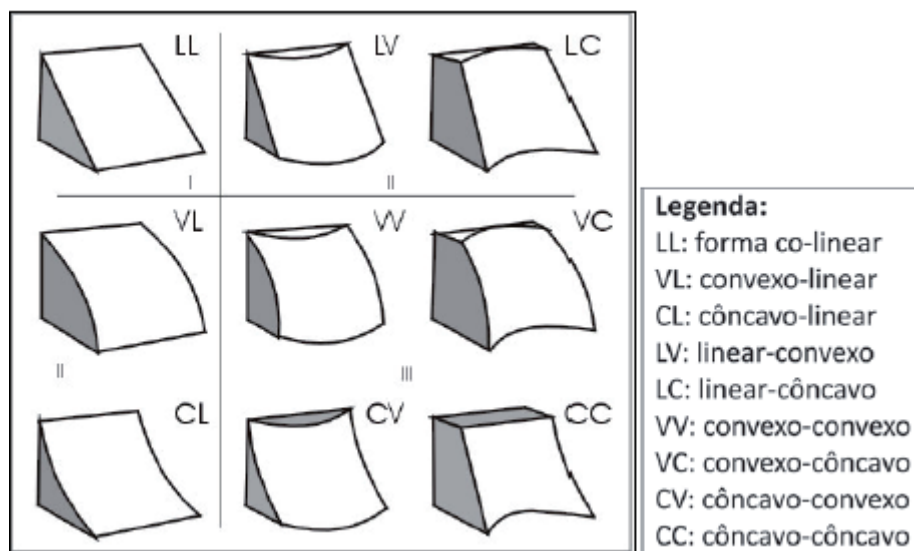


Figura 3. Geometria das encostas Ruhe (1975 *apud* Xujiongxin 1996)

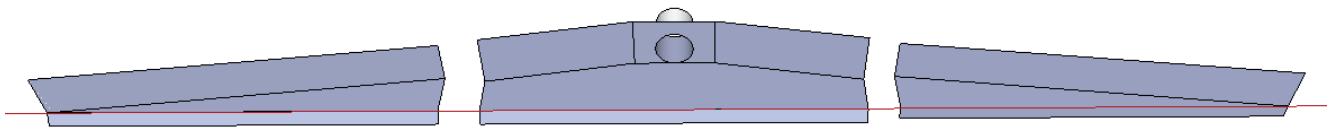
Além do formato, por se tratar de uma barreira de terra, existem restrições quanto a movimentação do solo do talude. Devido às características dessa estrutura de contenção, como por exemplo, o grau de compactação do solo e os índices de permeabilidade, devem-se minimizar movimentações de solo e evitar cravações excessivas ou profundas.

O tipo de formato do talude somado as restrições quanto a movimentação de terra no talude, levaram a não delimitação lateral das parcelas coletoras. Com isso, é possível dizer que esse tipo de sistema coletor é aplicável em grande parte dos taludes construídos, porém, quando tratar-se de uma encosta natural, de formato diferente, é necessário um estudo de caso específico para realizar as adaptações necessárias no sistema de coleta.

## 5 METODOLOGIA DE COLETA

### 5.1 O Sistema Coletor

O sistema coletor é composto por chapas coletoras, tubos de ligação e caixas de retenção de água. As chapas coletoras foram projetadas para interceptar e captar o ES em uma faixa de 4 metros. Para facilitar a cravação no solo, as chapas são compostas por três partes, sendo que a parte central é conectada ao tubo de ligação. Foram usadas chapas de 2 mm. A espessura possibilita biselar um dos lados para facilitar a cravação e garantir mínima deformação da chapa no momento da cravação, que é feita com marreta. Na Figura 4 é mostrado o projeto das três partes das chapas.



**Figura 4.** Projeto das chapas metálicas

Os tubos de ligação conectam as chapas coletoras às caixas de retenção, assim como conectam as caixas de retenção entre si (Figura 5). Foram utilizados tubos de PVC, com diâmetro de 100 mm. O sistema atual possui duas caixas de retenção, com capacidade de 372 L. A primeira caixa possui um envelope de geomanta, responsável pela retenção dos sedimentos gerados. O envelope de geomanta fica apoiado sobre uma grade no interior da caixa de retenção e é fixado pela tampa da caixa de retenção, conforme descrito à frente.

Durante o decorrer do projeto, notou-se que a adoção do método de coleta por meio do envelope de geomanta tornou a segunda caixa de retenção dispensável. Entretanto, optou-se por não removê-la do sistema, uma vez que seria necessário reposicionar todas as peças.



**Figura 5.** Sistema coletor: vista geral do sistema, à frente as calhas coletoras, ligadas à primeira caixa por tubo de PVC.

## 5.2 Escoamento Superficial (ES)

Devido à grande ocorrência de tempestades de raios durante algumas chuvas, principalmente nos períodos de verão, definiram-se duas metodologias de coleta, uma metodologia básica, para chuvas sem tempestades de raios e outra específica para chuvas acompanhadas de raios. Tal distinção visa a segurança dos pesquisadores que realizarão as coletas.

As coletas de ES serão realizadas durante os eventos de chuva, para isso, é importante que os pesquisadores estejam no local de coleta no momento do início da chuva, pois, além do ES deverão ser cronometrados o tempo de início da chuva e o tempo de início do escoamento superficial. O tempo decorrido entre o início da chuva e o início do escoamento superficial depende de fatores como o tipo de vegetação do local e a permeabilidade do solo. O projeto da barragem previa um coeficiente de permeabilidade vertical ( $k_v$ ) de  $5,0 \times 10^{-7}$  cm/s. Considerando-se a permeabilidade muito baixa, presume-se que o tempo de início da chuva e o tempo de início do

escoamento superficial são muito próximos. Preferencialmente serão realizadas coletas no início, meio e fim do evento de chuva, visando obter dados representativos da variação de intensidade durante um evento de chuva.

As coletas serão realizadas no tubo instalado no final do sistema coletor que desagua na canaleta. Sob a canaleta foi posicionada uma tábua que serve de suporte para o balde (Figura 6-a). Durante as coletas o balde não deve ser alimentado pela água da chuva, para que essa água não seja contabilizada como escoamento superficial. A fim de evitar que esse erro ocorra, foi providenciado um cobrimento de lona, estendida do cano até o balde (Figura 6-b). Com o balde posicionado corretamente abaixo da saída da água, com o auxílio do cronômetro, deve ser contabilizado o tempo necessário para atingir a marca de 1l ou 2l, dependendo da intensidade do escoamento superficial. Serão registradas as medidas até a marca de 10l, que corresponde a capacidade do balde, e, posteriormente, o balde será esvaziado para novas leituras.



(a)



(b)

**Figura 6.** (a) Tábua suporte para o balde e (b) Cobrimento de lona sobre o balde.

### 5.2.1 Coleta em chuvas acompanhadas de raios

Para esse tipo de coleta, a diferença é que os pesquisadores não devem ficar expostos à chuva, permanecendo no veículo durante o evento chuvoso. Nesse caso a lateral do balde onde existe a

marcação de volume deve ficar descoberta pela lona, para que com um binóculo, de dentro do carro, seja possível visualizar o balde. Dentro do balde foi inserida uma talisca de madeira compensada, que por ser menos densa que a água, flutua, facilitando a observação da marca da água na distância possível de observação.



### 5.3 Sedimentos Gerados (SG)

No projeto desenvolvido, a coleta dos sedimentos gerados será realizada de duas maneiras distintas, a primeira com o objetivo de obter os dados de sedimentos gerados em uma chuva isolada e a segunda com o objetivo de obter os dados de sedimentos gerados acumulados em vários eventos chuvosos. Para isso, em coletas de chuva isolada, a geomanta deverá ser substituída por outra após o evento de chuva analisado. Já em coletas de chuvas acumuladas, a geomanta permanecerá por um período de tempo onde serão coletados dados de vários eventos de chuva, obtendo os sedimentos gerados acumulados em determinado período de tempo.

Antes de instalar a geomanta no sistema de coleta, a peça deve ser pesada e a massa anotada,

juntamente com a data e hora da instalação. A massa da manta antes da instalação será utilizada na subtração do conjunto manta mais sedimento, obtendo assim, a massa de sedimentos retidos pela geomanta. Com a caixa aberta o revestimento de geomanta cortado e costurado conforme projeto, é colocado no interior da caixa e apoiado sobre a grelha de forma uniforme. Com a geomanta posicionada corretamente, realiza-se um recorte para encaixe do tubo que chega até a caixa. Esticando a manta sobre o furo, executam-se dois cortes em X com o auxílio de um estilete. Após a execução do furo, a geomanta encaixa-se perfeitamente no tubo (Figura 7-a) e a tampa da caixa pode ser fechada. As abas devem ser dobradas para fora da caixa e fixadas com a própria tampa da caixa (Figura 7-b).



(a)



(b)

**Figura 7.** (a) Encaixe da geomanta no tubo e (b) Abas da geomanta fixadas com a tampa da caixa.

Para a retirada da geomanta, uma pessoa deve estar posicionada próxima ao tubo e a outra na direção oposta. Atentos para não perder sedimentos depositados, as duas pessoas devem retirar com cuidado as extremidades da geomanta, erguendo vagarosamente as pontas, atentando para que o sedimento não escape pelo furo do cano (conforme a Figura 8-a). Conforme a água das extremidades for escoando para o centro da

geomanta, deve-se juntar as extremidades, inclusive as laterais, formando um bolsão, e suspender lentamente a geomanta (conforme Figura 8-b), levando-a até um balde. Após a retirada da geomanta, a água da caixa deve ser remexida para homogeneizar o conteúdo e uma amostra da água da caixa deve ser coletada em uma garrafa com capacidade de 500 ml. Com essa amostra, deve ser realizado o ensaio de sólidos totais, que verificará



a presença de sedimentos finos que eventualmente possam ter passado pela geomanta.

A geomanta retirada deve ser levada ao laboratório onde permanecerá em estufa a 80°C por aproximadamente 24 horas. Deve-se tomar cuidado para que a geomanta não entre em contato com as paredes laterais da estufa, evitando danos a geomanta, uma vez que a temperatura

nesses locais pode ser mais alta. Após a secagem, a geomanta deve ser retirada da estufa e sua massa determinada. A diferença entre as massas gera a massa de sedimentos retidos pela geomanta. Somando-se, portanto, o sedimento retido pela geomanta com o sedimento verificado pelo ensaio de sólidos totais, chega-se à quantidade de sedimentos gerados pelo escoamento superficial.



**Figura 8.** Sequência de retirada da geomanta contendo os sedimentos gerados.

## 6 RESULTADOS DAS COLETAS TESTE

O modelo proposto foi aplicado em dois sistemas coletores montados em pontos distintos na BTME, diferindo entre os dois, apenas a quantidade de ES gerado.

Foram realizadas as primeiras coletas simultaneamente nos dois sistemas, com o intuito de verificar a eficiência, tanto do sistema coletor montado, quanto da metodologia de coleta proposta. Assim, as primeiras coletas foram denominadas coletas teste.

Durante as primeiras coletas em chuvas isoladas percebeu-se que a quantidade de SG não foi expressiva o suficiente para ser mensurada, não apresentando diferença na massa da geomanta antes e após a coleta. Assim, foram realizadas três coletas de SG considerando chuvas acumuladas, para diferentes períodos, visando avaliar o intervalo de tempo ideal para realização das coletas.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das coletas teste, incluindo o período de cada coleta,

a quantidade de chuva precipitada no período (obtida através de um pluviógrafo instalado nas proximidades dos sistemas coletores) e a quantidade de sedimentos gerados para cada uma das três coletas, em cada um dos dois sistemas.

Durante a fase das coletas teste, a observação da quantidade de sedimentos finos que passou pela malha da geomanta apontou para a necessidade de aprimoramento da metodologia de coleta, garantindo maior precisão nas medições da quantidade de sedimentos gerados. Para isso, paralelamente as novas coletas, vêm sendo desenvolvidos alguns testes com a manta. A partir de repetidas medições da quantidade de sedimentos finos que passam pela malha da geomanta, objetiva-se obter um fator de correção que relacione tal quantidade, com a massa de sedimentos gerados coletada. O fator de correção visa minimizar o erro inerente de pesquisas dessa natureza.

**Tabela 3.** Coletas de SG adaptado de Pascoto (2015)

| Coleta | Período de coleta (data) | Chuva precipitada (mm) | SG Sistema 1 (g) | SG Sistema 2 (g) |
|--------|--------------------------|------------------------|------------------|------------------|
| 1      | 14/01 a 15/01            | 7,6                    | 2,3              | 3                |
| 2      | 16/01 a 18/01            | 43,31                  | 4,9              | 3,9              |
| 3      | 20/01 a 03/04            | 249,46                 | 19               | 21,3             |

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia exposta, no que diz respeito ao sistema de coleta, apresenta um projeto das chapas coletoras de fácil execução e instalação *in loco*. Permite a reutilização das chapas, possibilitando sua adaptação para serem utilizadas em estudos com simuladores de chuva.

A metodologia facilita a delimitação da parcela, por não adotar limitadores físicos, considerando a própria geometria da encosta. Até o presente estudo, porém, se considera a adoção desse método para encostas do tipo co-linear, conforme descrito por Ruhe (1975 *apud* Xujiongxin 1996), ou para taludes construídos, nos quais tal geometria da superfície pode ser observada. Desta forma, estudos específicos devem ser desenvolvidos para avaliar a possibilidade de adoção do método para outros formatos de encostas.

A utilização das geomantas na obtenção da quantidade de sedimentos gerados agrega um ganho na metodologia, pois facilita e possibilita que a coleta dos SG seja feita depois dos eventos de chuva, quando essa for a opção de obtenção de dados. A obtenção da quantidade de sólidos presentes no fluxo que passa pela manta é fator específico do projeto desenvolvido na BTME de Itaipu. Na maioria dos estudos sobre erosão laminar, porém, essa quantidade de sedimentos pode ser considerada desprezível, eliminando a execução de ensaios de sólidos totais. As coletas de SG realizadas apontam para a eficiência na metodologia de coleta proposta, porém, novas coletas devem ser realizadas a fim de comprovar tal eficiência e acurar a metodologia apresentada.

Finalmente, o método de obtenção do escoamento superficial teve pequeno ganho ao se adotar a possibilidade de realizar as leituras à distância. O método, porém, necessita de aprimoramento, podendo se desenvolver um método de coleta automatizado. Dessa forma, se eliminaria

por completo a necessidade de realização de obtenção de dados durante os eventos de chuva.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEASB/PTI/ITAI-PU pela disponibilização da estrutura física, bem como apoio financeiro, técnico e administrativo para realização do projeto.

