

# GEOLOGIA AMBIENTAL:

Tecnologias para o desenvolvimento sustentável - Vol. 1

Eduardo de Lara Cardozo  
(Organizador)



Eduardo de Lara Cardozo  
(Organizador)

**GEOLOGIA AMBIENTAL: TECNOLOGIAS PARA O  
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

---

Atena Editora  
2017

2017 by Eduardo de Lara Cardozo

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Edição de Arte e Capa:** Geraldo Alves

**Revisão:** Os autores

#### **Conselho Editorial**

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto (UFPEL)

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho (UnB)

Prof. Dr. Carlos Javier Mosquera Suárez (UDISTRITAL/Bogotá-Colombia)

Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior (UEPG)

Prof. Dr. Gilmei Francisco Fleck (UNIOESTE)

Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza (UEPA)

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa (FACCAMP)

Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior (UFAL)

Profª Drª Adriana Regina Redivo (UNEMAT)

Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall'Acqua (UNIR)

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson (UTFPR)

Profª Drª Ivone Goulart Lopes (Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatric)

Profª Drª Lina Maria Gonçalves (UFT)

Profª Drª Vanessa Bordin Viera (IFAP)

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

G345

Geologia ambiental: tecnologias para o desenvolvimento sustentável /  
Organizador Eduardo de Lara Cardozo. – Ponta Grossa (PR):  
Atena Editora, 2017.

297 p. : 57.346 kbytes – (Geologia Ambiental; v. 1)

Formato: PDF

ISBN 978-85-93243-39-4

DOI 10.22533/at.ed.3940809

Inclui bibliografia.

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Geologia ambiental. 3. Meio ambiente. 3. Sustentabilidade. I. Cardozo, Eduardo de Lara. II. Título. III. Série.

CDD-363.70

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

2017

Proibida a reprodução parcial ou total desta obra sem autorização da Atena Editora

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

E-mail: [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## Apresentação

Notícias como deslizamentos de encostas, regiões alagadas e ocupações irregulares sempre vêm à tona. E quando ocorrem, normalmente trazem junto a esses fatos, prejuízos econômicos e infelizmente anúncios relacionados à perda de vidas.

Alguns exemplos desses processos são recentes, como o caso do deslizamento de uma encosta em Angra dos Reis em 2010, onde houveram vítimas fatais, outro caso que chamou muito a atenção foi o rompimento, em 2015, de uma barragem de rejeitos no município de Mariana (Minas Gerais), bem como alagamentos em várias regiões brasileiras, são frequentemente divulgadas. Questões ambientais que ocorrem naturalmente, porém com o processo de ocupação irregular e degradação pela ação humana, os resultados nem sempre são positivos.

Os artigos aqui apresentados vêm ao encontro de muitos fatos ocorridos e que normalmente atribuímos apenas a questões ambientais. Porém, sabemos que não é bem assim! O deslizamento é um fenômeno comum, principalmente em áreas de relevo acidentado, as enchentes acontecem logo em seguida às chuvas intensas e em grandes períodos. Situações que há milhares de anos vem se repetindo, porém com o processo de urbanização, a retirada da cobertura vegetal, a ocupação de áreas irregulares, a contaminação do solo, a degradação do ambiente, entre vários outros pontos, acaba sendo intensificada pela constante alteração e ocupação desse espaço geográfico.

No primeiro volume da obra **“Geologia Ambiental: tecnologias para o desenvolvimento sustentável”** são abordadas questões como: análise da suscetibilidade a deslizamentos, avaliação de cenários sob perigo geotécnico, ordenamento territorial, a importância de estudos específicos considerando as complexidades e diversidades dos diferentes contextos, análise do comportamento geomecânico dos maciços rochosos, caracterização química-mineralógica e da resistência ao cisalhamento, estudos de resistência do meio físico em busca de segurança de instalações e a utilização de software no dimensionamento geotécnico aplicado a fundações profundas.

Neste primeiro volume também são contemplados os seguintes temas: análise da evolução da boçoroca do Córrego do Grito em Rancharia-São Paulo, estudos de áreas suscetíveis a ocorrência de inundações, diagnóstico ambiental voltado à erosão hídrica superficial e cartografia geotécnica, erosão e movimento gravitacional de massa, melhoramento fluvial do rio Urussanga - SC objetivando a redução de impactos associados às chuvas intensas, desassoreamento do Rio Urussanga - SC e caracterização do sedimento, potencialidades dos recursos hídricos na Bacia do Córrego Guariroba -MS.

E fechando este primeiro volume, temos os temas ligados ao: uso de tecnologias alternativas para auxiliar no tratamento de águas residuais, gestão de esgotamento sanitário, estudos sobre a contaminação dos solos por gasolina e

descontaminação através de bioremediação, metodologias que determinam a vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação, mapeamento geoambiental como subsídio à seleção de áreas para implantação de centrais de tratamento de resíduos sólidos, são apresentados.

Diferentes temas, ligados a questões que estão presentes em nosso cotidiano. Desejo uma excelente leitura e que os artigos apresentados contribuam para o seu conhecimento.

Atenciosamente.

*Eduardo de Lara Cardozo*

## SUMÁRIO

**Apresentação.....03**

### CAPÍTULO I

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DA UNIDADE GEOMORFOLÓGICA SERRAS CRISTALINAS LITORÂNEAS NO MUNICÍPIO DE BLUMENAU/SC.

*Maurício Pozzobon, Gustavo Ribas Curcio e Claudinei Taborda da Silveira.....08*

### CAPÍTULO II

AValiação DE CENÁRIOS SOB PERIGO GEOTÉCNICO: O CASO DA COMUNIDADE DO MORRO DA MARIQUINHA, FLORIANÓPOLIS-SC.

*Gabriela Bessa, Daniel Galvão Veronez Parizoto, Rodrigo Del Olmo Sato, Nilo Rodrigo Júnior, Murilo da Silva Espíndola e Vítor Santini Müller.....30*

### CAPÍTULO III

AValiação DOS REMANESCENTES FLORESTAIS NA ELABORAÇÃO DE CARTAS GEOTÉCNICAS DE APTIDÃO À URBANIZAÇÃO O CASO DE SÃO BERNARDO DO CAMPO - SP

*Raquel Alfieri Galera, Fernando Cerri Costa e Ricardo de Souza Moretti.....42*

### CAPÍTULO IV

Caracterização E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS COMPOSTOS PELAS PRINCIPAIS LITOLOGIAS DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE

*Walter dos Reis Junior e Maria Giovana Parizzi.....57*

### CAPÍTULO V

Caracterização GEOTÉCNICA E MINERALÓGICA DE UMA ARGILA FORMADA SOB ATIVIDADE HIDROTÉRMAL

*Marcelo Heidemann, Luiz Antônio Bressani, Juan Antonio Altamirano Flores, Matheus Porto, Breno Salgado Barra e Yader Alfonso Guerrero Pérez.....73*

