



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

# RBGEA

## REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Volume 13 (02)

2023

ISSN 2237-4590



**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**

Prof. Dra. Alessandra Cristina Corsi – IPT  
Prof. Dr. Eduardo Soares de Macedo – IPT  
MSc. Erik Wunder – Estelar Engenheiros Associados

### **REVISORES**

Adalberto Aurélio Azevedo – Consultor	José Eduardo Zaine – UNESP
Alberto Pio Fiori – UFPR	José Luiz Albuquerque Filho – IPT
Aline Freitas da Silva – DRM-RJ	Leonardo Andrade de Souza - Zemlya
Ana Elisa Silva de Abreu - UNICAMP	Leandro Eugênio da Silva Cerri – UNESP
Andrea Valli Nummer –UFMS	Luis de Almeida Prado Bacellar – UFOP
Candido Bordeaux Rego Neto – IPUF	Luiz Fernando D’Agostino – Núcleo
Clovis Gonzatti – CIENTEC	Luiz Nishiyama – UFU
Denise de la Corte Bacci – USP	Malva Andrea Mancuso – UFMS
Diana Sarita Hamburger – UFABC	Marcilene Dantas Ferreira – UFSCar
Edilson Pissato – USP	Marcio A. Cunha – Consultor
Eduardo Goulart Collares – UEMG	Marcio Fernandes Leão
Emilio Velloso Barroso – UFRJ	Maria Heloisa B.O. Frascá – Consultora
Eraldo L. Pastore – Consultor	Marta Luzia de Souza – UEM
Fábio Soares Magalhães – Walm Engenharia	Nelson Meirim Coutinho – GEORIO
Fabricio Araujo Miranda – IPT	Newton Moreira de Souza – UnB
Filipe Antonio Marques Falcetta – IPT	Noris Costa Diniz -UnB
Frederico Garcia Sobreira – UFOP	Omar Yazbek Bitar - IPT
Gerson Salviano Almeida Filho - IPT	Otávio Coaracy Brasil Gandolfo – IPT
Helena Polivanov – UFRJ	Romildo Dias Moreira Filho
Ivan José Delatim – SIGA	Reinaldo Lorandi – UFSCar
João Francisco Alves Silveira – Consultor	Ricardo Vedovello – IG/SMA
Jorge Kazuo Yamamoto – USP	Wilson Shoji Iyomasa - IPT
José Augusto de Lollo – UNESP	

### **APOIO EDITORIAL**

Denise Amaral

### **PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO**

Rita Motta – Editora Tribo da Ilha

---

**Volume 13 (02)**

2023

ISSN 2237-4590



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

### **DIRETORIA ABGE GESTÃO 2023/2024**

**PRESIDENTE:** Fábio Soares Magalhães

**VICE-PRESIDENTE:** Erik Wunder

**DIRETOR SECRETÁRIO:** Sergio Sussumu Tokudo

**DIRETOR FINANCEIRO:** Adalberto Aurélio Azevedo

**DIRETORA DE EVENTOS:** Ana Elisa Silva de Abreu

**DIRETORA DE COMUNICAÇÃO:** Lilian Pimentel

**Conselho Deliberativo:** Fábio Soares Magalhães, Erik Wunder, Sergio Sussumu Tokudo, Adalberto Aurélio Azevedo, Ana Elisa Silva De Abreu, Lilian Pimentel, Luiz Antonio Pereira de Souza, Otávio Coaracy Brasil Gandolfo, Joao Luiz Armelin, João Antônio Curtis, Luiz Alberto Minicucci, Malena D' Elia Otero, Iramir Barba Pacheco, Sergio Augusto De Arruda Camargo, Mauro Gomes Dos Santos Filho, Romildo Dias Moreira.

**Conselho Consultivo:** Delfino Luiz Gouveia Gambetti (Presidente), Adalberto Aurélio Azevedo, Carlos Manoel Nieble, Fernando Facciola Kertzman, Fernão Paes de Barros (in memorian), Jayme de Oliveira Campos, Giácomo Ré, Guido Guidicini, Kenzo Hori, João Jerônimo Monticelli, Luiz Ferreira Vaz (in memorian), Luiz Francisco Saragiotto, Maria Heloísa Barros de Oliveira Frascá, Murillo Dondici Ruiz (in memorian), Nivaldo José Chioffi, Tarcísio Barreto Celestino e Wilson Shoji Yiomasa.

#### **NÚCLEO RIO DE JANEIRO/ESPÍRITO SANTO**

Conselho Deliberativo: Aline Pimentel da Silva, Ana Caroline Duarte Dutra, Giovanna Tristão R. da Cunha, Larissa Mozer, Raquel Batista M. da Fonseca e Rodrigo Ferreira Franca.

#### **NÚCLEO MINAS GERAIS**

Conselho Deliberativo: Alberto Ferreira do Amaral Junior, Angelo Almeida Zenobio, Bruno Felipe Roepke, Diego Moreira da Silva, Ellen Delgado Fernandes, Frederico Nascimento Mendes Bezerra, Maria Giovana Parizzi, Michele Aparecida Flores Costa, Reuber Ferreira Cota, Yan Lucas de O. P. Santos e Walter Dos Reis Junior.