## REFERÊNCIAS

- Academy of Agricultural and Forestry Sciences Gheorghe Ionescu-Sisesti Bucharest.2015. RDSEC Perieni. Romênia. Disponível em: <<http://www.cesperieni.ro/index.html>> Acesso em: 08 de fevereiro de 2015.
- Bertoni, J. 1949. Sistemas coletores para determinações de perdas por erosão. Segunda Reunião Brasileira de Ciência do Solo. Campinas.
- Braida J. A. et al. 1999. Relações da erosão em entressulcos com o tipo e com a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. Revista brasileira ciência do solo, v. 23 n. 3, Viçosa.
- Butzen, V. et al. 2013. Quantification of Hortonian overland flow generation and soil erosion in a Central European low mountain range using rainfall experiments. Catena - Elsevier B. V.
- Carvalho, C. N. 1992. Fluxo geoquímico de Sódio, Potássio, Cálcio e Magnésio em função do uso agrícola. Tese de Doutorado em Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Cogo, N. P.; Levien, R.; Schwarz, R. A. 2003. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e

- níveis de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de ciência do solo*, v. 27, n. 4, Viçosa.
- Cruz, E. S. 2006. Influência do preparo do solo de plantas de cobertura na erosão hídrica de um argissolo vermelho-amarelo. Dissertação de mestrado em Ciências – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- Freitas, P. L. et al. 1980. Avaliação de perda de solo e água com chuva natural, em podzólico vermelho-amarelo distrófico, na área experimental do SNLCS, Município de Itaguaí, RJ. EMBRAPA-SNLCS. (EMBRAPA-SNLCS. Pesquisa em Andamento, 1).
- Hernani, L.C.; Fabricio, A.C. 1999. Perdas de solo e água por erosão: dez anos de pesquisa. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. 12p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Coleção Sistema Plantio Direto, 1).
- Huang, J. et al. 2012. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. *Catena – Elsevier B. V.*
- Huang, J. et al. 2001. Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion. *Catena – Elsevier B. V.*
- Hudson, N.W. 1993. Field Measurement of soil erosion and runoff. Produzido por Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Lima, W. P. 1988. Escoamento superficial, perdas de solo e de nutriente em microparcelas reflorestadas com eucalipto em solos arenosos no município de São Simão, SP. IPEF, n.38, p.5-16, Piracicaba.
- Mello, E. L. et al 2003. Perdas de solo e água em diferentes sistemas de manejo de um nitossolo háplico submetido à chuva simulada. *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 27 n. 5 Viçosa.
- Moody, J. A. et al. 2014. Infiltration and runoff generation processes in fire-affected soils. Published online 18 June 2014 in Wiley Online Library.
- Oliveira, J. R. de et al 2010. Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, v. 14 n. 2, Campina Grande.
- Rodrigues, J.E. 1982. Estudo de fenômenos erosivos acelerados: boçorocas. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Pascoto, T. V. 2015. Quantificação de Sedimentos Desprendidos em Eventos de Chuvas no Talude de Jusante da Margem Esquerda da Barragem de Terra da Itaipu. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Toledo.
- Schäfer, M. J. 2001. Erosão em entres sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. *Revista brasileira ciência do solo*, v. 25, n. 2, Viçosa.
- Silva, J. M. A. et al. 2006. Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em encostas e canais. Parte I: desenvolvimento e avaliação. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v. 26, n.3, p.695-703, set./dez.
- Silva, P. M. O. 2006. Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG. Tese de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Silva, R. L. e et al. 2011. Erosão em sistema plantio direto: Influência do comprimento de rampa e da direção de semeadura. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, v. 15 n. 6, Campina Grande.
- Souza, J. L. de. et al. 2001. Correlação escoamento superficial-precipitação em solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. 3º Simpósio Brasileiro de Captação de Água de Chuva no Semi-Árido. Brasília.
- Xujiongxin 1996. Benggang erosion: the influencing factors. In: *Catena*. v. 27, p. 249-263
- Yair, A. et al 2011. Differential hydrological response of biological topsoil crusts along a rainfall gradient in a sandy arid area: Northern Negev desert, Israel. *Catena – Elsevier B. V.*



# PROPOSIÇÕES PARA UM CISALHAMENTO DIRETO DE CAMPO: ALTERNATIVA EM MAPEAMENTOS GEOTÉCNICOS

*PROPOSITIONS FOR A DIRECT SHEAR TEST IN THE FIELD: ALTERNATIVE IN GEOTECHNICAL MAPPING*

VITOR SANTINI MÜLLER

*UFSC, Florianópolis, SC. E-mail: vitor@mullergeo.com*

NILO RODRIGUES JÚNIOR

*UFSC, Florianópolis, SC. E-mail: nilorodriguesjunior@gmail.com*

MATHEUS KLEIN FLACH

*UFSC, Florianópolis, SC. E-mail: matheus.k.flach@gmail.com*

MURILO DA SILVA ESPÍNDOLA

*UFSC, Florianópolis, SC. E-mail: murilo.espindola@ufsc.br*

REGIANE MARA SBROGLIA

*UFSC, Florianópolis, SC. E-mail: regianesbroglia@gmail.com*

RAFAEL AUGUSTO DOS REIS HIGASHI

*UFSC, Florianópolis, SC. E-mail: rrhigashi@gmail.com*

JUAN ANTONIO ALTAMIRANO FLORES

*UFSC, Florianópolis, SC. E-mail: juan.flores@ufsc.br*

## RESUMO ABSTRACT

A demanda por mapeamentos geotécnicos é antiga, porém os incentivos para estes levantamentos são recentes. Os estudos de resistência do meio físico em busca da segurança de instalações vêm crescendo nos últimos anos fruto dos desastres, ditos, naturais. As técnicas de mapeamentos de susceptibilidade à deslizamentos distinguem-se desde dados puramente estatísticos, até cartas geológicas e imagens aéreas de alta definição. A fim de não abrir mão da execução de ensaios para a obtenção dos parâmetros de resistência nos mapeamentos, e respeitando-se os curtos prazos em grandes demandas, analisou-se a influência de um protocolo de ensaio de cisalhamento direto em regime de múltiplos estágios. Realizaram-se ensaios em condições normatizadas e nas condições propostas no protocolo, de forma que a comparação das envoltórias obtidas mostraram necessidades de adequações do equipamento utilizado em campo. Após as modificações os resultados obtidos adequaram-se àqueles

The demand for geotechnical mapping is old, but the incentives for these surveys are recent. The resistance studies of the physical environment in to the buildings of stability have been growing in recent year's result of disasters, said, natural. Technical susceptibility mappings are distinguished from purely statistical data to geological maps and aerial high definition images. Searching the execution of tests to establish the strength parameters in mappings without breaching the deadlines, we analyzed the influence of a direct shear test protocol without the consolidation of normal efforts and multistage system. Assays were performed in standard conditions and as proposed in the protocol, so that failure envelope showed up adequacy requirements of the equipment used in the field. After the modifications, the results fits those presented by other autors. It is concluded that the multistage test protocol, in a Geotechnical mapping context presents itself as attractive alternative since it optimizes the



apresentados por outros autores. Conclui-se que o protocolo de ensaios em regime de múltiplos estágios, no contexto de mapeamento geotécnico, apresenta-se como interessante alternativa uma vez que otimiza o tempo de ensaio e possibilita a realização do mapeamento com a determinação dos parâmetros de resistência a partir de ensaios, o que atribui confiança ao mesmo. O mapeamento geotécnico não pode ser entendido como substituto para estudos de caso pontuais, mas ser ferramenta para determinar os locais e métodos destes. Para os estudos pontuais não recomenda-se a aplicação do protocolo de ensaios, mas a execução conforme a normatização.

**Palavras-chave:** Cisalhamento Direto; Mapeamento Geotécnico; Ensaios de Campo.

## 1 INTRODUÇÃO

O mapeamento geotécnico caracteriza-se como sendo uma ferramenta indispensável para o planejamento adequado de qualquer área, uma vez que o meio físico é a base para a implementação de qualquer tipo de ocupação.

O desequilíbrio socioambiental instalado no Brasil é, em parte, conforme Xavier (2004), fruto da acelerada expansão urbana que aconteceu no último século. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010) apontam que em 1950 a população urbana brasileira representava apenas 36,16%, valor aumentado para 84,36% em 2010.

Higashi (2002) aponta que pesquisadores têm desenvolvido metodologias para mapear, compreender e mensurar o comportamento geomecânico dos solos, mas que, apesar do primeiro mapa geológico com enfoque geotécnico ser datado de 1907, a caracterização geotécnica de áreas através de mapas ainda é tarefa árdua para muitos pesquisadores. Davison Dias (1995) sugere que solos oriundos da mesma unidade geológica/pedológica apresentam comportamento geomecânico semelhante. Assim, os resultados obtidos para um ponto de estudo contido em uma unidade são passíveis de extrapolação para toda a unidade em questão.

tests. Geotechnical mapping can not be understood as a substitute for specific case studies but must be tool to determine the locations and methods. For specific studies do not recommend the application of the test protocol, but the execution according to the regulation.

**Keywords:** Shear Test; Geotechnical Mapping; Field Tests

Mapeamentos geotécnicos de suscetibilidade de movimentos de massa, não necessariamente, utilizam-se de dados físicos de ensaios, contudo, a execução de ensaios rápidos pode conferir maior credibilidade aos mapas gerados. Os valores de índices físicos para a simulação matemática e interpretação das áreas susceptíveis aos fenômenos naturais podem ser determinados pelo ensaio de cisalhamento direto, o mais simples e antigo método, conforme Lambe & Whitman (1969). O ensaio de cisalhamento direto em laboratório, realizado conforme a norma internacional ASTM D3080 (2003), consome um tempo expressivo, considerando os prazos de mapeamentos geotécnicos. A crescente demanda em áreas de risco fez com que fosse necessária a proposição de um protocolo de ensaios de cisalhamento direto de forma acelerada, com a produção de múltiplas envoltórias de ruptura em um único dia de trabalhos de campo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A forma como este trabalho foi desenvolvido encontra-se simplificada pelo fluxograma da Figura 1. A revisão elaborada do estado da arte de estabilidade de taludes e ensaios de resistência ao cisalhamento, permitiu a compreensão dos métodos de ensaios e cálculos de estabilidade.

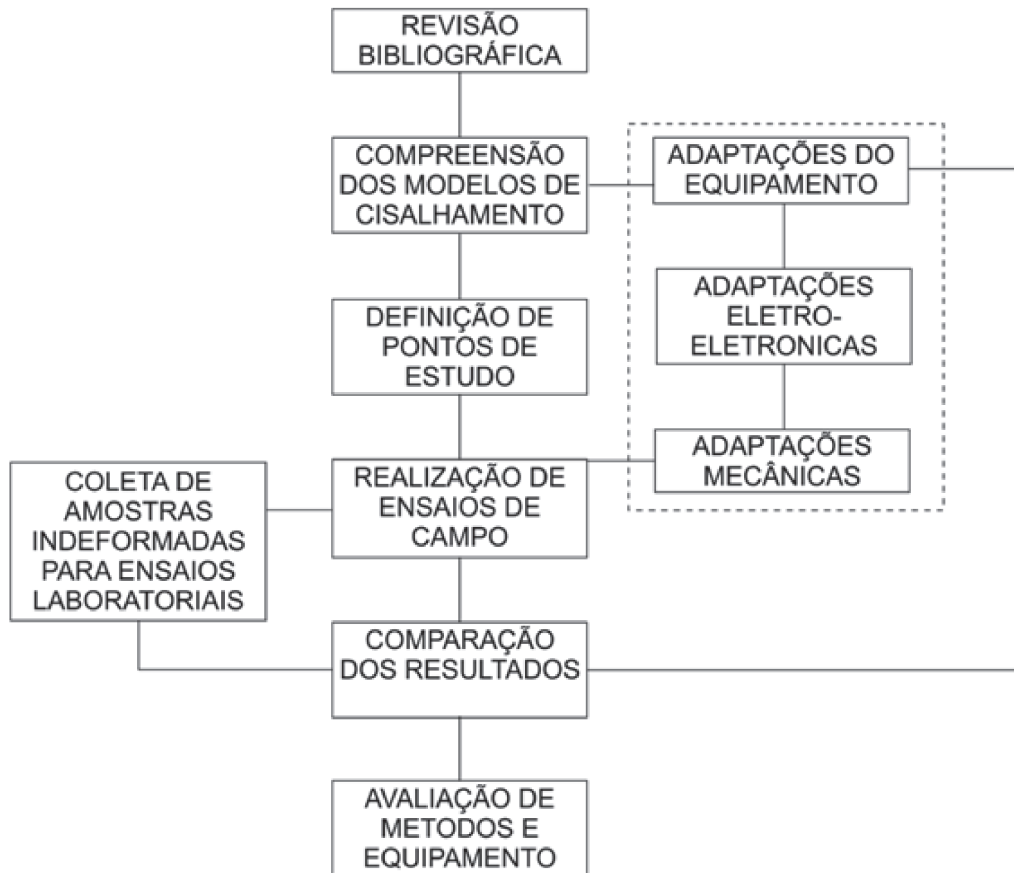


Figura 1. Fluxograma Simplificado das Metodologias Deste Trabalho

O protocolo de ensaios analisado por este trabalho, consiste em seguir o princípio do ensaio de cisalhamento direto, isto é, o de se movimentar uma porção do corpo de prova em relação à outra pela ação de uma força, crescente, paralela ao movimento, enquanto uma força constante normal é aplicada.

A variação proposta ao sugerido pela ASTM (2003), foi relacionada à execução de múltiplos estágios em um mesmo corpo de prova, como defendido por Antoniutti Neto & Vilar (1990) de modo que o ensaio pôde ser realizado em campo, com prioridade na diminuição do tempo de ensaio de modo a possibilitar maior agilidade ao mapeamento geotécnico.

A metodologia de análise de estabilidade de taludes aplicada neste trabalho foi o método das fatias, precursor do método de Bishop Simplificado que é frequentemente utilizado em Geotecnia.

### 3 PROTOCOLO DE ENSAIOS RÁPIDOS

O protocolo proposto sugere que sejam realizadas campanhas de campo em locais previamente determinados com auxílio de imagens de satélite e demais materiais cartográficos. A determinação dos pontos de estudos foi embasada nos trabalhos de Davison Dias (1995) e Zuquette (1987).

Conforme ilustrado pela Figura 2, a primeira providência nos pontos de estudos foi a coleta de um corpo de prova, com dimensões de 5,08cm x 5,08cm x 2cm. Com o corpo de prova moldado, iniciou-se o cisalhamento deste enquanto a equipe preparou a amostragem indeformada do ponto estudado.

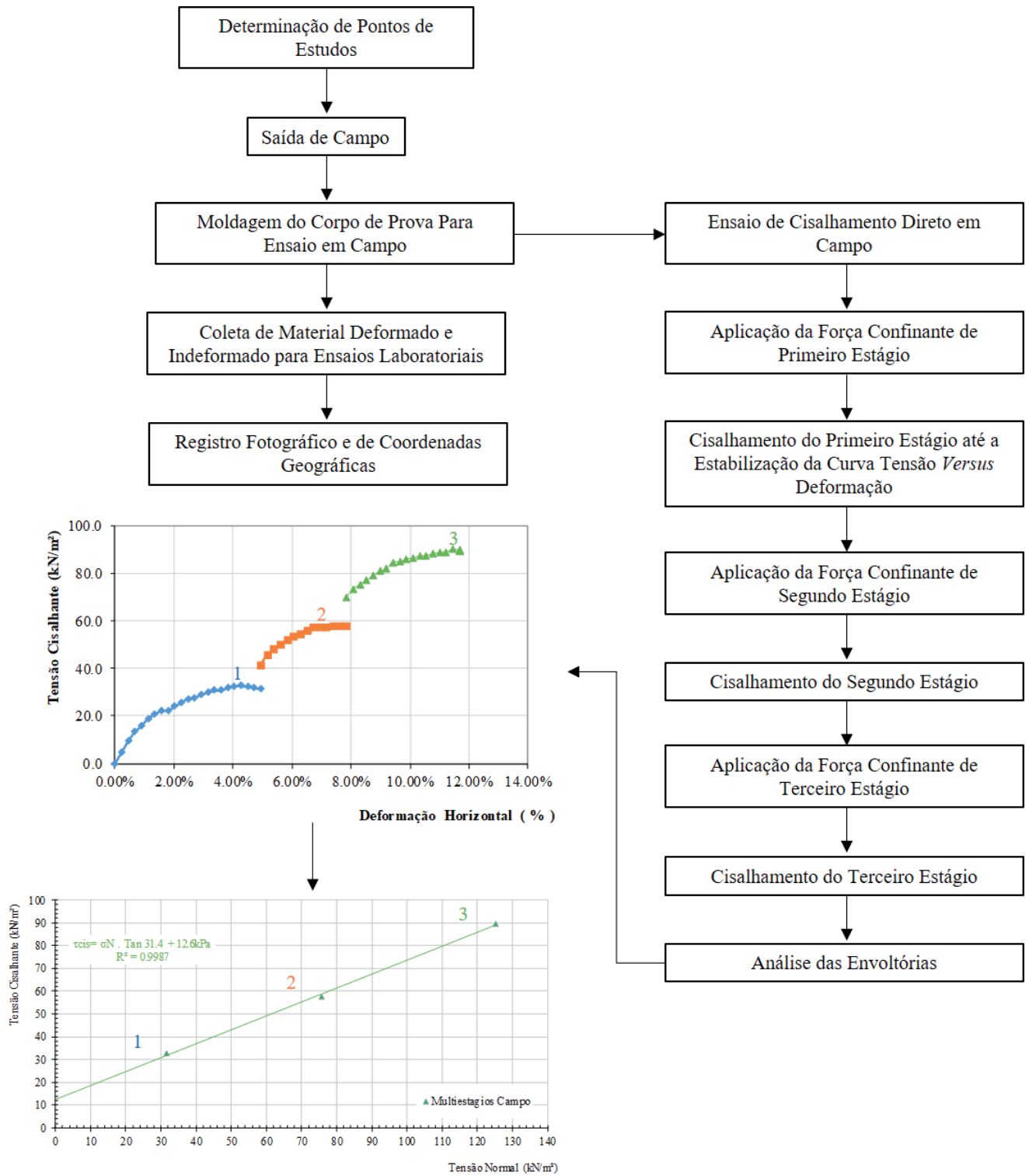


Figura 2. Fluxograma Ilustrativo do Protocolo de Ensaios

O ensaio de cisalhamento foi realizado a uma velocidade de deslocamento de 0,0228 milímetros por minuto. Cada corpo de prova coletado foi material para a determinação da completa envoltória de ruptura do ponto em questão. Os estágios

foram ensaiados numa metodologia de Múltiplos estágios em que um novo carregamento de tensão confinante foi aplicado assim que foi notada a estabilização dos esforços cisalhantes, por meio da curva de tensão *versus* deformação.