### CAPÍTULO VI

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

*Vitor Santini Müller, Nilo Rodrigues Júnior, Murilo da Silva Espíndola, Regiane Mara Sbroglia, Rafael Augusto dos Reis Higashi e Juan Antonio Altamirano Flores.....89*

### CAPÍTULO VII

USO DE MODELO GEOLÓGICO DIGITAL COMO FERRAMENTA DE ORIENTAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO DE FUNDAÇÃO

*Carlos Magno Sossai Andrade, Patrício José Moreira Pires e Rômulo Castello Henrique Ribeiro.....102*

#### CAPÍTULO VIII

ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA BOÇOROCA DO CÓRREGO DO GRITO EM RANCHARIA-SP DE 1962 A 2014

*Alyson Bueno Francisco.....118*

#### CAPÍTULO IX

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM COMO SUBSÍDIO AO ESTUDO DA SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO NAS MICROBACIAS DO MÉDIO RIO GRANDE

*Eduardo Goulart Collares, Ana Carina Zanollo Biazotti Collares, Jéssica Avelar Silva e Amanda Francieli de Almeida.....126*

#### CAPÍTULO X

DIAGNÓSTICO AMBIENTAL SUPERFICIAL DO MUNICÍPIO DE PACOTI NO ESTADO DO CEARÁ. EROSIVIDADE, ERODIBILIDADE E UNIDADES DE RELEVO PARA GEOTECNIA

*Francisco Kleison Santiago Mota, Jean Marcell Pontes de Oliveira, Naedja Vasconcelos Pontes, César Ulisses Vieira Veríssimo e Sônia Maria Silva de Vasconcelos.....138*

#### CAPÍTULO XI

MAPEAMENTO DE AMEAÇAS E DESASTRES NATURAIS NA ÁREA URBANA DE SANTARÉM - PA

*Fábio Ferreira Dourado e Milena Marília Nogueira de Andrade.....160*

#### CAPÍTULO XII

MELHORAMENTO FLUVIAL DO RIO URUSSANGA PERTENCENTE À BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUSSANGA, SUL DE SANTA CATARINA

*Sérgio Luciano Galatto, Gustavo Simão, Jader Lima Pereira, Nadja Zim Alexandre e Vilson Paganini Belletini.....174*

#### CAPÍTULO XIII

METODOLOGIA DE AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO SEDIMENTO DO RIO URUSSANGA-SC PARA FINS DE DEPOSIÇÃO

*Nadja Zim Alexandre, Carlyle Torres Bezerra de Menezes, Gustavo Simão, Jader Lima Pereira e Sérgio Luciano Galatto.....190*

#### CAPÍTULO XIV

POTENCIALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO CÓRREGO GUARIROBA, MUNICÍPIO DE CAMPO GRANDE-MS

*Giancarlo Lastoria, Sandra Garcia Gabas, Guilherme Henrique Cavazzana, Juliana Casadei e Tamiris Azoia de Souza.....204*

CAPÍTULO XV

ASPECTOS PRINCIPAIS SOBRE O USO DE TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS PARA AUXILIAR NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO

*Bruna Ricci Bicudo, Lígia Belieiro Malvezzi e Edilaine Regina Pereira.....214*

CAPÍTULO XVI

AVALIAÇÃO DOS PROBLEMAS OPERACIONAIS PRESENTES EM ALGUMAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO CEARÁ

*Thiago de Norões Albuquerque, Tícia Cavalcante de Souza e Wladya Maria Mendes de Oliveira.....225*

CAPÍTULO XVII

COMPARATIVO DE BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR GASOLINA

*Diego Moreira da Silva, Marcela Penha Pereira Guimarães, Raphael Moreira Alves e Francisco Roberto Silva de Abreu.....239*

CAPÍTULO XVIII

DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO E SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA EM TAQUARUÇU DO SUL - RS

*Gabriel D'Avila Fernandes, José Luiz Silvério da Silva, Willian Fernando de Borba, Lueni Gonçalves Terra, Carlos Alberto Löbler e Edivane Patrícia Ganzer.....251*

CAPÍTULO XIX

MAPEAMENTO GEOAMBIENTAL COMO SUBSÍDIO À SELEÇÃO DE ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE CENTRAIS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: APLICAÇÃO AO MUNICÍPIO DE SANTA CRUZ DA CONCEIÇÃO - SP

*Hermes Dias Brito, Fábio Augusto Gomes Vieira Reis, Claudia Vanessa dos Santos Corrêa e Lucilia do Carmo Giordano.....263*

***Sobre o organizador.....286***

***Sobre os autores.....287***

## **CAPÍTULO V**

### **CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E MINERALÓGICA DE UMA ARGILA FORMADA SOB ATIVIDADE HIDROTHERMAL**

---

**Marcelo Heidemann  
Luiz A. Bressani  
Juan A. Flores  
Matheus Porto  
Breno S. Barra  
Yader A. G. Pérez**

## CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E MINERALÓGICA DE UMA ARGILA FORMADA SOB ATIVIDADE HIDROTHERMAL

### **Marcelo Heidemann**

Universidade Federal de Santa Catarina  
Joinville – SC

### **Luiz A. Bressani**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre – RS

### **Juan A. Flores**

Universidade Federal de Santa Catarina  
Florianópolis – SC

### **Matheus Porto**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre – RS

### **Breno S. Barra**

Universidade Federal de Santa Catarina  
Joinville – SC

### **Yader A. G. Pérez**

Universidade Federal de Santa Catarina,  
Joinville – SC

**RESUMO:** Este trabalho dedica-se à caracterização química-mineralógica e da resistência ao cisalhamento em condição residual de um solo originado sob atividade hidrotermal. Este material ocorre em uma área de encosta no município de São José – SC, onde o perfil de solo residual de granito apresenta-se transpassado por veios preenchidos por uma argila rica em caulinitas e muscovitas. A formação desta argila está relacionada ao processo de muscovitização dos feldspatos presentes na rocha mãe e no solo residual, bem como da lixiviação de cátions de fácil remoção. O solo é classificado como uma argila de alta plasticidade (CH). Sobre a resistência ao cisalhamento, obteve-se ângulo de atrito residual da ordem de 8°, valor considerado baixo perante os medidos em outros solos no sul do Brasil. Este baixo ângulo de atrito parece ser fruto do alinhamento das partículas do solo de forma paralela entre si, conforme mostrado por imagens de MEV. Em termos volumétricos o solo argiloso é pouco representativo, mas a forma com que se dá sua ocorrência na encosta, constituindo-se em zonas de descontinuidade, assim como a baixa resistência ao cisalhamento, remetem à possibilidade de que a estabilidade da encosta seja influenciada pela resistência ao cisalhamento residual deste solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resistência residual, alteração hidrotermal, muscovita, argila, granito.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de alteração hidrotermal (metasomatismo) é um agente metamórfico (de baixo grau) e de intenso intemperismo que ocorre quando água quente e íons dissolvidos na água (Na, Ca, Mg, principalmente) reagem com a rocha para modificar sua composição química e mineralógica (THOMPSON e TURK, 1997).

Conforme Dearman et al. (1978) a alteração hidrotermal é um importante mecanismo relacionado ao intemperismo químico, sendo que os produtos resultantes podem ser muito similares àqueles desenvolvidos sob intemperismo químico sem ação hidrotermal. Segundo Dejou (1977) *apud* Dobereiner et al. (1993), em condições de hidrotermalismo o processo químico de destaque é a hidrólise, que pode ter efeito duplicado ou triplicado a cada aumento de 10°C na temperatura.

Os processos de alteração hidrotermal se processam de forma frequente em zonas de descontinuidades, como relatado por Kuva et al. (2012) na Finlândia, Regmi et al. (2013) no Nepal, e Irfan (1998, 1994, 1988), em maciços graníticos de Hong Kong, por exemplo.

Em áreas de intensa alteração hidrotermal, a estrutura e textura da rocha podem ser completamente destruídas, sendo dificultada a identificação da rocha de origem (IRFAN, 1994).

No processo de evolução das rochas as alterações hidrotermais são tratadas como um processo à parte, muitas vezes desvinculado do fenômeno de intemperismo, embora ocorram concomitantemente. De acordo com Irfan e Woods (1988), os efeitos da alteração hidrotermal e do intemperismo químico são similares, sendo difícil distinguir se o produto final é resultante de intemperismo químico ou alteração hidrotermal, exceto onde a atividade hidrotermal conduz à formação de associações minerais específicas.

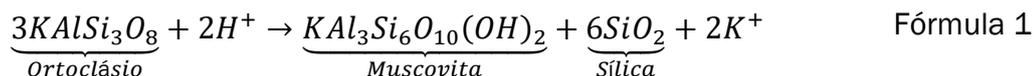
Nesse sentido, ainda conforme Irfan e Woods (1988), as alterações hidrotermais atingem profundidades consideravelmente maiores que o intemperismo químico. Dearman et al. (1978) afirmam que os efeitos dos dois processos podem ser distinguidos pelo tipo de controle estrutural e natureza do solo, identificadas em campo e em laboratório. Baynes et al. (1978) relatam que o intemperismo químico atua em sentido descendente, enquanto que alterações hidrotermais se manifestam internamente no maciço. Irfan (1994), por outro lado, não considera que o modo de distribuição possa ser utilizado como forma de diferenciar os processos.

Irfan e Woods (1988) reportam que em Hong Kong os efeitos de atividades hidrotermais podem estar confinados a certas direções de descontinuidades já existentes, e são normalmente associados a veios de caulinita, caulinita-quartzo ou outros minerais.

Sobre a presença de caulinitas em áreas suscetíveis a processos hidrotermais, Thompson e Turk (1997) esclarecem que o mesmo ocorre pois o alumínio e silício são muito resistentes à dissolução e não são removidos pelo fluxo

de água, combinando-se então com oxigênio e água para formar aquele argilomineral.

A atividade hidrotermal pode promover também o desenvolvimento de muscovitas a partir de feldspatos, como reportado por Wibberley (1999) e Regmi et al. (2013), o que é um processo típico de zonas de falhas em granitos, conforme Evans e Chester (1995) e Wintsch et al. (1995). A título de exemplo, a reação de transformação de ortoclásios em muscovitas é mostrada na fórmula 1, requerendo um fluido ácido para que a muscovitização ocorra, conforme Wibberley (1999).



A ocorrência deste processo tem sido documentada tanto em embasamentos cristalinos como em zonas cataclásticas (JANECKE e EVANS, 1988) e zonas de cisalhamento miloníticas (KNIPE e WINTSCH, 1985 *apud* WIBBERLEY, 1999). Kuva et al. (2012) reportam que as fraturas no maciço Finlandês de Oikiluoto são dominadas por argilas de origem hidrotermal e calcitas.

Sobre a importância de tais materiais no que tange à geotecnia, podem ser mencionados diversos problemas de instabilidade de taludes relacionados à presença de tais feições, principalmente por conta da baixa resistência ao cisalhamento de tais materiais e por constituírem-se descontinuidades na massa de solo ou rocha.

Segundo Wolle (1985) e Irfan (1998), a fissuração tende a isolar cunhas ou blocos que podem deslizar ao longo de planos de fraqueza. Hasegawa et al. (2009) relatam que na região central do Nepal, o avanço de uma zona de falha foi acompanhado por alterações hidrotermais e formação de argilas na superfície de deslizamento, o que tem condicionado sucessivos movimentos de massa.

Irfan e Woods (1988) relatam, em Hong Kong, a ruptura de um talude rodoviário de 18 m de altura, em solos de granito, organizado em sucessivas bancadas. Estudos revelaram a presença de juntas reliquias revestidas por argilas expostas na superfície de ruptura. Concluiu-se que a ruptura se deu em função da presença destes planos com orientação adversa. O movimento não ocorreu ao longo de uma única junta, mas se propagou através do solo residual intacto, interconectando várias juntas.

Siu e Premchitt (1990) *apud* Irfan (1998) descrevem uma ruptura ao longo de uma junta reliquiar contínua e preenchida por caulinita, em materiais graníticos de Hong Kong. Também em Hong Kong, Brand (1985) descreve uma ruptura progressiva ao longo de uma série de juntas de baixo ângulo, preenchidas por caulinita em solos saprolíticos de granito.

Raimundo et al. (2002) descrevem uma ruptura ocorrida no contato entre granito e diabásio, em Florianópolis - SC. Esta ruptura, segundo os autores, foi condicionada pela presença de diversos veios argilosos, com espessuras milimétricas até centimétricas e orientação paralela às superfícies das referidas rupturas. Os autores propõem que tais veios atuaram como elementos redutores

da condutividade hidráulica e da resistência operacional do maciço, visto que apresentam parâmetros de resistência inferiores aos do saprólito de granito.

Na porção leste do estado de Santa Catarina os corpos cristalinos encontram-se bastante afetados por descontinuidades, o que se deve, em parte, as características inerentes ao Cinturão de Cisalhamento Sul-brasileiro, conforme mostrado na Figura 1.