O principal objetivo do protocolo em análise foi de diminuir o tempo necessário para a obtenção dos parâmetros de resistência em cada local estudado. Devido a grande demanda por mapeamentos geotécnicos, sabe-se que a execução de ensaios é, muitas vezes, desprezada devido à falta de tempo disponível.

Como acredita-se que parâmetros de resistência atribuem significativa confiança ao produto gerado, buscou-se priorizar a rápida obtenção destes em detrimento da exatidão dos resultados, com o entendimento de que os desvios da exatidão seriam em virtude de poropressões positivas geradas no corpo de prova, esperou-se obter resultados conservadores em relação a resistência do material.

Para possibilitar a aplicação do protocolo, fez-se necessário adaptar um equipamento de cisalhamento direto existente no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina. As adaptações eletrônicas ocorreram para atualizar o funcionamento do equipamento, uma vez que este utilizava componentes extremamente obsoletos. Mecanicamente, adaptou-se o equipamento com a mudança na caixa de cisalhamento. A forma original permitia que a eventual existência de atrito no trilho da caixa de cisalhamento fosse tida como resistência do solo. As figuras Figura 3 e Figura 4 apresenta os esquemas de funcionamento do equipamento antes e depois das modificações efetuadas.

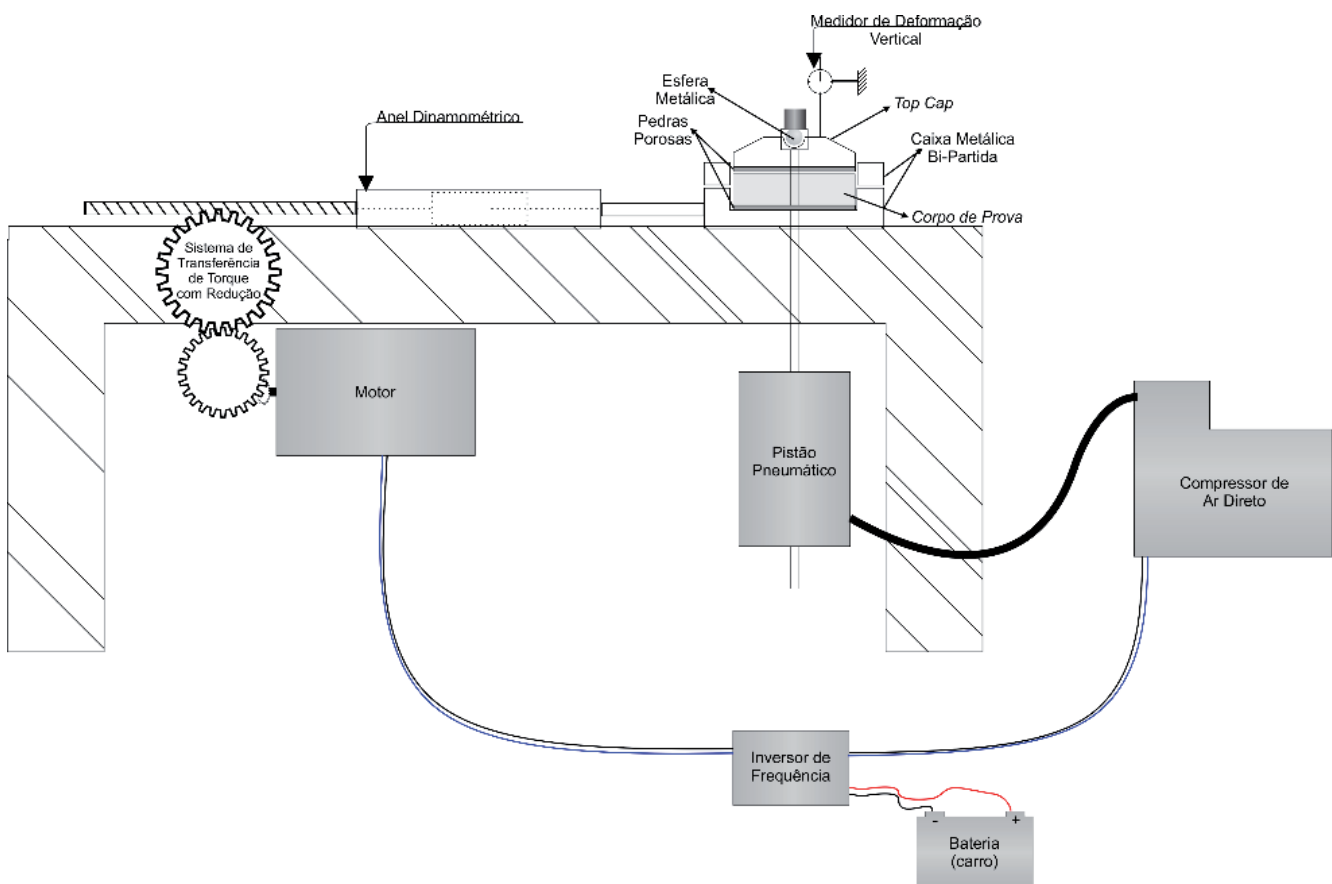


Figura 3. Esquema de funcionamento original do equipamento utilizado



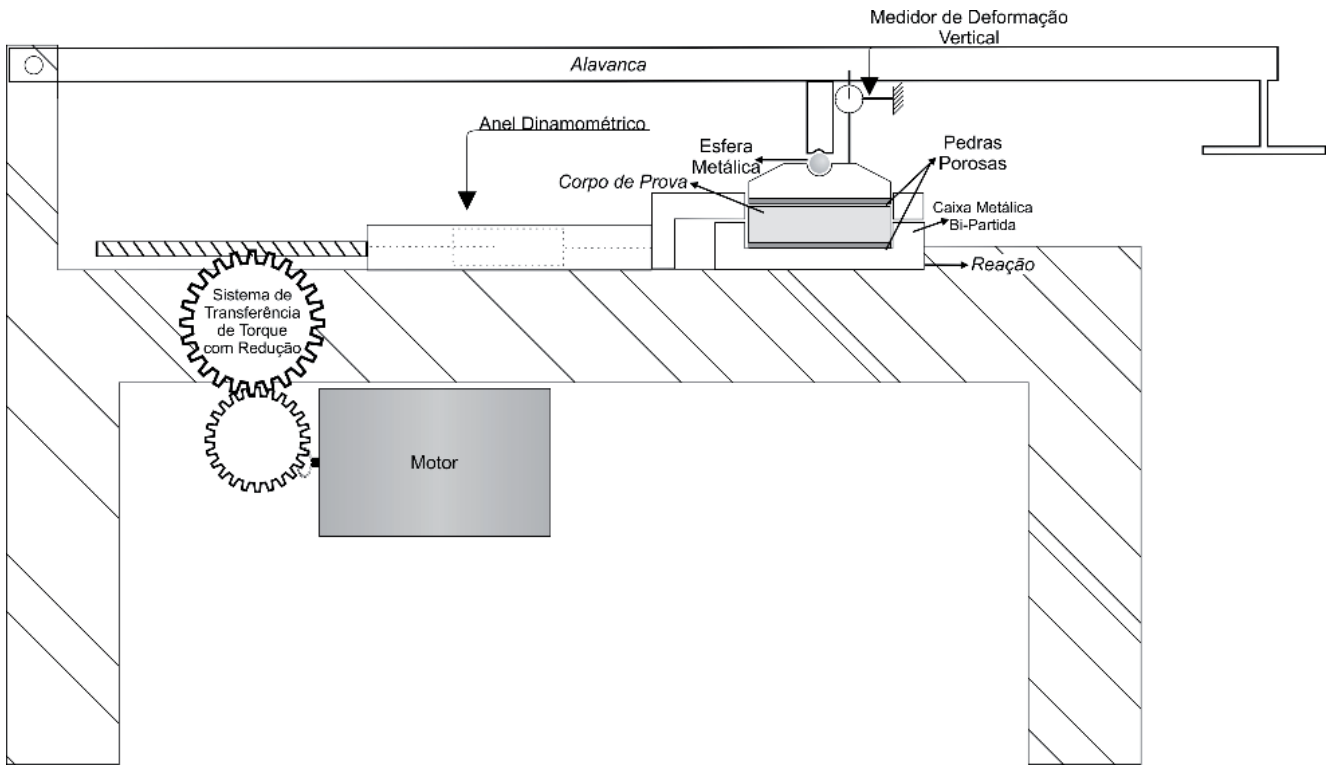


Figura 4. Esquema de funcionamento do equipamento após modificações.

#### 4 DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDOS

A metodologia de escolha dos pontos de estudos seguiu em concordância com o postulado por Davison Dias (1995) no que tange a extrapolação de resultados obtidos em um ponto de estudo para toda a unidade geotécnica.

Com base na condição afirmada por Zuquette (1987), de que solos na mesma unidade geotécnica, porém, em diferentes elevações podem apresentar discrepâncias de comportamento mecânico, consideram-se informações de relevo, drenagem, vias de acesso, além de imagens de satélite na busca por locais de solo exposto.

De modo a facilitar a navegação em campo, empregou-se um equipamento GPS, ao qual foram previamente gravadas as coordenadas de possíveis pontos de coleta.

#### 4.1 Nomenclatura de Unidades Geotécnicas

As unidades geotécnicas são definidas conforme Davison Dias (1995) de forma que a nomenclatura adotada é composta pela inicial do tipo de solo em maiúscula, seguida da inicial do tipo de rocha em minúscula, como pode ser visto na Figura 5.

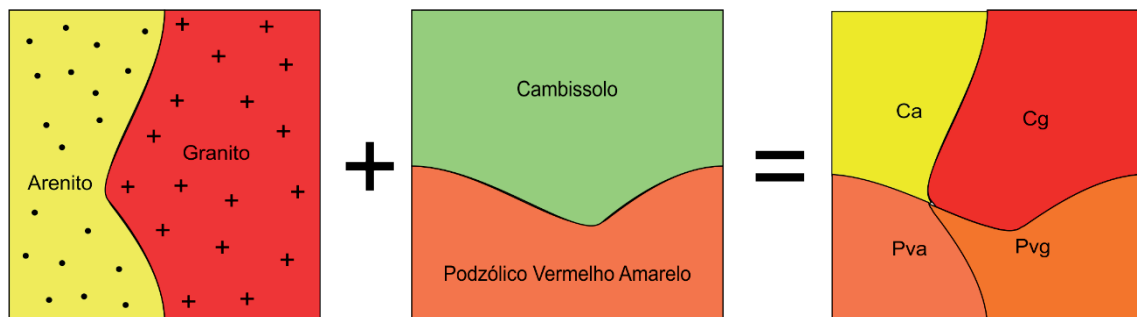


Figura 5. Definição de nomenclatura de unidades geotécnicas.

O Quadro 1 apresenta as simbologias utilizadas para os tipos de solo, em letras maiúsculas.

**Quadro 1.** Quadro de Simbologias de Pedologia Simplificada (Davison Dias 2001)

| Sigla | Classificação              | Sigla | Classificação               |
|-------|----------------------------|-------|-----------------------------|
| A     | Aluviais                   | P     | Podzóis Indiscriminados     |
| AQ    | Areia Quartzosa            | PB    | Podzólico Bruno-Acinzentado |
| B     | Brunizém                   | PE    | Podzólico Vermelho-Escuro   |
| BV    | Brunizém Vértico           | PL    | Planossolo                  |
| C     | Cambissolo                 | PLV   | Planossolo Vértico          |
| CB    | Cambissolo Bruno           | PLP   | Planossolo Plíntico         |
| GH    | Glei                       | PT    | Plintossolo                 |
| HO    | Solo Orgânico              | PV    | Podzólico Vermelho-Amarelo  |
| LA    | Latossolo Amarelo          | R     | Litólico                    |
| LB    | Latossolo Bruno            | TR    | Terra Roxa Estruturada      |
| LBC   | Latossolo Bruno Câmbico    | TB    | Terra Bruna-Estruturada     |
| LBR   | Latossolo Bruno-Roxo       | TBR   | Terra Bruna-Roxa            |
| LE    | Latossolo Vermelho-Escuro  | TBV   | Terra Bruna Podzólica       |
| LR    | Latossolo Roxo             | V     | Vertissolo                  |
| LV    | Latossolo Vermelho-Amarelo |       |                             |

A nomenclatura é complementada com a simbologia de litologia, apresentada no quadro 2.

**Quadro 2.** Quadro de Simbologias Simplificadas Para Litologias (Davison Dias 2001)

| Sigla | Classificação        | Sigla | Classificação           |
|-------|----------------------|-------|-------------------------|
| a     | Arenito              | g     | Granito                 |
| ag    | Argilito             | gl    | Granulito               |
| an    | Andesito             | gn    | Gnaisse                 |
| ar    | Ardósia              | gd    | Granitóide              |
| b     | Basalto              | ma    | Mármore                 |
| br    | Brecha               | p     | Pelito                  |
| c     | Conglomerado         | q     | Quartzito               |
| ca    | Calcáreo             | r     | Riolito                 |
| cm    | Complexo Metamórfico | si    | Sienito                 |
| cr    | Carvão               | s     | Siltito                 |
| d     | Diorito              | sq    | Sedimentos Quaternários |
| da    | Dacito               | st    | Sedimentos Terciários   |
| f     | Folhelho             | x     | Xisto                   |

#### 4.2 Coleta de Amostras

A coleta de material de estudo foi feita com auxílio de moldes metálicos biselados, de dois tamanhos. Os moldes utilizados para corpos de

prova a serem ensaiados no equipamento de campo têm seção quadrada de 25,84cm<sup>2</sup> e 2cm de altura (Figura 6), enquanto aqueles destinados aos ensaios no laboratório dispõem da mesma altura, porém 103,22cm<sup>2</sup> de área.



**Figura 6.** Processo de moldagem, em campo, de corpo de prova a ser ensaiado. O molde metálico mede duas polegadas de lado e dois centímetros de altura.

A moldagem dos corpos de prova foi feita através da escarificação da encosta e cravação dos moldes de forma a não prejudicar a estrutura original do solo.

Cada corpo de prova foi pesado em balança com precisão de, no mínimo, um décimo de grama para determinação de massa específica do solo. Após a pesagem, o material que não foi destinado ao ensaio em campo foi envolto por filme plástico e então armazenado em caixas térmicas devidamente forradas com solo deformado de forma a evitar prejuízos à estrutura do solo em virtude do transporte. Além dos corpos de prova indeformados, coletou-se material desagregado para determinação de teor de umidade e pesquisas futuras de laboratório.

Procurou-se realizar as campanhas de campo após períodos de três dias sem registros de chuvas nas regiões pesquisadas. Cada campo aconteceu seguindo programação pré determinada, de forma que a logística envolvida na sequência dos pontos de estudos foi definida com apoio de imagens de satélite, modelos digitais de terreno, informações de estradas e drenagens, entre outros. A primeira providência em campo foi a moldagem de um corpo de prova para ensaio em campo, o que possibilitou a realização do cisalhamento paralelamente à moldagem dos corpos de prova para ensaios laboratoriais e registros fotográficos e de coordenadas geográficas.