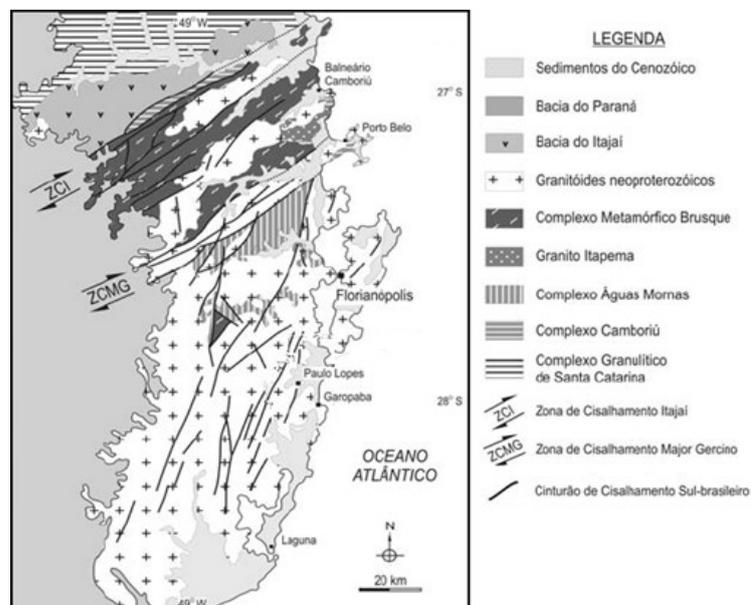


Figura 1. Arcabouço geológico da região estudada (modificado de Bitencourt et al., 2008).

Em uma área localizada no município de São José – SC, a ocorrência de atividade hidrotermal, associada a falhas na rocha granítica criou condições ideais para o desenvolvimento do processo de muscovitização que atinge granitos e solos saprolíticos de granito, dando origem a um material argiloso que se deposita ao longo de planos de descontinuidades da rocha e do solo.

Este trabalho dedica-se a apresentação das condições em que ocorre tal material, aqui denominado “argila hidrotermal“, bem como de aspectos de comportamento geotécnico e características mineralógicas do mesmo.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A área de estudo consiste em uma encosta parcialmente antropizada, com coordenadas UTM: 732.370 E, 6.948.100 S, e altitude média de 53 m acima do nível do mar. Trata-se de uma zona de expansão urbana do município de São José - SC. A localização do município é mostrada na Figura 2 enquanto que a Figura 3 apresenta uma planta topográfica do local.

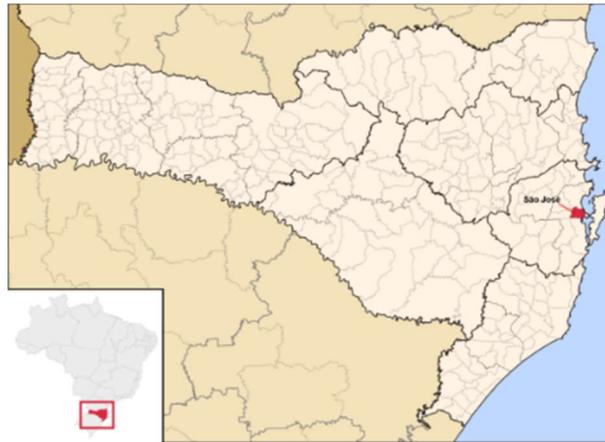


Figura 2. Localização do Município de São José, no estado de Santa Catarina.



Figura 3. Planta topográfica do local.

Esta encosta teve sua base cortada para a construção de um loteamento regular. Desde então, diversos eventos de instabilidade foram registrados neste mesmo local, requerendo várias obras que visam a readequação topográfica e estabilização. A Figura 4 mostra o perfil estratigráfico atual da encosta ao longo da seção transversal mostrada na Figura 3. É importante destacar que a encosta de estudo é atravessada por uma zona de falha com cerca de 10 metros de largura e orientação NE, aproximadamente paralela à seção transversal mostrada.

O nível d'água que aparece na Figura 4 foi obtido por meio de sondagens SPT executadas ao longo da seção transversal e imediações. Tais resultados corroboram o observado em campo, já que logo acima da cota 45m é frequente a surgência de água no talude, enquanto que nas áreas mais altas o solo se mostra

relativamente seco.

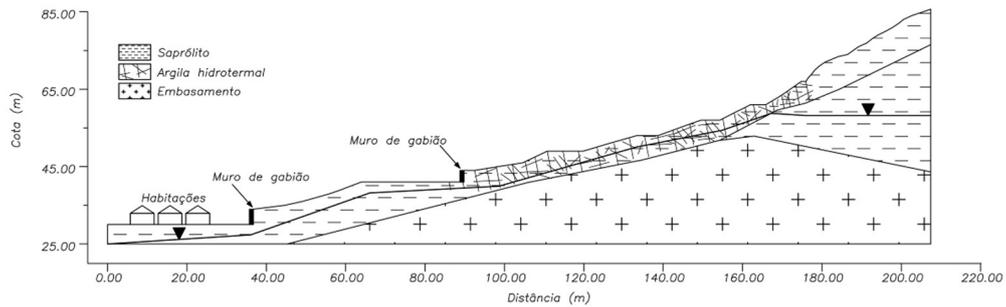


Figura 4. Seção transversal da área estudada.

Os granitos formam a litologia dominante. Como consequência, a área como um todo é coberta por solos residuais de granito, embora haja certa variabilidade em termos de textura e coloração por parte destes materiais ao longo da encosta.

A argila de origem hidrotermal, que é o material tema deste trabalho, tem pequena representatividade em termos volumétricos, mas sua ocorrência é bastante importante para o entendimento do comportamento da encosta como um todo. Estas argilas preenchem descontinuidades existentes na massa de solo residual e em campo podem ser pouco visíveis em um primeiro momento. Na Figura 5 este material é mostrado em três escalas de observação.