## 5 RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios realizados durante esse trabalho encontram-se dispostos em tabelas separados pela litologia de origem. Cada tabela apresenta o nome atribuído ao ponto, a unidade geotécnica analisada (nomenclatura apresentada nos quadros Quadro 1 e Quadro 2, parâmetros de resistência ao cisalhamento: Coesão ( $c$ ) e Ângulo de Atrito ( $\Phi$ ), massa específica natural do solo ( $\gamma_n$ ), massa específica do solo seco ( $\gamma_d$ ), teor de umidade natural do solo ( $w$ ) e a cidade onde o solo foi coletado. Os parâmetros de cisalhamento direto foram obtidos em ensaios normatizados (convencional), ensaios de múltiplos estágios em equipamento com instrumentação computadorizada do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina (Múltiplos estágios -LMS), e em ensaios executados durante as campanhas de campo, no equipamento adaptado por esta pesquisa (Múltiplos estágios - Campo). Os resultados que apresentam boa relação entre o ensaio convencional e os ensaios em múltiplos estágios são apresentados em negrito. Os resultados dos parâmetros de resistência obtidos para solos provenientes de arenitos estão apresentados na Tabela 1.

Não foi possível comparar os resultados de ensaios em campo para solos residuais de arenito, uma vez que no primeiro campo, onde foi coletado o ponto 02, não coletou-se material para ensaios em laboratório. Os pontos 24, 25 e 32 foram coletados durante a fase de adaptações do equipamento de campo, motivo pelo qual não existem resultados de campo para estes pontos. O ponto 59, coletado na última campanha de campo, mostrou resultados semelhantes entre os parâmetros obtidos pela metodologia convencional e de múltiplos estágios executados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de solo residual de argilito. Efetuou-se ensaios em solos provenientes de argilito no primeiro campo, durante o período de adequações do equipamento de campo e após as modificações.

**Tabela 1.** Resultados para solos residuais de Arenito

| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos estágios - LMS |         | Múltiplos estágios - Campo |         | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W <sup>0</sup> % | Cidade     |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|------------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |                  |            |
| m02  | Ca      | -                      | -       | -                        | -       | 34,7                       | 30      | 1,76                            | 1,52                            | 16               | Gaspar     |
| m23  | Pva     | 5                      | 28,8    | -                        | -       | -                          | -       | 1,66                            | 1,3                             | 28               | Ituporanga |
| m24  | Ca      | 5,7                    | 26,3    | -                        | -       | -                          | -       | 1,60                            | 1,39                            | 15               | Ituporanga |
| m25  | PVa     | 16                     | 19,8    | -                        | -       | -                          | -       | 1,69                            | 1,23                            | 37               | Ituporanga |
| m32  | Ca      | 15,8                   | 29,7    | -                        | -       | -                          | -       | 1,54                            | 1,18                            | 31               | São José   |
| m59  | Ca      | 9,4                    | 33,3    | 13,8                     | 24,3    | -                          | -       | 1,78                            | 1,46                            | 22               | Ituporanga |

**Tabela 2.** Resultados para solos residuais de Argilito

| Nome        | Unidade     | Convencional           |             | Múltiplos Estágios - Lms |             | Múltiplos Estágios - Campo |             | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W <sup>0</sup> % | Cidade                    |
|-------------|-------------|------------------------|-------------|--------------------------|-------------|----------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|             |             | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°)     | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°)     | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°)     |                                 |                                 |                  |                           |
| m01         | Cag         | -                      | -           | -                        | -           | 83,4                       | 14,4        | 1,92                            | 1,47                            | 31               | Gaspar                    |
| m26         | Cag         | 14,8                   | 26,2        | -                        | -           | -                          | -           | 1,92                            | 1,59                            | 21               | Alfredo Wagner            |
| m27         | Cag         | 15,2                   | 27,6        | -                        | -           | -                          | -           | 1,8                             | 1,41                            | 28               | Alfredo Wagner            |
| m28         | Cag         | 17,3                   | 27,9        | -                        | -           | -                          | -           | 1,8                             | 1,59                            | 13               | Alfredo Wagner            |
| m29         | Cag         | 8,7                    | 33,7        | -                        | -           | -                          | -           | 1,79                            | 1,57                            | 14               | Alfredo Wagner            |
| m30         | Cag         | 7,3                    | 33,4        | -                        | -           | -                          | -           | 1,82                            | 1,52                            | 20               | Alfredo Wagner            |
| <b>m44</b>  | <b>Cag</b>  | <b>29,4</b>            | <b>24,1</b> | <b>23,3</b>              | <b>27,7</b> | <b>5,3</b>                 | <b>24,6</b> | <b>1,86</b>                     | <b>1,35</b>                     | <b>38</b>        | <b>Dona Emma</b>          |
| <b>m45</b>  | <b>PVag</b> | <b>10,6</b>            | <b>34,5</b> | <b>11,7</b>              | <b>34</b>   | <b>24,6</b>                | <b>29,6</b> | <b>1,99</b>                     | <b>1,74</b>                     | <b>14</b>        | <b>Presidente Getúlio</b> |
| <b>m46</b>  | <b>PVag</b> | <b>19,1</b>            | <b>26,7</b> | <b>5,6</b>               | <b>37,6</b> | <b>2,6</b>                 | <b>43,1</b> | <b>1,94</b>                     | <b>1,59</b>                     | <b>22</b>        | <b>José Boiteux</b>       |
| <b>m47</b>  | <b>Cag</b>  | <b>14</b>              | <b>40,6</b> | <b>11,5</b>              | <b>36,4</b> | <b>9,3</b>                 | <b>43</b>   | <b>1,89</b>                     | <b>1,61</b>                     | <b>17</b>        | <b>José Boiteux</b>       |
| <b>m48H</b> | <b>Cag</b>  | <b>18,2</b>            | <b>29,8</b> | <b>17</b>                | <b>29,9</b> | <b>7,4</b>                 | <b>34,4</b> | <b>1,66</b>                     | <b>1,23</b>                     | <b>35</b>        | <b>José Boiteux</b>       |
| <b>m48V</b> | <b>Cag</b>  | <b>4</b>               | <b>35,7</b> | <b>4,3</b>               | <b>33</b>   | <b>29,3</b>                | <b>32,2</b> | <b>1,66</b>                     | <b>1,23</b>                     | <b>35</b>        | <b>José Boiteux</b>       |
| <b>m50</b>  | <b>Cag</b>  | <b>64</b>              | <b>25,6</b> | <b>59,7</b>              | <b>27</b>   | <b>-1,5*</b>               | <b>36,9</b> | <b>1,85</b>                     | <b>1,42</b>                     | <b>30</b>        | <b>Rodeio</b>             |
| m60         | Cag         | 2,5                    | 34,3        | 6,3                      | 24,8        | -                          | -           | 1,82                            | 1,4                             | 30               | Alfredo Wagner            |

\*Valores negativos para coesão são fisicamente incoerentes, e claramente representam um erro no ensaio.

Os parâmetros obtidos no primeiro campo não foram coerentes, e apresentaram valores de resistência super estimados para coesão. Resultados como o apresentado no primeiro ponto de estudos motivaram as modificações realizadas no equipamento de campo. As mudanças efetuadas permitiram a execução de ensaios de múltiplos estágios em campo, e comparar os parâmetros obtidos com ensaios realizados em laboratório sob

os métodos convencionais e de múltiplos estágios. Os resultados obtidos após as modificações do equipamento de ensaios em campo, apresentaram-se semelhantes àqueles de ensaios de laboratório e coerentes com o esperado para esse tipo de solo. Incoerências como as encontradas no ponto 50 podem ser atribuídas aos planos presentes nos solos residuais de argilito.



Os solos provenientes da decomposição por intemperismo dos depósitos de encosta foram estudados em três pontos durante os trabalhos de

campo realizados. Os resultados dos parâmetros encontrados para esse tipo de solo encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3.** Resultados para solos de depósito de encosta

| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos Estágios - LMS |         | Múltiplos Estágios - Campo |         | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W <sup>0</sup> % | Cidade     |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|------------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |                  |            |
| m52  | Cde     | 9,2                    | 33      | 10,8                     | 31,7    | 22,5                       | 33,2    | 1,68                            | 1,26                            | 33,33            | Rodeio     |
| m55  | Cde     | 11,6                   | 27,7    | 11,1                     | 28,7    | 16,2                       | 30,2    | 1,74                            | 1,32                            | 31,82            | Blumenau   |
| m58  | Cde     | -1,9                   | 36,3    | 1,2                      | 31,5    | -                          | -       | 1,84                            | 1,4                             | 31,43            | Ituporanga |

Os parâmetros de resistência obtidos para Cambissolo de Depósito de Encosta apresentaram ângulo de atrito entre partículas bastante próximos de 30 graus. A parcela da resistência ao cisalhamento atribuída à coesão, no ponto 52, apresentou elevada variação entre os ensaios de laboratório e de campo. A diferença, neste caso, pode ser atribuída a variações do tamanho do corpo de prova. Para o ponto 55 os resultados de laboratório e de campo mostraram-se semelhantes,

tanto pelo método convencional como segundo o protocolo de múltiplos estágios. Os parâmetros obtidos no ponto 58 apresentaram-se semelhantes, porém a coesão encontra-se incoerente segundo o ensaio convencional.

Solos residuais de folhelho foram estudados em dois pontos durante este trabalho. Os resultados obtidos para os pontos 03 e 54, nas cidades de Gaspar e Blumenau, respectivamente, estão representados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Resultados para solos residuais de folhelho

| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos Estágios - LMS |         | Múltiplos Estágios - Campo |         | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W <sup>0</sup> % | Cidade   |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|----------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |                  |          |
| m03  | Cf      | -                      | -       | -                        | -       | 134,6                      | 16,2    | 1,98                            | 1,63                            | 21,47            | Gaspar   |
| m54  | Cf      | 6,5                    | 38,2    | 7,8                      | 32      | 1,3                        | 31,2    | 1,93                            | 1,71                            | 12,87            | Blumenau |

O ponto 03, estudado na primeira campanha de campo, apresentou resultado incoerente quanto a parcela de resistência atribuída à coesão. O ponto 54, por outro lado, foi estudado em

campo após a última modificação do equipamento de cisalhamento direto e apresentou resultados semelhantes àqueles obtidos nos ensaios de laboratório.

Tabela 5 apresenta os resultados referentes aos solos residuais de granito. Foram realizados ensaios em treze pontos, em cinco cidades, cuja litologia associada ao solo era granítica.

**Tabela 5.** Resultados para solo residual de granito

| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos Estágios - LMS |         | Múltiplos Estágios - Campo |         | $\gamma^n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma^d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W <sub>90</sub> | Cidade             |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------|--------------------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |                 |                    |
| m06  | Pvg     | -                      | -       | -                        | -       | -22,1*                     | 26,2    | 1,48                            | 1,07                            | 38,32           | Gaspar             |
| m10  | PVg     | -                      | -       | -                        | -       | 39,2                       | 21,7    | 1,5                             | 1,39                            | 7,91            | Palhoça            |
| m19  | Cg      | -                      | -       | -                        | -       | 99,9                       | 13,3    | 1,85                            | 1,5                             | 23,33           | Camboriú           |
| m20  | PVg     | 26,1                   | 28,2    | -                        | -       | 36                         | 20,2    | 1,72                            | -                               | -               | Camboriú           |
| m21  | PVg     | -                      | -       | -10,2*                   | 29,3    | 10,9                       | 34,2    | 1,63                            | 1,47                            | 10,88           | Balneário Camboriú |
| m31  | Cg      | 8,2                    | 28,7    | -                        | -       | -                          | -       | 1,74                            | 1,35                            | 28,89           | São José           |
| m33  | PVg     | 2,1                    | 36,7    | -                        | -       | -                          | -       | 1,81                            | 1,48                            | 22,30           | Balneário Camboriú |
| m35  | PVg     | 4                      | 34,7    | -                        | -       | -                          | -       | 1,92                            | 1,52                            | 26,32           | Balneário Camboriú |
| m36  | PVg     | 6,3                    | 31,8    | -                        | -       | -                          | -       | 1,74                            | 1,32                            | 31,82           | Balneário Camboriú |
| m38  | PVg     | 11,1                   | 27,5    | -                        | -       | -                          | -       | 1,61                            | 1,28                            | 25,78           | Camboriú           |
| m39  | Cg      | 6,1                    | 33,8    | -                        | -       | -                          | -       | 1,93                            | 1,59                            | 21,38           | Camboriú           |
| m41  | PVg     | 5                      | 33,6    | -                        | -       | -                          | -       | 1,8                             | 1,54                            | 16,88           | Camboriú           |
| m42  | Cg      | 9,1                    | 25,6    | -                        | -       | -                          | -       | 1,77                            | -                               | -               | Camboriú           |

\*Valores negativos para coesão são fisicamente incoerentes, e claramente representam um erro no ensaio.

Dos resultados obtidos nos primeiros campos, o ponto 10 apresentou resultado condizente com dados de literatura como Santos (1997). Os pontos 6 e 19, por outro lado, apresentaram resultados incoerentes e, novamente, justificaram as adequações realizadas posteriormente. O resultado obtido para o ponto m20 mostrou-se semelhante aos resultados encontrados por outros autores e com alguma semelhança entre os parâmetros de campo e de laboratório. O ensaio de múltiplos estágios realizado no laboratório, para o ponto 21, obteve um resultado incoerente para a parcela de resistência relativa à coesão.

Os pontos 31 a 42 foram estudados durante o período de adaptações do equipamento de campo e não apresentam resultados comparativos. Os dados obtidos condizem com os resultados de Meirelles & Davison Dias (2004).

Solos residuais de gnaiss estudados por este trabalho têm seus resultados apresentados na Tabela 6.

Da mesma forma como para as demais litologias, os ensaios realizados nos primeiros campos não apresentam dados de ensaios comparativos, salvo o ponto 12 cujo resultado mostrou-se bastante semelhante na comparação entre o método convencional e de múltiplos estágios. Apesar do resultado comparativo do ponto 12, o ponto 7 apresentou coesão incoerente.

Os resultados obtidos após as modificações do equipamento de campo mostraram-se semelhantes na comparação entre os ensaios convencionais e de múltiplos estágios, e são condizentes com os dados obtidos por Godoi (2014).

O único ponto estudado e classificado como solo residual de siltito ocorreu na cidade de Blumenau e seu resultado está apresentado, no padrão das outras litologias, na Tabela 7.

**Tabela 6.** Resultado para solos residuais de gnaiss

| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos Estágios - Lms |         | Múltiplos Estágios - Campo |         | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W%    | Cidade     |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|-------|------------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |       |            |
| m04  | PVgn    | -                      | -       | -                        | -       | 11,4                       | 24      | 1,57                            | 1,27                            | 23,62 | Gaspar     |
| m05  | Cgn     | -                      | -       | -                        | -       | 23,6                       | 15,9    | 1,4                             | 1,01                            | 38,61 | Gaspar     |
| m07  | PVgn    | -                      | -       | -                        | -       | 85,6                       | 11,6    | 1,83                            | 1,44                            | 27,08 | Ilhota     |
| m08  | PVgn    | -                      | -       | -                        | -       | 32,5                       | 20,6    | 1,57                            | 1,3                             | 20,77 | Ilhota     |
| m09  | Cgn     | -                      | -       | -                        | -       | 13,9                       | 21,9    | 1,53                            | 1,08                            | 41,67 | Luiz Alves |
| m12  | Cgn     | 7,3                    | 30,7    | -                        | -       | 13,4                       | 28,4    | 1,87                            | 1,67                            | 11,98 | Palhoça    |
| m13  | PVgn    | -                      | -       | -                        | -       | 15,3                       | 18,1    | 1,39                            | 1,11                            | 25,23 | Palhoça    |
| m49  | Cgn     | 5,6                    | 31,5    | 6,6                      | 29,6    | 15,3                       | 35,8    | 1,75                            | 1,37                            | 27,74 | Rodeio     |
| m51  | PLVgn   | 2,4                    | 33,3    | 6,2                      | 29      | 4,5                        | 30,3    | 1,57                            | 1,36                            | 15,44 | Rodeio     |
| m56  | PLVgn   | 11,7                   | 31,4    | 12                       | 26,5    | 12,6                       | 31,4    | 1,84                            | 1,46                            | 26,03 | Blumenau   |
| m57  | PVgn    | 3,8                    | 30,4    | 4,9                      | 28,7    | 6,3                        | 33,3    | 1,29                            | 1,04                            | 24,04 | Blumenau   |

**Tabela 7.** Resultado para solos residuais de siltito

| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos Estágios - LMS |         | Múltiplos Estágios - Campo |         | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W%   | Cidade   |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|------|----------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |      |          |
| m53  | Cs      | 20,6                   | 35,3    | 14,3                     | 37      | 8,6                        | 28,4    | 1,84                            | 1,72                            | 6,98 | Blumenau |

A comparação entre os resultados mostra que existe alguma diferença entre os parâmetros obtidos, porém não se apresenta como limitante

ao uso da técnica de múltiplos estágios para mapeamento geotécnico.