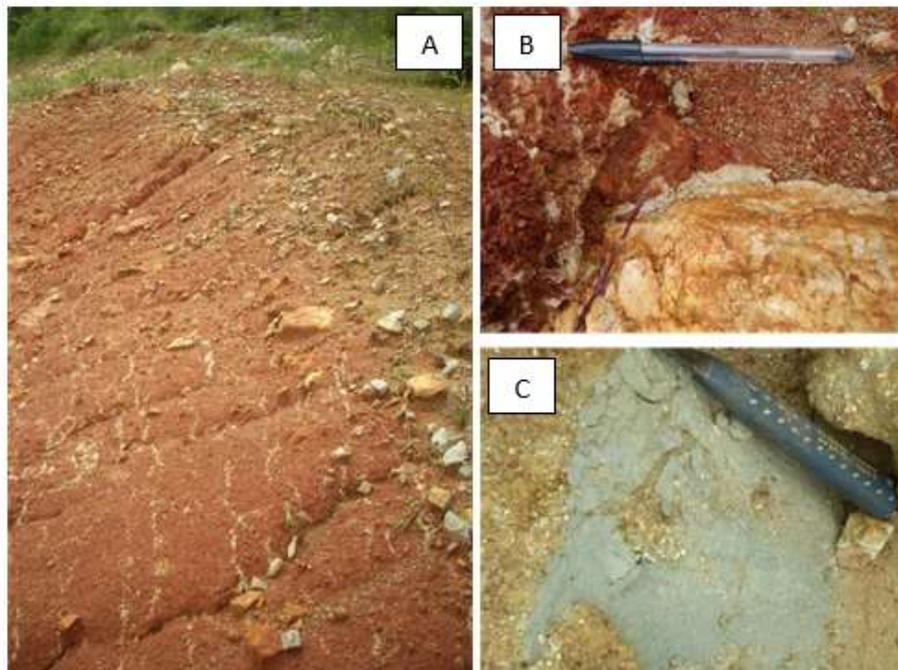


Figura 5. Exposições da argila em campo. (a) linhas delgadas claras, paralelas ao strike da encosta; (b) vistas em pequenas escavações; (c) exposta ao longo de um plano, neste caso com espessura milimétrica.

Quanto à orientação, em geral estes veios têm *strike* similar ao do próprio talude, ocorrendo de forma paralela entre si, como mostrado na Figura 5a. Em

alguns pontos os mesmos desenvolvem-se verticalmente, mas são também encontrados veios com *dip* paralelo e ortogonal à inclinação da encosta. Esta rede de veios não se mostra claramente conectada.

Em campo não foram observadas rupturas ao longo destes planos argilosos, mas as rupturas ocorridas concentram-se nas áreas em que tal material ocorre, mobilizando esta argila e o solo encaixante, indicando relação entre a presença do referido material e uma maior fragilidade do maciço.

### 3. METODOLOGIA

O estudo das características mineralógicas e geotécnicas da argila de origem hidrotermal se deu a partir de ensaios de laboratório. O material foi submetido a análises de difração e fluorescência de raios-x, para caracterização mineralógica e química, respectivamente. Com relação ao comportamento geotécnico, foram executados ensaios de caracterização física, para determinação do peso específico real das partículas (ABNT NBR 6508/1984), granulometria (ABNT NBR 7181/1984) e limites de consistência (ABNT NBR 6459/1984 e ABNT NBR 7180/1984), assim como ensaios de resistência ao cisalhamento torcional, por meio de ensaios *ring shear*.

Os ensaios *ring shear* foram realizados em um equipamento produzido conforme o proposto por Bromhead (1979). Durante a execução dos ensaios foram seguidos os procedimentos e recomendações constantes na norma ASTM D6467.

O *ring shear* de Bromhead (1979) exige que os corpos de prova utilizados sejam moldados diretamente na célula de cisalhamento do próprio equipamento. Assim, o solo utilizado na confecção dos corpos de prova foi inicialmente seco ao ar, destorroado e peneirado. Para o ensaio utilizou-se apenas a fração passante na peneira #40, de diâmetro máximo 0,42 mm, visto que, de acordo com a norma adotada, as partículas devem ter diâmetro máximo não superior a 10% da altura da amostra, que possui 5 mm.

Imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV), posteriores aos ensaios *ring shear*, possibilitaram avaliar os efeitos do cisalhamento no que se refere à ocorrência de reorientação das partículas do solo argiloso.

Todas estas análises foram efetuadas também no solo encaixante, para descrever as diferenças existentes entre este material e a argila estudada.

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Caracterização química e mineralógica

Inicialmente são apresentados os resultados referentes à caracterização química da argila e do solo residual encaixante, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Elementos maiores e perda ao fogo nos solos investigados

	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PF
Argila	1,69	0,70	25,5	53,3	0,02	2,37	0,87	0,84	0,06	4,84	9,56
Solo Enc.	0,20	0,92	23,5	54,0	0,05	2,13	0,07	0,97	0,06	7,94	9,54

As diferenças mais substanciais dizem respeito às maiores concentrações de Na<sub>2</sub>O e CaO, e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no solo argiloso, bem como à quantidade mais expressiva de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no solo residual. O Na<sub>2</sub>O e CaO são lixiviados de minerais primários e se acumulam nestes veios, enquanto que o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é o resíduo da alteração dos minerais existentes junto às descontinuidades. Os níveis de perda ao fogo e de sílica (SiO<sub>2</sub>) dos dois materiais são bastante similares.

Os resultados das análises de difração de raios-X, que descrevem a mineralogia dos solos investigados, são mostrados na Figura 6 sob a forma de difratogramas, enquanto que os resultados das análises semi-quantitativas são mostrados na Tabela 2.