Os ensaios em solo residual de xisto têm seus resultados apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8.** Resultado para solos residuais de xisto

| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos Estágios - LMS |         | Múltiplos Estágios - Campo |         | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W%    | Cidade             |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|-------|--------------------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |       |                    |
| m15  | Cx      | -                      | -       | -18*                     | 29,3    | -16,3*                     | 17,1    | 1,92                            | 1,55                            | 23,87 | Balneário Camboriú |
| m16  | PVx     | 19,2                   | 28,1    | -                        | -       | 47,8                       | 16,7    | 1,67                            | 1,36                            | 22,79 | Camboriú           |
| m17  | PVx     | -                      | -       | 4,8                      | 24,5    | 27,2                       | 20,5    | 1,68                            | 1,4                             | 20,00 | Balneário Camboriú |
| m18  | Cx      | 3,4                    | 35,3    | -                        | -       | 104,2                      | 13,2    | 1,85                            | 1,51                            | 22,52 | Camboriú           |
| m40  | PVx     | 6                      | 37,7    | -                        | -       | -                          | -       | 1,72                            | 1,36                            | 26,47 | Camboriú           |

\*Valores negativos para coesão são fisicamente incoerentes, e claramente representam um erro no ensaio.

Como a xistosidade da rocha é herdada pelo solo residual, as descontinuidades presentes no xisto podem causar maior dispersão entre os resultados comparativos. Não esperam-se, porém, resultados como os obtidos nos pontos 15 e 18 que tratam-se de incoerências que motivaram as modificações realizadas posteriormente.

Da mesma forma como para os solos de siltito, os solos residuais de diabásio, riolito, e solo do tipo terra vermelha bruna que foram estudados por apenas um ponto, encontram-se apresentados no mesmo padrão das demais litologias, nas tabelas Tabela 9, Tabela 10, e Tabela 11. O resultado obtido para o solo residual de diabásio não apresenta comparativo.

**Tabela 9.** Resultados para solo residual de diabásio

| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos Estágios - LMS |         | Múltiplos Estágios - Campo |         | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W%   | Cidade  |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|------|---------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |      |         |
| m14  | PVdb    | -                      | -       | -                        | -       | 57                         | 19,2    | 1,6                             | 1,56                            | 2,56 | Palhoça |

**Tabela 10.** Resultados para solo residual de Riolito

| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos Estágios - LMS |         | Múltiplos Estágios - Campo |         | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W%    | Cidade  |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|-------|---------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |       |         |
| m11  | PVr     | 12,9                   | 33,9    | -                        | -       | 11,3                       | 30,6    | 1,91                            | 1,54                            | 24,03 | Palhoça |

Os parâmetros obtidos por múltiplos estágios em campo, e pelo método convencional no laboratório são bastante semelhantes para o solo residual de Riolito.

**Tabela 11.** Resultado para Terra Vermelha Bruna

| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos Estágios - LMS |         | Múltiplos Estágios - Campo |         | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W%    | Cidade       |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|-------|--------------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |       |              |
| m43  | TVB     | 6,1                    | 28,2    | 4,3                      | 29,8    | 16,8                       | 28,7    | 1,66                            | 1,36                            | 22,06 | José Boiteux |

A resistência ao cisalhamento obtida para Terra Vermelha Bruna na cidade de José Boiteux apresentou resultados bastante semelhantes comparando-se os resultados de Múltiplos estágios e convencional. O resultado obtido em campo apresentou coesão relativamente maior, o que pode

ser fruto da diferença no tamanho dos corpos de prova ensaiados em campo e em laboratório.

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para resistência ao cisalhamento de solos residuais de migmatito.



**Tabela 12.** Resultado para solo residual de Migmatito

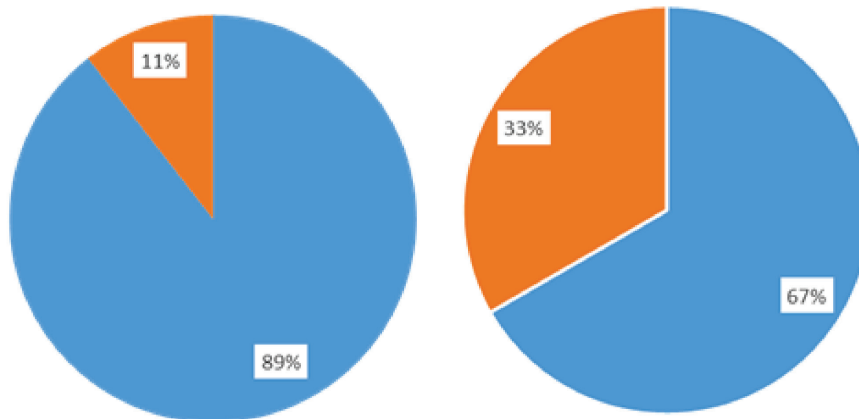
| Nome | Unidade | Convencional           |         | Múltiplos Estágios - LMS |         | Múltiplos Estágios - Campo |         | $\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | W <sup>0</sup> % | Cidade             |
|------|---------|------------------------|---------|--------------------------|---------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------|
|      |         | c (kN/m <sup>2</sup> ) | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )   | Phi (°) | c (kN/m <sup>2</sup> )     | Phi (°) |                                 |                                 |                  |                    |
| m22  | PVmg    | -                      | -       | -                        | -       | 5,7                        | -3,8*   | 1,85                            | 1,76                            | 5,11             | Balneário Camboriú |
| m34  | PVmg    | 11,4                   | 31,5    | -                        | -       | -                          | -       | 1,66                            | 1,3                             | 27,69            | Balneário Camboriú |

\*Valores negativos para ângulo de atrito são fisicamente incoerentes, e claramente representam um erro no ensaio.

Os resultados de ensaio em solos residuais de migmatito não apresentam dados comparativos, porém é evidente que o resultado de ângulo de atrito no ponto 22 é incoerente .

Do total de ensaios realizados em comparativo, julgou-se 18 como resultados adequados.

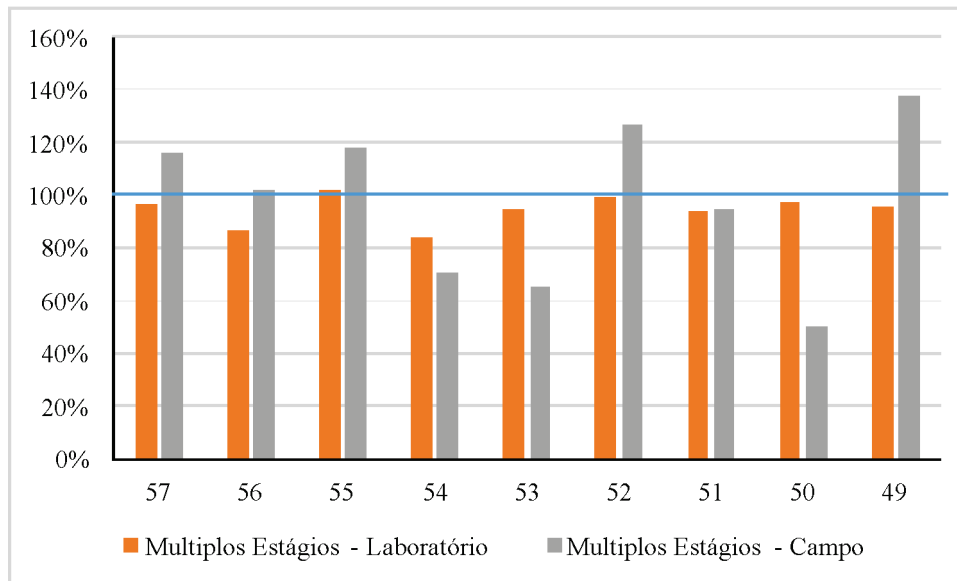
Os resultados obtidos após todas as modificações somaram 19 comparativos, dos quais, 17 atingiram resultados considerados adequados. Os gráficos da Figura 7 evidenciam a mudança de 66,67% para 89,47% dos resultados adequados.



**Figura 7.** Gráficos ilustrativos dos resultados considerados adequados (azul)

Como a envoltória de Mohr-Coulomb pode ser entendida como o limite dos estados de tensões possíveis antes da ruptura da encosta, ou seja, a iminência de ruptura, pode-se entender que qualquer ponto sob a envoltória representa um estado de tensões em que o solo encontra-se estável. Para possibilitar uma quantificação dos desvios ocorridos em função da forma de

execução dos ensaios, calculou-se as “áreas” sob as envoltórias. A Figura 8 apresenta a comparação das áreas sob as envoltórias, o valor de área sob a envoltória obtida pela metodologia convencional, em laboratório, foi tomada como padrão em cada ponto, a partir das quais estabeleceu-se comparações percentuais.



**Figura 8.** Comparação Entre Áreas Sob Envoltórias De Ruptura. A linha destacada (azul) mostra o valor de 100%, atribuído ao resultado de ensaio convencional de laboratório.

A análise das “áreas” sob as envoltórias de ruptura dos pontos mostra que apenas os para o ponto 55 ocorreu de os resultados de múltiplos estágios de campo e de laboratório representarem estados de tensões “estáveis” mais elevados do que os resultados convencionais de laboratório. O resultado apresentado é concordante ao que foi pesquisado por Izzo (2003), no sentido de que esperam-se resultados de menor resistência para ensaios de múltiplos estágios, ou seja, apresentam-se a favor da segurança.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos possibilitaram concluir que as modificações foram positivas uma vez que os resultados adequaram-se aos obtidos em contra provas de laboratório e a resultados de outros autores como Parizoto (2014), Raimundo (1998), Beviláqua (2004), Santos (1997), Meirelles & Davison Dias (2004), Bastos (1991), Davison Dias (1987), Higashi (2006) e Godoi (2014).

A análise das “áreas sob as envoltórias” que representam os estados de tensões para encontrar estáveis com os determinados parâmetros de resistência mostraram-se de acordo com o pesquisado por Izzo (2003), de que esperam-se resultados

com parâmetros de resistência mais conservadores em ensaios realizados em Múltiplos estágios.

Os resultados obtidos permitem concluir que o protocolo de ensaios de campo é exequível e as comparações apresentadas mostram que eventuais imprecisões são de magnitude tal que não influem decisivamente para o resultado final do mapeamento.

Com base nos preceitos de Zuquette & Gandolfi (1992) que dizem que mapeamento geotécnico não substitui os estudos pontuais, mas devem servir para indicar sua necessidade, é possível concluir a partir do resultados apresentados que o protocolo de ensaios rápidos, com priorização do tempo para obtenção de parâmetros de resistência não prejudica o resultado final do mapeamento.

Fundamentado por Antoniutti Neto & Vilar (1990) que defendem a técnica de múltiplos estágios por economizar tempo, conclui-se que o protocolo investigado beneficia o mapeamento geotécnico por atribuir maior representatividade dos parâmetros utilizados para as estimativas de susceptibilidade aos deslizamentos.

As envoltórias obtidas nos ensaios mostraram-se potencialmente próximas, principalmente para Múltiplos estágios e convencional de laboratório, havendo algumas discrepâncias ao

comparar resultados do equipamento de laboratório para o equipamento de campo. Como a área do corpo de prova de campo é de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  daquela utilizada em laboratório podem estar atreladas a esta característica, conforme Lo (1970).

## REFERÊNCIAS

- Antoniutti Neto, Luis, and Orenco Monje Vilar. 1990. "Aspectos Da Resistencia Ao Cisalhamento de Misturas de Solo Laterítico - Brita." 6º CBGE.
- ASTM D3080. 2003. *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. Vol. 4. West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- Bastos, C. A. B. 1991. "Mapeamento E Caracterização Geomecânica Das Unidades Geotécnicas de Solos Oriundos Dos Granitos, Gnaisses E Migmatitos de Porto Alegre." Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Beviláqua, F. Z. 2004. "Estudo Do Comportamento Geomecânico Dos Solos Residuais de Granito de Florianópolis." Universidade Federal de Santa Catarina.
- Davison Dias, Regina. 1987. "Aplicação de Pedologia E Geotecnia No Projeto de Fundações de Linhas de Transmissão." Universidade Federal do Rio de Janeiro. [http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/doc\\_download/509-regina-davison-dias-doutorado?Itemid=](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/doc_download/509-regina-davison-dias-doutorado?Itemid=).
- — —. 1995. "Proposta de Metodologia de Definição de Carta Geotécnica Básica Em Regiões Tropicais E Subtropicais." *Revista Do Instituto Geológico* 16 (special): 51-55. doi:10.5935/0100-929X.19950011.
- — —. 2001. "Proposta de Uma Metodologia de Estudos Geotécnicos Para Implantação de Rodovias, Estradas Rurais E Vicinais Em Solos Brasileiros." *Reunião Anual de Pavimentação*. Florianópolis.
- Godoi, Cesar Schmidt. 2014. "Caracterização Geomecânica De Um Solo Residual De Gnaisse - Santo Amaro Da Imperatriz, Santa Catarina." Universidade Federal de Santa Catarina.
- Higashi, Rafael Reis. 2002. "Utilização de Um SIG No Desenvolvimento de Um Banco de Dados Geotécnicos Do Norte Do Estado Do Rio Grande Do Sul." Universidade Federal de Santa Catarina. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/84205>.
- Higashi, Rafael Reis. 2006. "Metodologia de Uso E Ocupação Dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG Com Base No Comportamento Geotécnico E Ambiental." Universidade Federal de Santa Catarina. <http://www.tede.ufsc.br/teses/PECV0428.pdf>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2010. "Censo Demográfico 2010." www.ibge.gov.br.
- Izzo, Ronaldo Luis Dos Santos. 2003. "Influência Da Contaminação Por Cloreto De Cobre Na Resistência De Um Solo Arenoso Compactado." UNESP. <http://repositorio.unesp.br/handle/11449/90818>.
- Lambe, William T., and Robert T. Whitman. 1969. *Soil Mechanics*. Edited by John Wiley & Sons. New York: Massachusetts Institute of Technology.
- Lo, K Y. 1970. "The Operational Strength of Fissured Clays." *Geotechnique* 20 (1). Thomas Telford: 57-74.
- Meirelles, M. C., and R. Davison Dias. 2004. "Estudo Da Erodibilidade de Solos Residuais Do Complexo Granito-Gnaissico - Município de Santo Amaro Da Imperatriz, SC." *5º Simpósio Brasileiro De Solos Não Saturados* 1: 465-70.
- Parizoto, Daniel Galvão Veronez. 2014. "Contribuição Dos Diferentes Fatores Aos Processos de Deslizamento E a Influência Antrópica No Nível de Danos Do Desastre de 2008: O Caso Do Complexo Do Morro Do Baú - Ilhota/SC." Universidade Federal de Santa Catarina.
- Raimundo, Huri Alexandre. 1998. "Aspectos Geotécnicos E Pluviométricos Associados a Instabilidade de Encostas Em Florianópolis-SC." UFSC.

Santos, Glaci Inez Trevisan. 1997. "Integração de Informações Pedológicas, Geológicas E Geotécnicas Aplicadas Ao Uso Do Solo Urbano Em Obras de Engenharia." UFRGS. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/111802>.

Xavier, Sinval Cantarelli. 2004. "O Solo Criado No Urbanismo E No Direito Urbanístico Brasileiro." Universidade Federal de Pelotas.

Zuquette, L. V. 1987. "Análise Crítica Da Cartografia Geotécnica E Proposta Metodológica Para Condições Brasileiras." *São Carlos* 3.

Zuquette, Lázaro Valentim, and Nilson Gandolfi. 1992. "Algumas Reflexões Sobre O Mapeamento Geotécnico." *Anuário Do Instituto de Geociências*.



# RELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE ROCHAS SILICATADAS BRASILEIRAS

RELATIONSHIP BETWEEN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BRAZILIAN SILICATE ROCKS

FÁBIO CONRADO DE QUEIRÓZ

Autônomo

E-mail: fconrado5358@gmail.com

EDUARDO BRANDAU QUITETE

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A – IPT,  
São Paulo, SP, Brasil. E-mail: quitete@ipt.br

LÚCIA SILVEIRA DOZZI

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A – IPT, São Paulo, SP, Brasil  
E-mail: ludozzi@ipt.br

ELY BORGES FRAZÃO

In Memoriam

## RESUMO ABSTRACT

Mais de quatro centenas de amostras de rochas silicatadas usadas como revestimento de edificações no Brasil foram caracterizadas por meio de ensaios físicos e mecânicos, tendo por base as normas da ABNT. Predominaram gnaiesses (38%) e granitos (33%). As demais rochas eram de composição intermediária e básica. O objetivo do trabalho foi encontrar relações estatísticas entre diferentes ensaios, particularmente entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Os valores das propriedades obtidos de ensaios foram porosidade aparente ( $\eta$ ), resistência à compressão simples ( $\sigma_c$ ), velocidade de onda longitudinal ( $V_p$ ) e módulo de elasticidade estático ( $E_e$ ). Valores de módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dc}$ ) foram determinados por cálculos, a partir dos valores de velocidade de propagação e densidade. De forma semelhante o módulo de elasticidade estático ( $E_{ec}$ ) foi calculado a partir de valores de resistência à compressão, obtidos a partir de ensaios. Para o cálculo do módulo de elasticidade estático ( $E_{ec}$ ), obteve-se o valor de um coeficiente de proporcionalidade ( $k$ ) associado ao valor da tensão de compressão ( $\sigma_c$ ) obtido em ensaios e ao valor do módulo de elasticidade ( $E_e$ ) também obtido de ensaio:  $E_{ec} = k \cdot \sqrt{\sigma_c}$ , onde  $k=120,81$ . O tratamento estatístico revelou que as correlações entre estas e outras propriedades variaram de medianas a baixas.

**Palavras-chave:** rochas; propriedades; ensaios; correlação; módulo de elasticidade.

More than four hundred silicatic rock samples used in Brazil for cladding were characterized by means of physical and mechanic tests based on Brazilian (ABNT) standards. The most common type of rock samples were gneiss (38%) and granite (33%). The others were intermediary to basic rocks. The aim of this work was to find statistic relations between different tests, especially compressive strength and modulus of elasticity. The determined properties were apparent porosity ( $\eta$ ), uniaxial compressive strength ( $\sigma_c$ ), longitudinal ultrasonic pulse velocity ( $V_p$ ) and static modulus of elasticity ( $E_e$ ). The dynamics moduli were calculated from the pulse velocity and density values and so a proposed calculated static modulus of elasticity ( $E_{ec}$ ) from the uniaxial compressive strength. A proportion coefficient ( $k$ ) was determined to allow the determination of the calculated static modulus of elasticity. The coefficient was obtained from the compressive strength ( $\sigma_c$ ) and static modulus of elasticity ( $E_e$ ) values from the tests:  $E_{ec} = k \cdot \sqrt{\sigma_c}$ , where  $k=120.81$ . The statistic treatment showed that the correlation between these and the other properties ranged from medium to weak.

**Keywords:** rocks; properties; tests; correlation; modulus of elasticity

## 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades de rochas é importante tanto do ponto de vista do saber, quanto da sua utilidade para diferentes tipos de utilização, sejam como materiais de construção sejam como elementos de maciços rochosos, nos seus aspectos físicos e mecânicos.

Este artigo apresenta a compilação de algumas informações disponíveis no antigo Laboratório de Tecnologia de Rochas, que hoje faz parte do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), do Instituto de Pesquisas Tecnológica – IPT de São Paulo, sobre características tecnológicas das rochas, que já tinham sido objeto de tratamento estatístico descritivo, conforme Frazão *et. al.* (2013) e Frazão & Farjallat (1995, 1996).

O enfoque escolhido foi o de apresentar as principais propriedades consideradas relevantes para a descrição litológica de maciços, verificar a relação entre seus valores por meios estatísticos, apresentar os graus de correlação obtidos e expressar os resultados em tabelas e gráficos.

Os valores encontrados neste estudo podem ser úteis para avaliação das características litológicas e petrográficas de maciços rochosos na fase da investigação geológico-geotécnica, particularmente para os setores mais homogêneos do maciço rochoso, que se caracterizam como litotipos, além de poder indicar sua qualidade como material de construção. Considerando que várias etapas são seguidas nessa avaliação dos maciços, uma antevisão de seu comportamento pode ser obtida por meio de estimativa ao se utilizar equações de correlação estatísticas desenvolvidas em diversos estudos em tecnologia e mecânica das rochas.

Procurou-se aplicar índices de correlação que pudessem estimar a relação entre as propriedades, além de estimar resultados de propriedades não obtidas por ensaios a partir daquelas determinadas em laboratório. Embora as propriedades das rochas não guardem graus de correlação elevados, é possível tentar relações que permitam avaliar possíveis interdependências entre elas.

Neste aspecto algumas propriedades foram escolhidas para alcançar-se o intento, quais sejam: porosidade aparente ( $\eta$ ), capacidade de absorção d'água ( $\alpha$ ), resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ),

módulo de elasticidade estático tangente ( $E_e$ ), velocidade de propagação de ondas longitudinais ( $V_p$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras estudadas neste trabalho compõem um acervo de ensaios realizados no IPT em um período de 20 anos (entre 1992 e 2012). Este universo, com 412 amostras, foi tratado por Frazão *et. al.* (2013) e se constitui predominantemente de gnaisses (38 %) e granitos (33 %), distribuídos por quase todo território brasileiro. Dentre as demais rochas incluem-se sienitos, charnockitos, granodioritos (cada um contribuindo com cerca de 4 % das amostras), nefelina sienitos (2 %), monzonitos e gabros.

As propriedades selecionadas para este trabalho foram: porosidade aparente ( $\eta$ ), absorção d'água ( $\alpha$ ), resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ), módulo de elasticidade estático tangente ( $E_e$ ), velocidade de propagação de ondas longitudinais ( $V_p$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Todos os valores utilizados foram obtidos no banco de dados de ensaios em rocha do LMCC do IPT. Procurou-se relacionar a porosidade aparente com as demais propriedades escolhidas, por ser uma propriedade intrínseca e ser a que mais influi nas demais. Fizeram-se também relações cruzadas entre as outras propriedades.

Foram utilizadas a estatística descritiva e a análise de regressão das propriedades para se conseguir as equações de regressão, coeficientes de determinação, média aritmética, desvio padrão, coeficiente de variação e os valores mínimos e máximos para cada propriedade.

Quanto à aplicação de índices para estimar o valor de uma propriedade, ainda desconhecida, a partir de outra conhecida por ensaio, adotou-se estimar o módulo de elasticidade estático a partir de valores conhecidos de compressão uniaxial determinados em ensaios. Para tanto se utilizou uma equação simplificada, qual seja:

$$E_e = k\sqrt{\sigma_c} \quad (1)$$

Onde:

$E_e$  = módulo de elasticidade estático tangente em GPa

$k$  = constante, cujo valor será definido neste trabalho

$\sigma_c$  = resistência à compressão uniaxial em GPa

Da mesma forma procurou-se, neste trabalho, calcular os valores de módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) em Pa, a partir dos valores de massa específica aparente ( $\rho$ ) em  $\text{kg/m}^3$ , da velocidade de propagação de ondas longitudinais ( $V_p$ ) em m/s e coeficiente de Poisson ( $n$ ), conforme a equação abaixo, apresentada, entre outros, por Siegesmund & Dürrast (2011):

$$E_d = \rho \frac{V_p^2(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (2)$$

Onde:

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico em Pa

$\rho$  = massa específica aparente em  $\text{Kg/m}^3$

$n$  = coeficiente de Poisson (adimensional)

Adotando-se um valor fixo para o coeficiente de Poisson,  $n = 0,30$ , obtém-se:

$$E_d = \rho \frac{26V_p^2}{35} \quad (3)$$

### 3 DESCRIÇÃO DAS PROPRIEDADES ESTUDADAS

Descrevem-se a seguir as propriedades estudadas e suas significâncias: porosidade e absorção de água, resistência à compressão uniaxial, velocidade de propagação de ondas longitudinais e módulos de elasticidade estático e dinâmico. Como as propriedades foram determinadas em um longo período, as normas pertinentes passaram por melhorias e assim, receberam numerações e versões distintas. Por isso não serão citadas as normas de referência para os ensaios.

#### 3.1 Porosidade aparente e absorção de água

A porosidade aparente e a absorção de água foram determinadas através da determinação do peso seco em estufa, do peso saturado em água

e do peso submerso de, pelo menos 10 corpos de prova por amostra. A porosidade aparente é a mais importante propriedade intrínseca das rochas, por influenciar em maior ou menor grau as propriedades físicas e mecânicas. É de relativamente fácil determinação. A porosidade aparente tem sido utilizada por ser a de maior correspondência com as propriedades mencionadas acima e influenciar a capacidade de absorção de água. Esta, por sua vez, facilita o enfraquecimento das rochas. No método de determinação utilizado as duas propriedades são calculadas a partir dos mesmos dados (peso seco, peso saturado com água e peso submerso na água), de modo que são diretamente proporcionais. Assim, a realização de estudo estatístico entre as duas propriedades não se aplica a este trabalho.

#### 3.2 Resistência à compressão uniaxial

A determinação da resistência à compressão é de relativamente fácil execução, e de baixo custo, e apresenta valores confiáveis desde que sejam rigorosamente obedecidos os critérios de geometria, acabamento, volume e taxa de carregamento, descritos nas normas vigentes, de modo a diminuir as possíveis dispersões. É, em certo grau, influenciada também pela porosidade aparente e o teor de água absorvida. Os resultados utilizados neste trabalho foram obtidos em corpos de prova de formato cúbico, com aresta de 75 mm. Para cada amostra considerou-se o resultado médio de, pelo menos, 5 corpos de prova.

#### 3.3 Velocidade de propagação de onda ultrassônica longitudinal

A velocidade de propagação de onda ultrassônica longitudinal é de relativamente fácil determinação, com os equipamentos disponíveis atualmente, e de baixo custo. Foi determinada em corpos de prova com faces planas e lisas e paralelas utilizando-se um aparelho que mede o tempo de propagação de pulso ultrassônico e um paquímetro para medir a distância percorrida pelo pulso. Assim como a resistência à compressão, também é influenciada pela porosidade, e conseqüente grau de absorção de água. Depende

também da composição mineralógica das rochas, uma vez que diferentes minerais apresentam diferentes velocidades de propagação de onda. Em geral, quanto mais denso o material, maior a velocidade de propagação. E, finalmente, quanto maior for a resistência mecânica maior será a coesão e maior será a velocidade de propagação de ondas. Para cada amostra considerou-se o resultado médio de, pelo menos, 5 corpos de prova.

### 3.4 Módulos de elasticidade estático e dinâmico

O módulo de elasticidade estático, ou módulo de Young, pode ser obtido por meio da mesma técnica usada para a determinação da resistência à compressão uniaxial, desde que sejam obedecidas as mesmas exigências para a determinação desta. Nesse ensaio, porém, mede-se a deformação axial em corpos-de-prova cilíndricos, ou retangulares, com dispositivos especiais. As deformações são mensuradas concomitantemente ao carregamento axial. É um ensaio de relativamente complexa determinação e interpretação, além de ser um

ensaio relativamente demorado e de relativamente alto custo. Os resultados utilizados neste trabalho foram obtidos em corpos de prova prismáticos de base quadrada, com altura entre 2,0 e 2,5 vezes a aresta da base. Para cada amostra considerou-se o resultado médio de, pelo menos, 5 corpos de prova.

O módulo de elasticidade dinâmico, por sua vez, pode ser obtido por meio da velocidade de propagação de onda longitudinal, convenientemente conjugada com a densidade e coeficiente de Poisson.

Os módulos de elasticidade, tanto estático como dinâmico, são úteis para o dimensionamento de elementos estruturais de edificações e também para avaliar as coesão e resistência de maciços ante as sollicitações físicas e mecânicas impostas por uma obra civil.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva das propriedades físicas e mecânicas abrangidas neste estudo estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Estatística descritiva das variáveis consideradas

| Variáveis   | Média | Desvio padrão | Coefficiente de variação (%) | Mínimo | Máximo | n   |
|---|-------|---------------|------------------------------|--------|--------|-----|
| Porosidade aparente, $\eta$ (%)                       | 0,62  | 0,32          | 52                           | 0,03   | 2,43   | 404 |
| Compressão uniaxial, $\sigma_c$ (MPa)                 | 145,1 | 32,0          | 22                           | 52,00  | 236,3  | 320 |
| Velocidade de propagação de ondas, $V_p$ (m/s)        | 4.856 | 708           | 15                           | 2.140  | 6.620  | 284 |
| Módulo de elasticidade estático tangente, $E_e$ (GPa) | 46,3  | 10,0          | 22                           | 28,3   | 73,5   | 57  |

Percebe-se pela Tabela 1 que a porosidade é o parâmetro que apresenta a maior variação entre o mínimo e o máximo (81 vezes o valor mínimo), bem como o maior coeficiente de variação. Importante salientar que esta variabilidade não é fruto da incerteza do ensaio, mas sim das diferenças reais entre diferentes amostras de rocha.

A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva das variáveis utilizadas para o cálculo do coeficiente de proporcionalidade  $k$  segundo a equação

$E_e = k \times \sqrt{\sigma_c}$ . O cálculo foi efetuado sobre as 57 amostras que tiveram tanto o módulo quanto a resistência à compressão determinados em ensaios.

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de regressão das propriedades estudadas. Foi calculada equações de regressão entre a porosidade e as outras propriedades escolhidas. Constam também dados colhidos da literatura sobre correlações entre algumas importantes propriedades físicas e mecânicas.