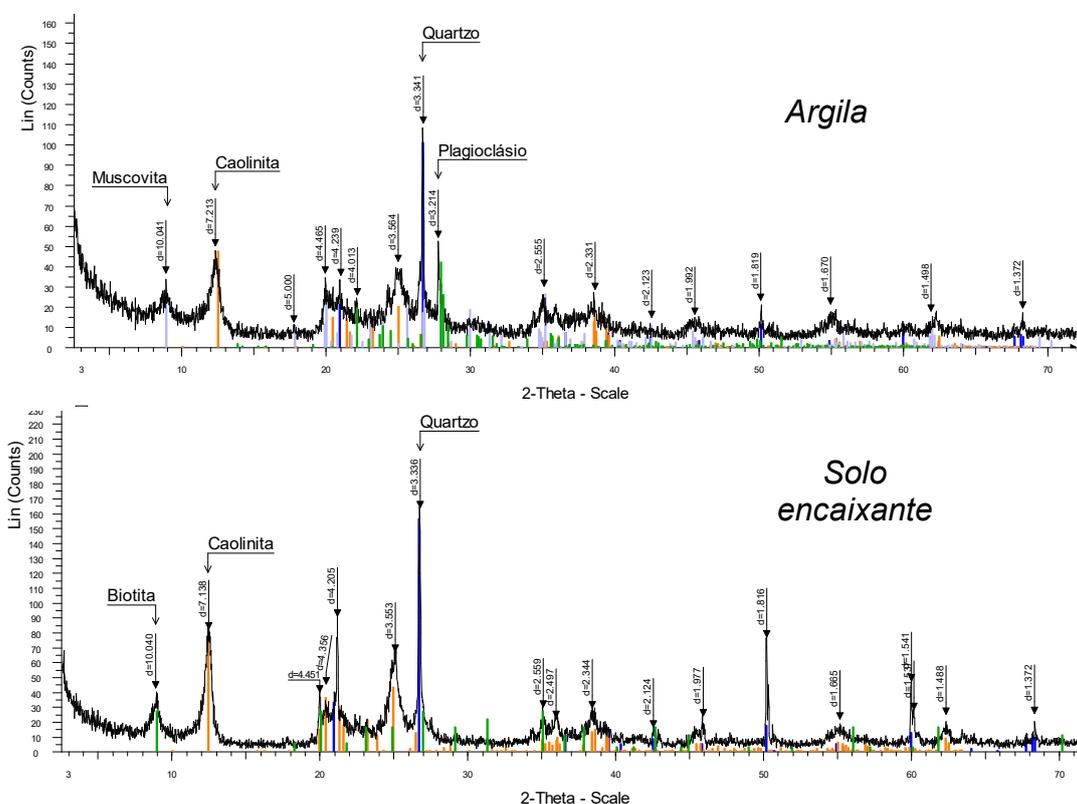


Figura 6. Difratogramas do solo encaixante: amostra total

Tabela 2. Quantificação dos minerais presentes nos solos estudados (análise semiquantitativa)

	Quartzo	Plagioclásio	Muscovita	Biotita	Caulinita
Argila	15%	33%	34%	-	18%
Solo Encaixante	34%	-	-	18%	48%

Desta análise constata-se que o solo argiloso apresenta níveis expressivos de mica muscovita em sua composição, o que se dá também em substituição à biotita. No entanto, parte da muscovita encontrada deve referir-se à biotita, visto

que nas análises de FRX constatou-se a presença de Fe em proporções significativas, elemento este que não compõe muscovitas.

Nos difratogramas das amostras orientadas (não mostrados neste trabalho) o único argilomineral identificado foi a caulinita. Em termos composicionais a caulinita é mais abundante que o quartzo, porém é muito menos representativa que o plagioclásio e a muscovita. É interessante a presença de plagioclásios nesta amostra, tendo em vista ser um mineral pouco resistente ao intemperismo.

O solo encaixante mostra-se bastante alterado, vide a ausência de feldspatos e grande representatividade das caulinitas em sua composição. Amostras obtidas em áreas mais afastadas da zona de ocorrência das argilas contém quantidades mais expressivas de feldspato. As detecções de  $Fe_2O_3$  nas análises de FRX podem ser creditadas à ocorrência de biotita. O principal pico do difratograma ocorre para o quartzo em  $2\theta=26^\circ$ , enquanto que sob  $2\theta=9^\circ$  e  $2\theta=12,5^\circ$  registram-se os picos para biotitas e caulinitas, respectivamente. Este pico de caulinita repete-se nas análises orientadas natural e glicolada. Os difratogramas das amostras orientadas mostram ainda pequenos picos de illita.

#### 4.2. Caracterização geotécnica

Na Tabela 3 são sumarizados os índices físicos e outras características geotécnicas dos solos investigados.

Tabela 3. Índices físicos dos solos estudados

	Argila	Solo encaixante
G	2,700	2,714
$W_{nat}$ (%)	25,4	35,0
$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	16,98
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	12,53
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	17,72
E	-	1,12
Sr (%)	-	85,7
LL	60	51
IP	30	13
I.A.	0,75	0,94
Classificação USCS	CH	MH

Em termos de densidade real das partículas, o solo encaixante mostra valores ligeiramente maiores, o que se deve, à maior presença de Fe em sua composição. A umidade natural mostrava-se, quando da coleta das amostras, mais elevada no solo encaixante, apesar de ser menos fino, como atestam as curvas granulométricas mostradas na Figura 7.

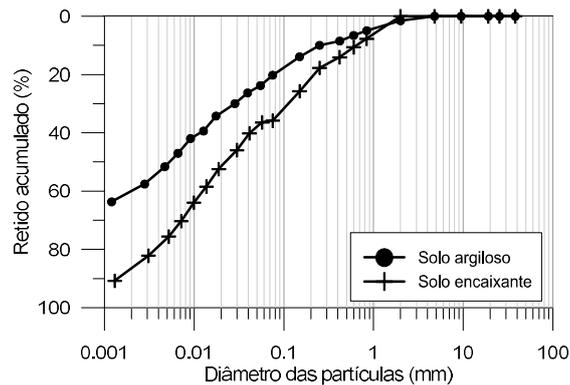


Figura 7. Granulometria dos solos investigados

A natureza argilosa do solo de origem hidrotermal manifesta-se sobre os limites de consistência, e se reflete em valores mais elevados de limite de liquidez e plasticidade, culminando em um material com índice de plasticidade substancialmente maior. As argilas presentes no solo encaixante são, no entanto, mais ativas, conforme índices de atividade calculados.

Com base na classificação SUCS, realizada a partir da consistência e granulometria, ambos os solos são materiais considerados de alta plasticidade. O solo argiloso é classificado como uma argila inorgânica de alta plasticidade (CH), ao passo que o solo encaixante é considerado um silte inorgânico de alta plasticidade (MH).

Do ponto de vista do comportamento mecânico, ensaios de cisalhamento torcional (*ring shear*) foram executados na argila e no solo encaixante. Os resultados dos ensaios *ring shear* executados no solo encaixante são mostrados na Figura 8.

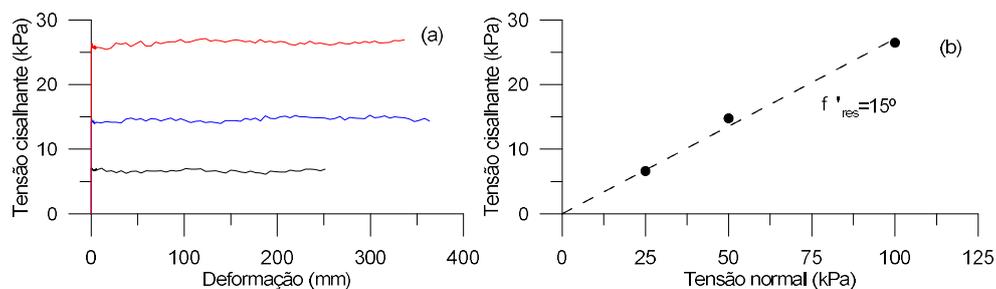


Figura 8. Resultado dos ensaios *ring shear* no solo encaixante.

O ensaio executado sob tensão normal de 25 kPa requereu deformação menor que as atingidas nos ensaios sob  $\sigma'_v$  de 50 e 100 kPa, sendo as curvas tensão x deformação pouco irregulares.

Os níveis de tensão cisalhante medidos nestes ensaios resultam em um ângulo de atrito residual da ordem de  $15^\circ$ . Este ângulo de atrito pode ser considerado razoavelmente baixo, o que se dá provavelmente por causa da importante quantidade de micas na composição do solo, as quais tendem a reduzir a parcela de resistência ao cisalhamento de natureza friccional. Este valor de  $\phi'_r$  foi obtido para uma envoltória de ruptura passando pela origem, vide Figura 8b.

Na Figura 9 são mostrados os resultados dos ensaios *ring shear* na argila.

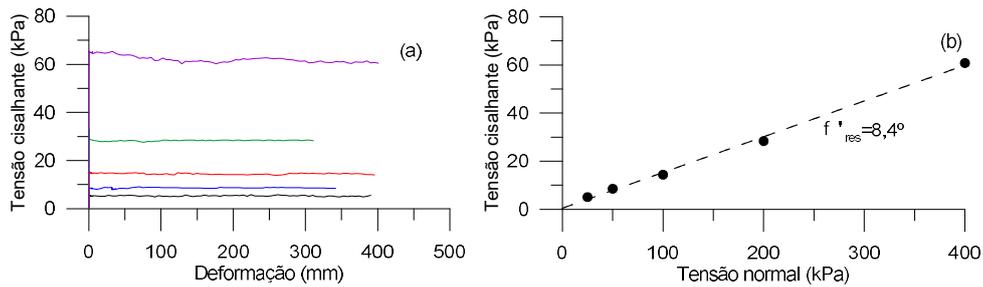


Figura 9. Resultado dos ensaios ring shear no solo ArBr.

Em geral foram necessárias deformações de até 300 mm para confirmar a mobilização da resistência residual. Por conta da magnitude das deformações, houve expressiva perda de material ao longo do ensaio, o que provocou, por exemplo, grande oscilação das tensões cisalhantes medidas, principalmente, para altas tensões verticais.

Ainda assim, tomando os trechos finais e estáveis dessas curvas, foi possível estabelecer uma envoltória de ruptura (Figura 9b) com  $r^2$  da ordem de 0,99. Esta envoltória mostra um ângulo de atrito residual de  $8,4^\circ$ . A magnitude deste parâmetro é significativamente baixa, comparável aos menores valores já medidos em solos residuais e coluvionares do sul do Brasil, como em solos de basalto e riolito (RIGO, 2005), solos de granulito (HEIDEMANN, 2011) e colúvios de basalto (NICHEL, 2011).

A reduzida resistência deste solo em condição residual pode ser explicada pela mineralogia do material. O solo é rico em partículas argilosas e micáceas (neste caso muscovita). Ao sofrer cisalhamento tais partículas tendem a se reorientar de forma a se posicionarem de maneira paralela entre si, tendo em vista o formato lamelar das mesmas.

Na Figura 10 são mostradas imagens do solo argiloso, obtidas em um microscópio eletrônico (MEV), as quais foram produzidas a partir de fragmentos de solo extraídos de um corpo de prova de ensaio *ring shear*, posterior ao ensaio.

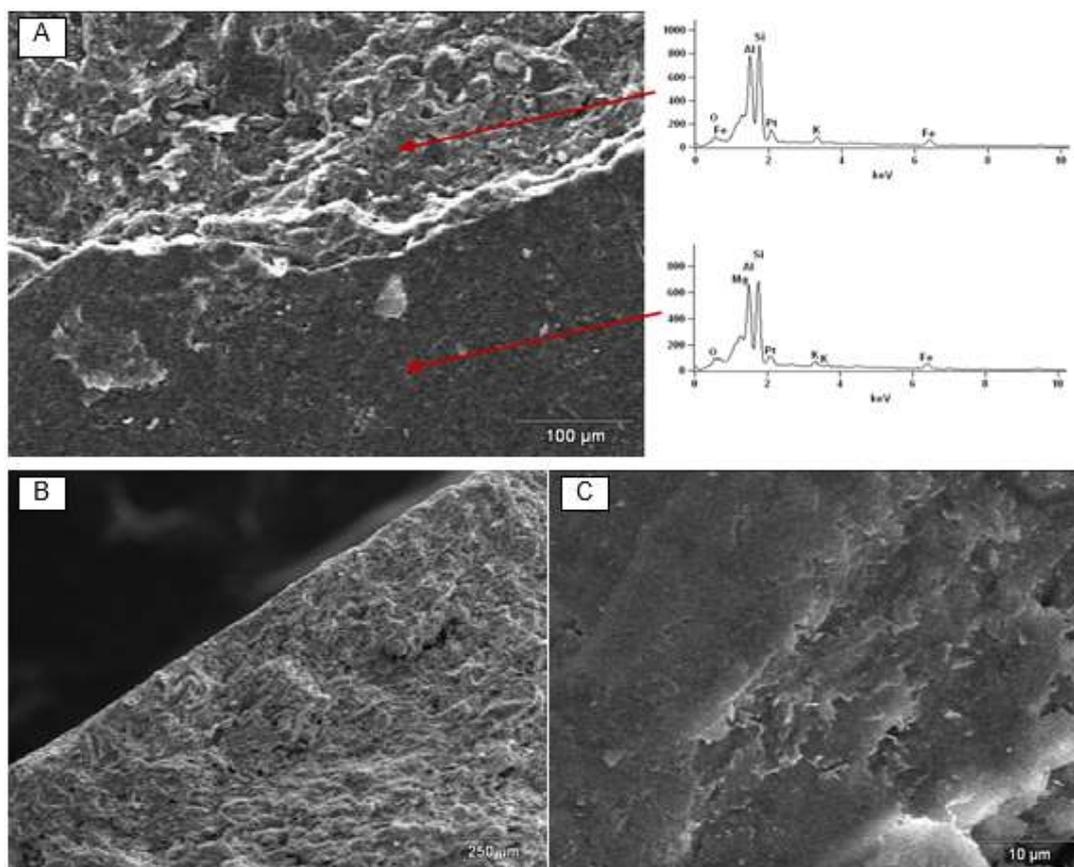


Figura 10. Imagens de MEV do solo argiloso.

Por meio das Figuras 10A e 10C pode se verificar que há clara reorientação das partículas de solo durante o ensaio. A reorientação das partículas pelo cisalhamento concentra-se, contudo, na superfície do corpo de prova, não se estendendo a maiores profundidades. Na Figura 10C fica evidente também o formato lamelar do material, ao menos aquele que se concentra na face do corpo de prova. A partir dos difratogramas obtidos por EDS, mostrados na Figura 10A, percebe-se a ocorrência de elementos químicos que indicam a presença de biotita, muscovita e caulinita neste material. Na figura 10B observa-se uma imagem da seção transversal de um dos corpos de prova usado no ensaio de *ring shear*, indicando que há reorientação de partículas em toda a porção superficial do corpo de prova.