**Tabela 2.** Estatística descritiva das variáveis utilizadas para cálculo do coeficiente de proporcionalidade k.

| Propriedades                | $\sigma_c$ | $\sqrt{\sigma_c}$ | $E_e$ | k      |
|-----------------------------|------------|-------------------|-------|--------|
| Média (GPa)                 | 0,15       | 0,38              | 46,2  | 120,81 |
| Desvio padrão (GPa)         | 0,03       | 0,05              | 10,4  | 26,7   |
| Coeficiente de variação (%) | 19,0       | 9,5               | 23    | 22     |
| Quantidade                  | 48         | 48                | 48    | 48     |
| Mínimo                      | 0,10       | 0,32              | 28,3  | 85,5   |
| Máximo                      | 0,21       | 0,46              | 73,5  | 180,0  |

**Tabela 3.** Resultados da análise de regressão

| Propriedades e relações  | Equação de Regressão               | R <sup>2</sup> | n   | Fonte e comentários  |
|--------------------------|------------------------------------|----------------|-----|--|
| $E_e \times \sigma_c$    | $E_e = 0,375\sigma_c + 4,4279$     | 0,82           | 33  | Sachpazis, 1990 – para rochas carbonáticas de Israel                     |
| $E_e \times \sigma_c$    | $E_e = 0,22\sigma_c + 3,83$        | 0,92           | 9   | Irfan & Dearman, 1978 - mesmo granito, com diferentes graus de alteração |
| $n \times \sigma_c$      | $n = 0,0003\sigma_c + 0,325$       | 0,19           | 41  | D'Andrea <i>et al</i> , 1965 <i>Apud</i> Johnson & De Graff, 1988        |
| $\sigma_c \times V_p$    | $\sigma_c = 0,039V_p - 48,13$      | 0,50           | 36  | D'Andrea <i>et al</i> , 1965 <i>Apud</i> Johnson & De Graff, 1988        |
| $n \times V_p$           | $n = 0,000019V_p + 0,371$          | 0,24           | 51  | D'Andrea <i>et al</i> , 1965 <i>Apud</i> Johnson & De Graff, 1988        |
| $\sigma_c \times R_{cp}$ | $\sigma_c = 15,296R_{cp} + 16,375$ | 0,81           | 50  | D'Andrea <i>et al</i> , 1965 <i>Apud</i> Johnson & De Graff, 1988        |
| $V_s \times V_p$         | $V_s = 0,400V_p + 682$             | 0,56           | 36  | Jesch <i>et al</i> , 1979 <i>Apud</i> Johnson & De Graff, 1988           |
| $\sigma_c \times \eta$   | $\sigma_c = -47,259\eta + 172,54$  | 0,20           | 316 |  |
| $V_p \times \eta$        | $V_p = -1280,1\eta + 5661,6$       | 0,34           | 282 |  |
| $E_e \times \eta$        | $E_e = -19,673\eta + 58,803$       | 0,27           | 57  |  |
| $E_{ec} \times \eta$     | $E_{ec} = -7,5373\eta + 50,108$    | 0,20           | 316 |  |
| $V_p \times \sigma_c$    | $V_p = 5891,7\sigma_c + 4040,4$    | 0,06           | 237 | Este trabalho  |
| $E_e \times \sigma_c$    | $E_e = 0,121\sigma_c + 28,2$       | 0,11           | 48  |  |
| $E_e \times V_p$         | $E_e = 0,0052V_p + 19,75$          | 0,19           | 47  |  |
| $E_{ec} \times \sigma_c$ | $E_{ec} = 159,69\sigma_c + 22,253$ | 0,99           | 318 |  |
| $E_{dc} \times V_p$      | $E_{dc} = 0,0103V_p + 24,139$      | 0,96           | 235 |  |
| $E_{ec} \times E_{dc}$   | $E_{dc} = 0,3824E_{ec} + 8,567$    | 0,06           | 235 |  |

Onde:  $\sigma_c$  = resistência à compressão uniaxial (MPa); n = coeficiente de Poisson;  $\eta$  = porosidade aparente (%);  $V_p$  = velocidade de propagação de onda longitudinal (m/s);  $R_{cp}$  = resistência à compressão pontual (MPa);  $E_e$  = módulo de elasticidade estático tangente (GPa);  $E_{ec}$  = módulo de elasticidade estático calculado (GPa);  $E_{dc}$  = módulo de elasticidade dinâmico calculado (GPa).

Todas as amostras que apresentaram resultados de resistência à compressão determinadas em ensaio, mas não os de módulo, tiveram o módulo de elasticidade estático calculado ( $E_{ec}$ ) considerando-se o k como a média dos 57 valores obtidos conforme Tabela 2 (120,81 para tensões em GPa).

As Figuras 1 a 9 apresentam os gráficos mais relevantes, suas equações e coeficientes de determinação R<sup>2</sup>.

O gráfico da Figura 1 mostra claramente a dificuldade em se relacionar a porosidade com a resistência à compressão, embora sejam proprie-

dades notoriamente relacionadas. Vale dizer que a granulometria também influencia fortemente a resistência mecânica das rochas e não é, em princípio, correlacionável à porosidade. Isto, associado à grande variedade de rochas utilizadas, explica a baixa correlação apresentada no gráfico.

A velocidade de propagação, por sua vez (Figura 2) depende fortemente da porosidade, mas sofre grande influência da mineralogia, principalmente pela densidade dos minerais. A variação mineralógica entre as amostras estudadas deve ser a principal causa da baixa correlação apresentada no gráfico.

O módulo de elasticidade estático (Figura 3), determinado com ensaio de compressão, também apresenta baixa correlação com a porosidade.

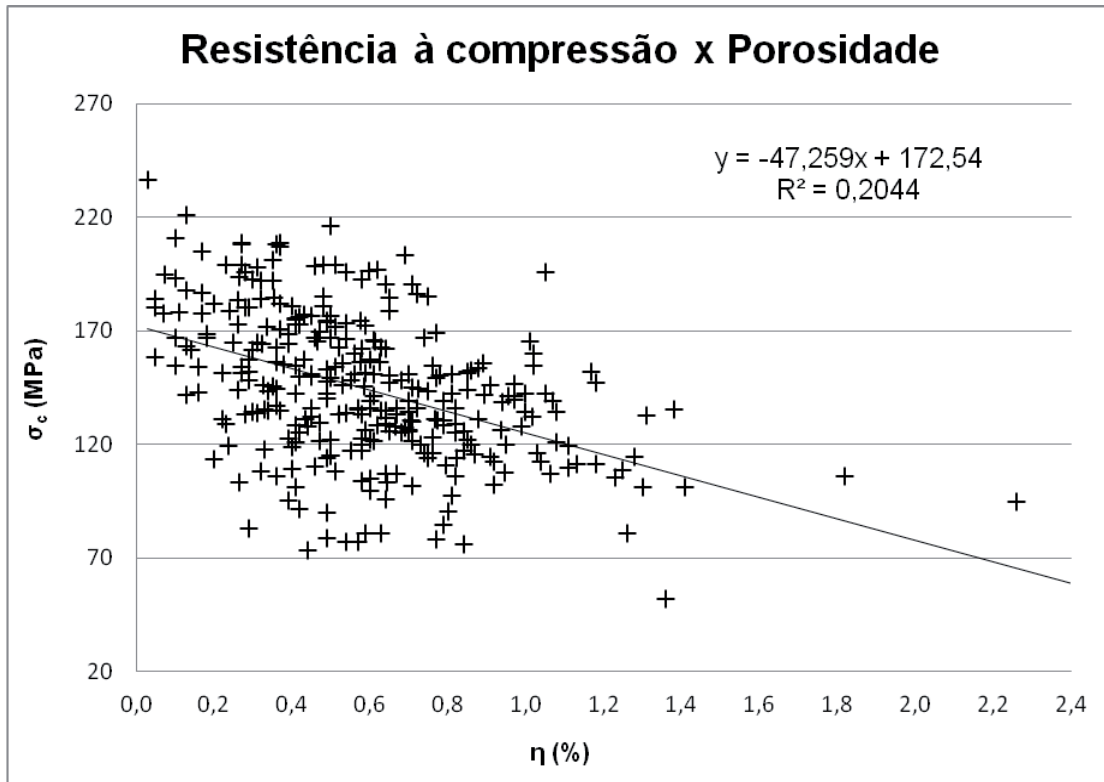


Figura 1. Relação entre resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) e porosidade aparente ( $\eta$ ) para 316 amostras.

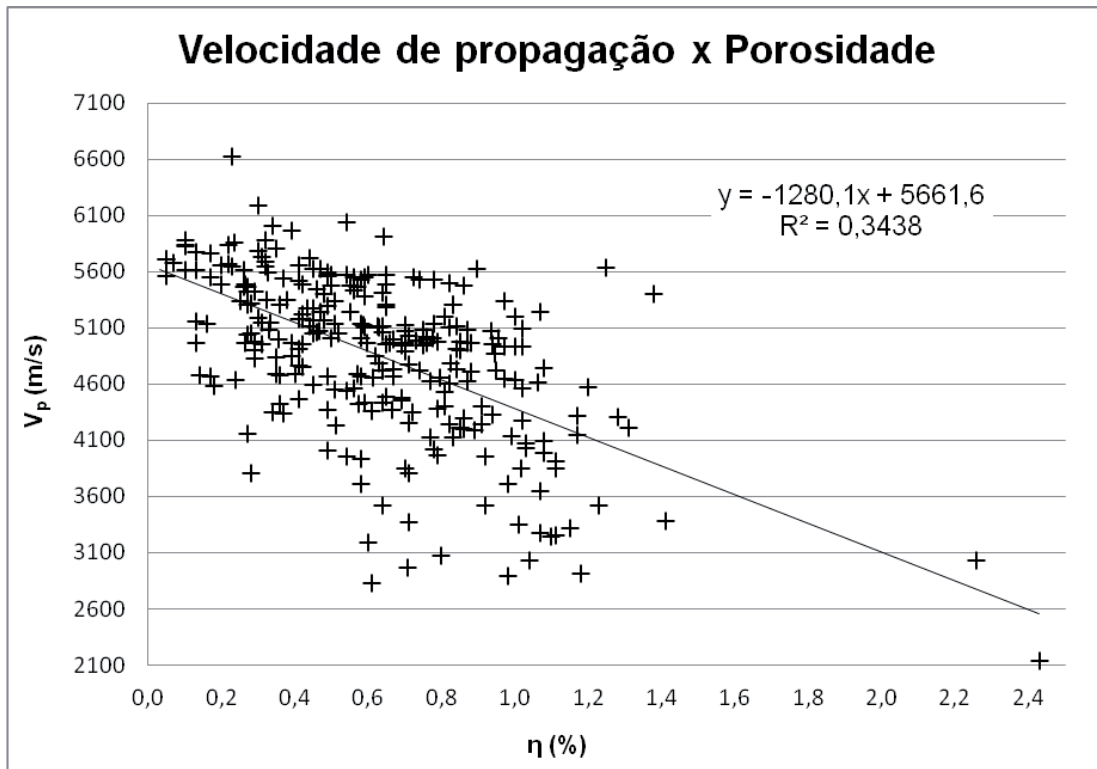


Figura 2. Relação entre velocidade de propagação de onda longitudinal ( $V_p$ ) e porosidade ( $\eta$ ) aparente para 282 amostras.

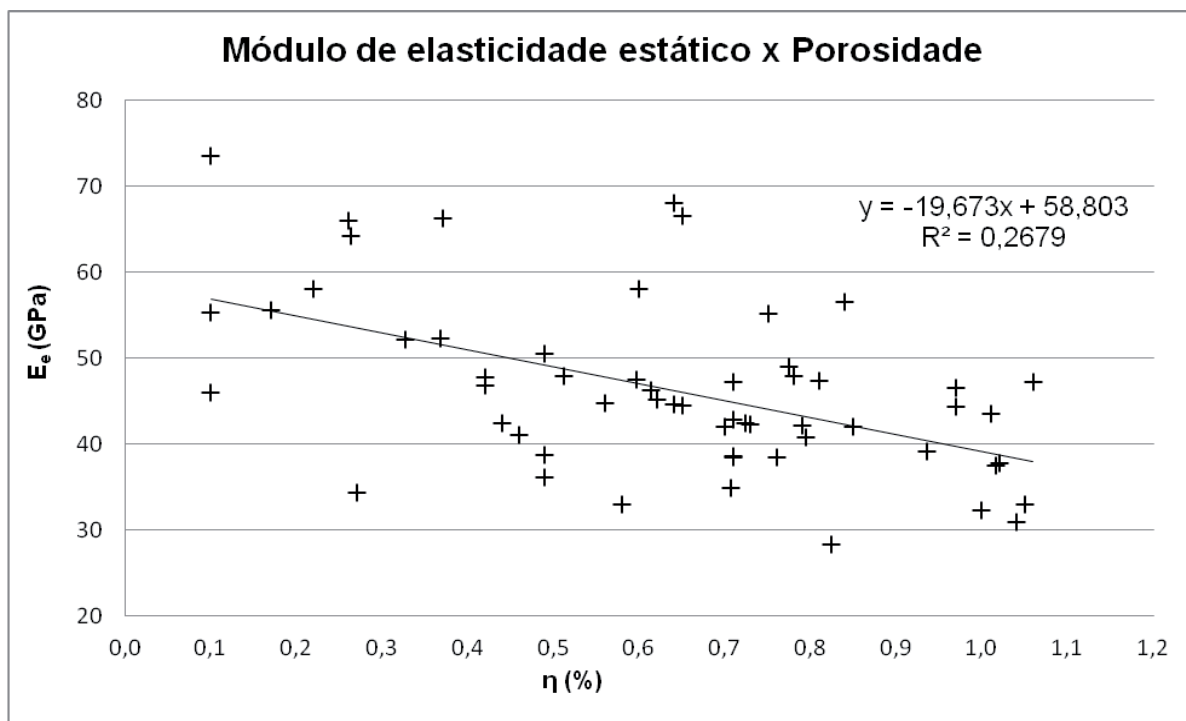


Figura 3. Relação entre porosidade ( $\eta$ ) e módulo de elasticidade estático tangente ( $E_e$ ) obtido de ensaios em 57 amostras.

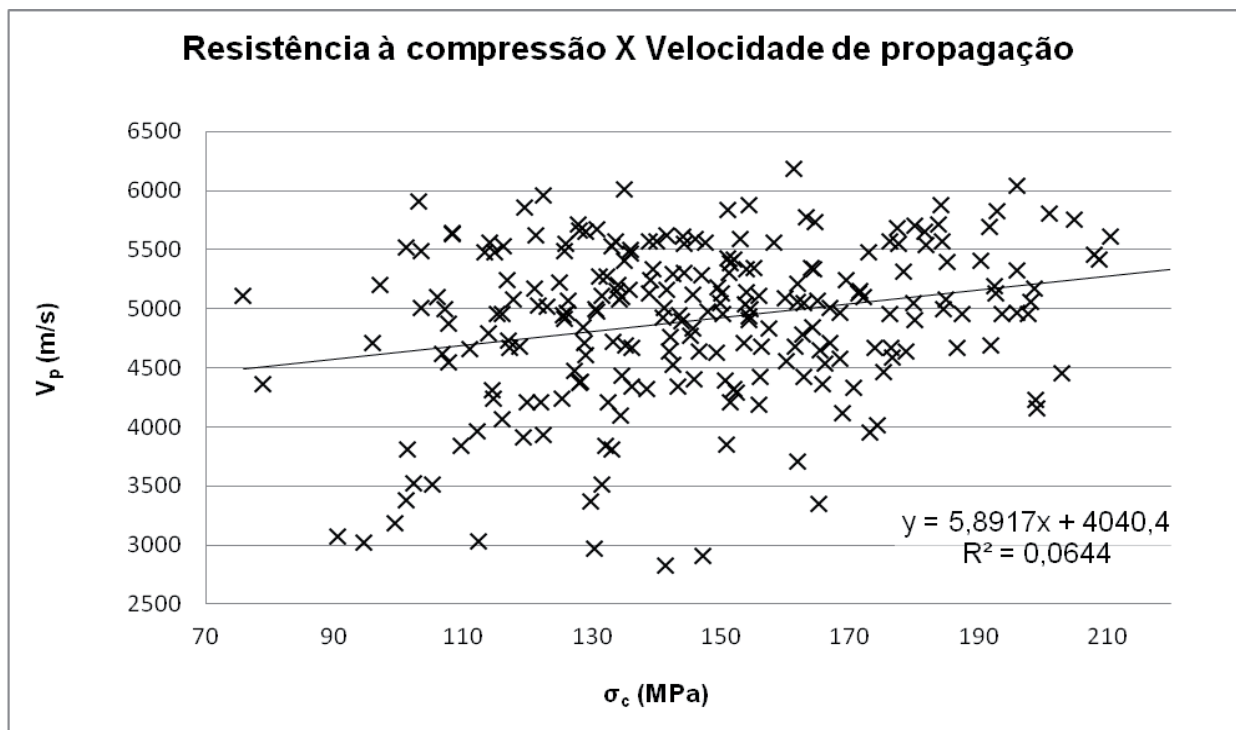
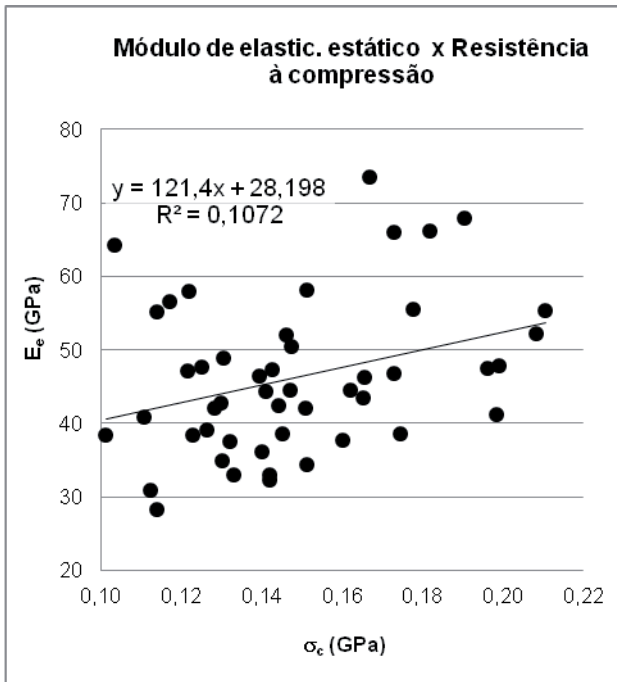