## 5. CONCLUSÕES

As alterações hidrotermais sofridas pelo solo local, bem como a ação do fluxo ao longo de zonas de descontinuidade promoveu o desenvolvimento de veios preenchidos por um solo argiloso, rico em caulinita e muscovita. A mineralogia deste material é expressivamente diferente daquela apresentada pelo solo residual encaixante, apesar de as análises químicas não indicarem diferenças tão claras. Um indicativo da ação dos veios argilosos como receptores de cátions lixiviados do

solo local é a maior presença de Na<sub>2</sub>O e CaO neste material em relação ao solo encaixante.

O solo argiloso apresenta resistência ao cisalhamento em condição residual dada por  $\phi'_r=8^\circ$ . Este baixo ângulo de atrito deve-se à natureza argilosa do material e à presença de minerais micáceos. O formato notadamente lamelar das micas e argilas favorece a ocorrência de reorientação das partículas durante o cisalhamento, tornando a superfície de cisalhamento bastante polida, o que resulta em baixo atrito, conforme expresso pelo ângulo de atrito medido.

O material encaixante tem maior resistência em condição residual ( $\phi'_r=15^\circ$ ) o que se deve à sua granulometria predominantemente siltosa.

A forma com que se dá a ocorrência do solo argiloso na encosta estudada, constituindo-se em zonas de descontinuidade, assim como a baixa resistência ao cisalhamento remetem à possibilidade de que a estabilidade da encosta seja influenciada pela resistência ao cisalhamento em condição residual deste solo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e CNPq pelo fomento à pesquisa e às bolsas de pesquisa, ao Instituto de Geociências da UFRGS, ao Centro Tecnológico de Joinville e Departamento de Geologia da UFSC e ao PPGEC-UFRGS pelo suporte oferecido.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D6467: **Torsional ring shear test to determine drained residual shear strength of cohesive soils**. 6p. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: **Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro. 6p. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: **Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica**. Rio de Janeiro. 8 p. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: **Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro. 3p. 1984

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **Análise granulométrica**. Rio de Janeiro 13 p. 1984.

BAYNES F.J.; DEARMAN, W.R.; IRFAN, T.Y. **Practical assessment of grade in a weathered granite**. Eng. Geol., n. 18. pp. 101-109. 1978.

- BITENCOURT, M.F. et al. **Estratigrafia do batólito Florianópolis, Cinturão Dom Feliciano, na região de Garopaba-Paulo Lopes, SC.** Revista Pesquisas em Geociências, n. 35, v. 1. pp. 109-136. 2008
- BROMHEAD, E. N. **A simple ring shear apparatus.** Ground Eng., v.12, n.5. pp. 40-44. 1979.
- DEARMAN, W.R.; BAYNES, F.J.; IRFAN, T.Y. **Engineering grading of weathered granite.** Eng. Geol., n. 12 pp. 345-374. 1978.
- DOBEREINER, L.; DURVILLE, J.L.; RESTUITO, J. **Weathering of the massiac gneiss (Massif Central, France).** Eng. Geol., n.47. pp. 89-96. 1993.
- EVANS, J.P.; CHESTER, F.M. **Fluid-rock interaction and weakening of faults of the San Andreas system: inferences from San Gabriel fault-rock geochemistry and microstructures.** Journal of Geophysical Research, n. 100, pp. 13007-13020. 1995.
- IRFAN, T.Y. **Fabric Variability and index testing of a granitic saprolite.** In: Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils, v.1. p.25-35. 1988.
- IRFAN, T.Y. **Mineralogy and fabric characterization and classification of weathered granitic rocks in Hong Kong.** GEO Report n°41, Honk Kong, 159 p. 1994.
- IRFAN, T.Y. **Structurally controlled landslides in saprolitic soils in Hong Kong.** Geotech. Geol. Eng., n.16. pp. 215-238. 1998.
- IRFAN, T.Y.; WOODS, N. **The influence of relict discontinuities on slope stability in saprolitic soils.** In: Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils, v.1. pp. 267-276. 1988.
- JANECKE, S.U.; EVANS, J.P. **Feldspar-influenced rock rheologies.** Geology, n.16. pp. 1064-1067. 1988.
- KUVA, J. et al. **Microstructure, porosity and mineralogy around fractures in Olkiluoto bedrock.** Eng. Geol., n. 139-140 pp. 28-37. 2012.
- RAIMUNDO, H.A., SANTOS, G.T.; DAVISON DIAS, R. **Aspectos geotécnicos do contato granito/diabásio associados à instabilidade de encostas em Florianópolis – SC.** In: III Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Editora Palloti, Porto Alegre. pp. 251-263. 2002.
- REGMI, A.D.; YOSHIDA, K.; DHITAL, M.R.; DEVKOTA, K. **Effect of rock weathering, clay mineralogy, and geological structures in the formation of large landslide, a case**

**study from Dumre Besei landslide, Lesser Himalaya Nepal.** Landslides, n.10, pp. 1-13. 2013.

THOMPSON, G.R.; TURK, J. **Introduction to Physical Geology.** BrooksCole, Boston. 432 p. 1997.

WIBBERLEY, C. **Are feldspar-to-mica reactions necessarily reaction-softening processes in fault zones?** Journal of Structural Geology, n. 21 pp. 1219-1227. 1999.

WINTSCH, R.P.; CHRISTOERSEN, R.; KRONENBERG, A.K. **Fluid-rock reaction weakening of fault zones.** Journal of Geophysical Research, n.100, pp. 13021-13032. 1995.

WOLLE, C.M. **Estabilidade de Encostas Naturais em Solos Tropicais.** In: Colóquio Solos Tropicais e suas aplicações na Engenharia. Porto Alegre. 1985.

**ABSTRACT:** This paper presents the chemical and mineralogical composition, as well as shear strength measurements in residual condition, of a soil originated under hydrothermal activity. This material occurs in a hilly area in São José - SC, where the massif of residual soil of granite is pierced by veins filled with a clay. This clay is rich in kaolinite and muscovite, although the presence of biotite is also possible. The formation of this clay is related to the muscovitization process that affects feldspar presents in the parent rock and residual soil, and the leaching of easily removed cations, allowing the development of kaolinite. This soil is classified as a high-plasticity clay (CH). In which concerns to the shear strength, a residual friction angle of  $8^\circ$  was measured through ring shear tests, and may be considered a low value, if compared with the friction angles earlier measured in other soils of southern Brazil. This low friction angle seems to be reached because the soil particles align parallel to each other, as shown by SEM images. In volumetric terms, the clay soil isn't very representative, but the way that its occurs in the studied slope, constituting discontinuity zones, as well as the low shear strength, refers to the possibility that the slope stability could be influenced by residual shear strength of this soil.

**KEYWORDS:** residual shear strength; hydrothermal alteration, muscovite, clay, granite.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-93243-39-4



9 788593 243394