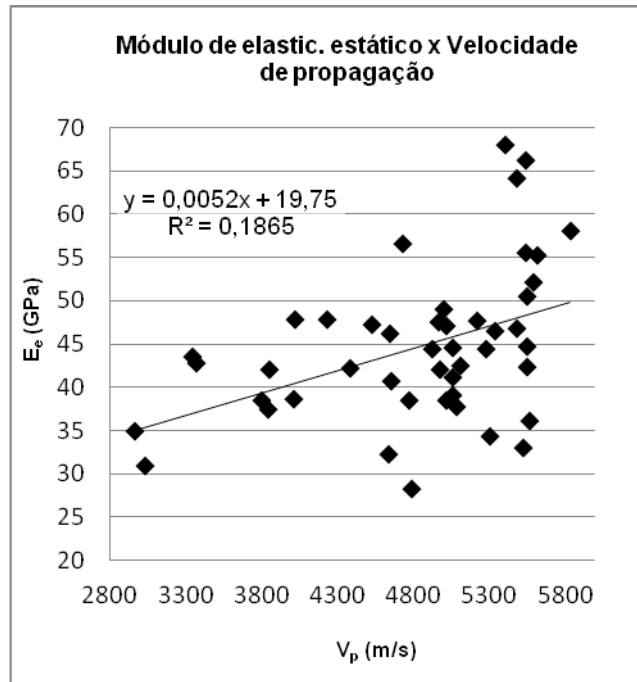
Figura 4. Relação entre resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) e velocidade de propagação de onda longitudinal ( $V_p$ ) para 237 amostras.

A resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) e a velocidade de propagação de onda ultrassônica longitudinal,  $V_p$  (Figura 4) não apresentaram correlação. Embora ambas dependam da porosi-

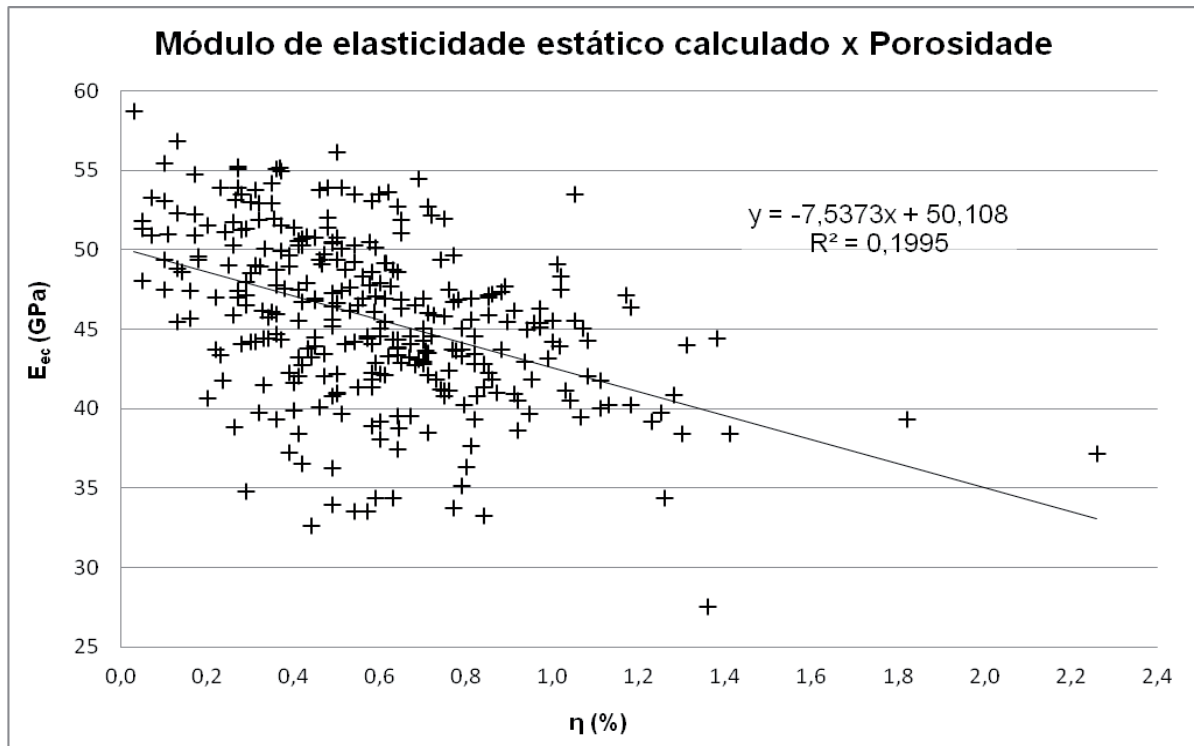
dade e estado de alteração, dependem também de propriedades independentes entre si, particularmente composição mineral para a  $V_p$  e granulação para a  $\sigma_c$ .



**Figura 5.** Relação entre resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) e o módulo de elasticidade estático tangente ( $E_e$ ) obtido a partir de ensaios para 48 amostras.



**Figura 6.** Relação entre módulo de elasticidade estático tangente ( $E_e$ ) e velocidade de propagação de onda longitudinal ( $V_p$ ) para 46 amostras.

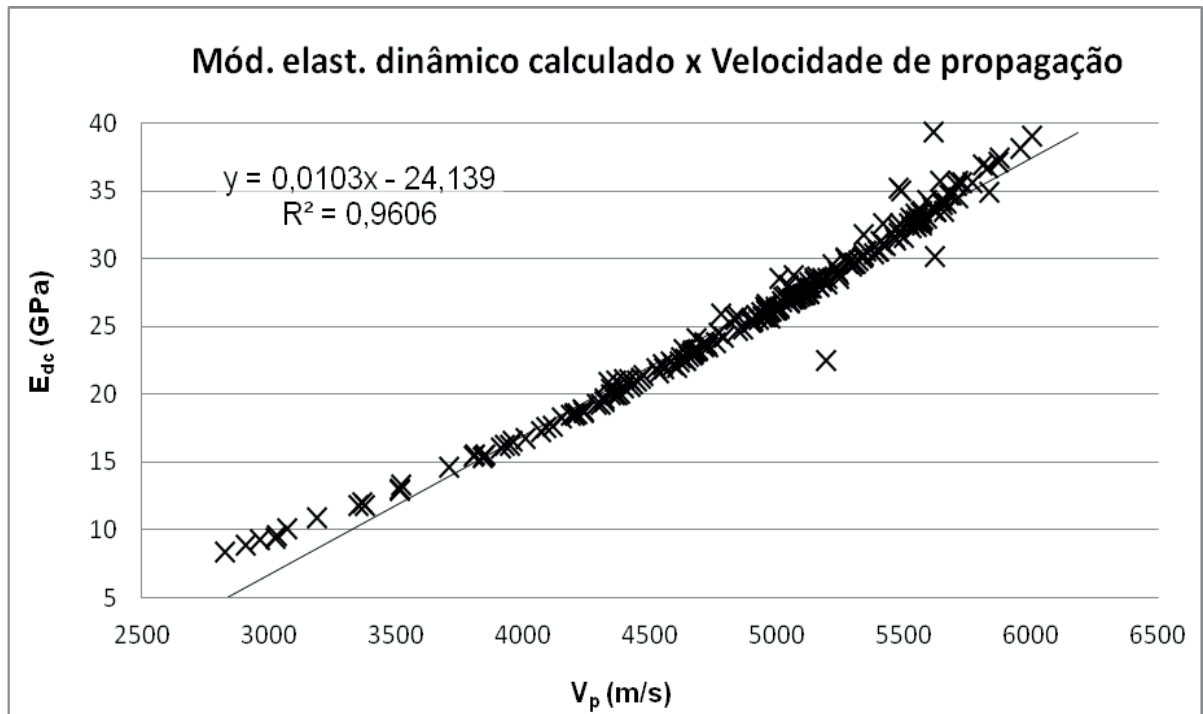


**Figura 7.** Relação entre módulo de elasticidade estático calculado ( $E_{ec}$ ) e porosidade ( $\eta$ ) para 316 amostras.

Assim como o módulo de elasticidade estático determinado em ensaio, o módulo de elasticidade estático obtido por cálculo ( $E_{ec}$ ) a partir da

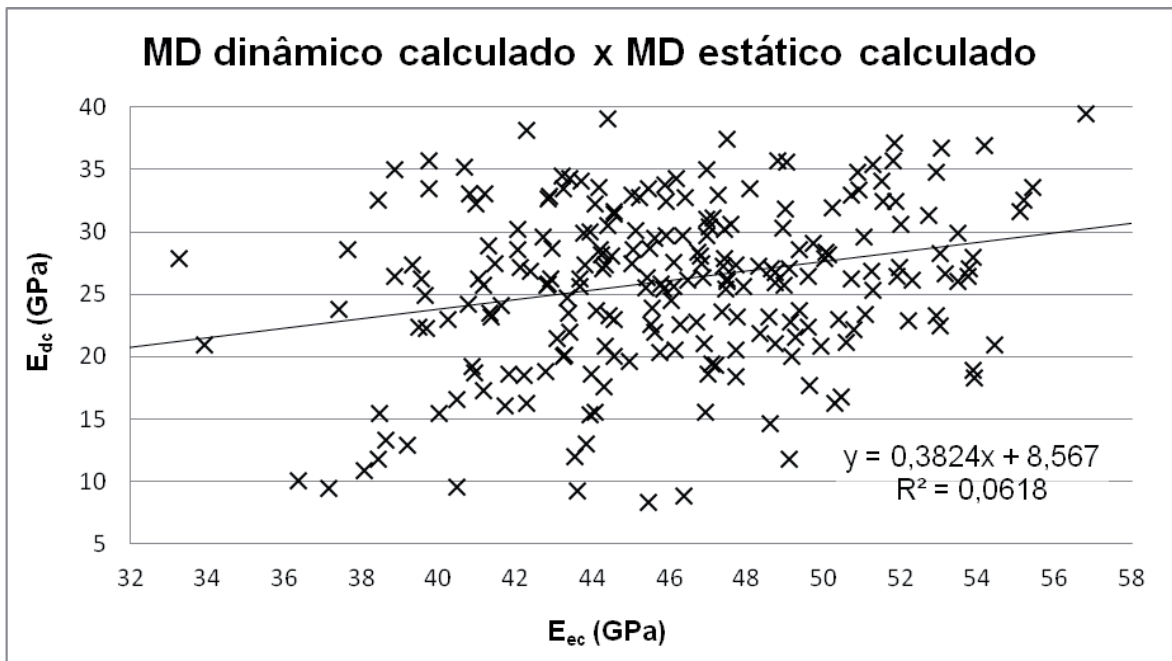
resistência à compressão uniaxial apresentou baixa correlação com a porosidade (Figura 7).





**Figura 8.** Relação entre módulo de elasticidade dinâmico calculado ( $E_{dc}$ ) velocidade de propagação de onda longitudinal ( $V_p$ ) para 235 amostras.

Uma vez que o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico utiliza a velocidade de propagação de onda ultrassônica longitudinal ( $V_p$ ), a correlação entre as duas propriedades é excelente.



**Figura 9.** Relação entre módulo de elasticidade estático calculado ( $E_{ec}$ ) e módulo de elasticidade dinâmico calculado ( $E_{dc}$ ) para 257 amostras.

Os módulos de elasticidade calculados, estático e dinâmico, não apresentaram correlações. É

provável que a simplificação adotada neste trabalho de utilizar 0,30 como o valor para o coeficiente

de Poisson ( $\nu$ ) de todas as amostras, tenha contribuído para diminuir a correlação.

## 5 CONCLUSÕES

As propriedades físicas e mecânicas de rochas não guardam na sua maioria boas correlações, como atesta a literatura. Quando boas correlações aparecem, em geral estão associadas a um universo litologicamente e geologicamente restrito e a número limitado de amostras. Vale citar Price (2009): “Existem relações grosseiras entre as várias propriedades comumente medidas em rochas. Assim, rochas de alta resistência à compressão tendem a apresentar maiores módulos e velocidades sônicas enquanto rochas mais porosas e menos densas tendem a ser mais fracas”. Os resultados aqui apresentados concordam com esta afirmação. Price (2009) afirma ainda, que “essas relações são vagas devido à variada mineralogia dessas rochas, mas tornam-se melhor definidas quando rochas quase monominerálicas são estudadas”.

Por outro lado, Palchik (2010), após estudar 68 diferentes rochas carbonáticas de Israel não encontrou correlações empíricas razoáveis entre módulo de elasticidade e resistência à compressão. Ainda para demonstrar a falta de consenso quanto à qualidade destas correlações, Sachpazis (1990) obteve  $R^2 = 0,82$  em equação linear entre módulo de elasticidade estático e resistência à compressão.

Apesar do grande número de amostras estudadas, os coeficientes de determinação obtidos indicam que não é recomendado determinar as propriedades das rochas por equações. Porém, em situações nas quais é suficiente o conhecimento apenas da ordem de grandeza da propriedade e existem impeditivos para a realização de ensaios, as equações aqui apresentadas podem ser utilizadas como alternativa.

Neste particular, deve-se dar atenção para a possibilidade de se utilizar a equação  $E_c = 121\sqrt{\sigma_c}$  para estimar o módulo de elasticidade estático (obtido por ensaio relativamente complexo e demorado) a partir de valores de resistência à compressão uniaxial (obtida de ensaio relativamente simples e rápido).

## REFERÊNCIAS

- Aufmuth, R.E. 1974. Site engineering indexing of rock. In: **ASTM STP554 - Field testing and instrumentation of rock**, p.81-99.
- Frazão, E.B. & Farjallat, J.E.S. 1995. Características tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedras de revestimento. In: Congresso Internacional da Pedra Natural, 1, **Anais**, p.48-62.
- Frazão, E.B. & Farjallat, J.E.S. 1996. Proposta de especificação para rochas silicáticas de revestimento. In: ABGE, Cong. Bras. de Geol. Eng., 8, **Anais**, 1, p.369-380.
- Frazão, E.B., Dozzi, L.S., Queiroz, F.C. de. 2013. Características tecnológicas de rochas brasileiras usadas como revestimento. In: ABGE. Cong. Bras. Geol. Eng. Amb., 14, **Anais** (CD).
- Irfan T.Y. & Dearman, W.R. 1978. Engineering classification and index properties of a weathered granite. **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.**, 17: 79-90.
- Johnson, R.B., de Graff, J.V. 1988. **Principles of engineering geology**. Wiley & Sons, New York, 497p.
- Palchik, V. 2010. On the ratios between elastic modulus and uniaxial compressive strength of heterogeneous carbonate rocks. **Rock Mech Rock Eng.** 44:121-128.
- Price, D.G. 2009. **Engineering Geology - Principles and practice**. Edited and Compiled by Freitas, M.H.. 2009. Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-29249-4. Berlin Heidelberg, 450p.
- Sachpazis, C.I. 1990. Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's module of carbonate rocks. **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.**, 42: 75-83.
- Siegesmund, S. & Durrast, H. 2011. Physical and mechanical properties of rocks. In: S. Siegesmund & R. Snethlage (eds.) **Stone in Architecture**. 4 ed. Springer, p.: 97-225. ISBN 978-3-642-14474-5. 522p. Berlin.