#### **NÚCLEO SUL**

Conselho Deliberativo: Adelir José Strieder, Andréa Nummer, Cezar Augusto Burkert Bastos, Débora Lamberty, Karina R. Camargo, Malva Andrea Mancuso e Marcos A. Musso Laespiga.

#### **NÚCLEO CENTRO OESTE**

Conselho Deliberativo: Bruna M. Cruz Fernandes, Caiubi Emanuel Souza Kuhn, Ingrid Ferreira Lima, Patrícia de Araújo Romão e Rodrigo Luiz Gallo Fernandes.

#### **NÚCLEO NORTE**

Conselho Deliberativo: Claudio Fabian, Dianne D. F. Fonseca, Elton Rodrigo de Andretta, Iris Celeste N. Bandeira, José Sidney Barros e Sheila G. Teixeira.

#### **SECRETARIA ABGE**

Gerente Executiva: Luciana Marques

Assistente Editorial: Denise Amaral

Assistente Administrativo: Kauany Santos

Assistente Administrativo: Vanessa Oliveira

Auxiliar Administrativo: Emilly Mendes

Auxiliar de Comunicação: Gabriele Lima

Av. Prof. Almeida Prado, 532 | Prédio 59 | Cidade Universitária | São Paulo - SP

Fones: (11) 3767-4361 | (11) 98687-6560

E-mail: [abge@abge.org.br](mailto:abge@abge.org.br) | Site: [abge.org.br](http://abge.org.br)



# SUMÁRIO

## 5 APRESENTAÇÃO

### ARTIGOS CIENTÍFICOS

## 7 CALIBRAÇÃO DE MODELO NUMÉRICO POR MEIO DE EVIDÊNCIAS PARA PREDIÇÃO DE EVENTOS DE INSTABILIDADE

*Gustavo Antonio Pereira Batista*

*André Pacheco de Assis*

*Kobus du Plooy*

*Jairo Henrique Da Silva*

*Paulo André Charbel*

## 18 PIPING E LIQUEFAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA: DESAFIOS PARA A SEGURANÇA DE BARRAGENS

*Felipe Alves Fernandes Garcia*

## 33 ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO DE BANCO DE DADOS DE SONDAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOMECÂNICO DE UMA CAVA DO QUADRILATERO FERRÍFERO

*Orlando Faria Prado*

*Murilo da Silva Espíndola*

*Cristian Nunes Estevam*

## 47 REVISÃO SOBRE AS APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO BRASIL

*Maitê Milléo Almeida*

*Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger*

*Bianca Penteado de Almeida Tonus*

### NOSSA HISTÓRIA

## 55 POR MENOS ENSAIOS E INSTRUMENTAÇÕES E POR UMA MAIOR OBSERVAÇÃO DA NATUREZA

*Álvaro Rodrigues dos Santos*



# APRESENTAÇÃO

Estamos apresentando a segunda edição de 2023 da RBGEA – Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, a revista da ABGE. Nesta edição reunimos quatro artigos técnico-científicos e um artigo histórico.

O primeiro desses artigos, de Gustavo Antonio Pereira Batista e colegas, propõe metodologia de retroanálise por meio de interpretações 3D de juntas ubíquas e seus impactos na prevenção da diluição em lavra de veios estreitos, visando a calibração de modelo numérico por meio de evidências para predição de eventos de instabilidade.

Já Felipe Alves Fernandes Garcia apresenta vários estudos sobre piping e liquefação em barragens de terra visando a segurança de barragens.

O terceiro artigo, de autoria de Orlando Faria Prado, Murilo da Silva Espíndola e Cristian Nunes Estevam, afirma que a validade dos dados é fundamental para a produção de modelos tridimensionais acurados e, analisar sua qualidade, é uma lacuna corriqueira em projetos geomecânicos. O estudo visou então abordar essa lacuna, focando na avaliação da consistência de um banco de dados geomecânicos, sua validação e análises. Utilizando dados de uma mina brasileira, agora inativa, aplicaram critérios de classificação geomecânica para criar um modelo tridimensional geomecânico de uma cava hipotética.

O artigo de Maitê Milléo Almeida, Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger e Bianca Pen-

teado de Almeida Tonus apresenta extensa pesquisa bibliográfica para revisão sobre as aplicações geotécnicas de lodo de estação de tratamento de água no Brasil.

Na seção Nossa História, revemos o importante artigo do geólogo Álvaro Rodrigues dos Santos, “Por Menos Ensaios e Instrumentações e por uma Maior Observação da Natureza”, publicado originalmente no 1º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, em 1976. Essa publicação se dá em função das discussões e debates no Grupo 1 – Geologia de Engenharia e Ambiental, que a ABGE montou na plataforma Whatsapp e que é coordenado pelo Álvaro.

Relembramos que tivemos uma ótima notícia da última avaliação da Capes sobre as revistas científicas. A nossa RBGEA está agora classificada como B-2 nas áreas de Geociências, Engenharias I e II, Ciências Ambientais, Geografia, e Arquitetura, Urbanismo e Design. Com isso esperamos que os colegas da academia enviem mais artigos para publicação.

Participe de nossa revista enviando seu artigo técnico, seu texto de reflexão, seu comentário ou sua sugestão para que possamos juntos fazer da RBGEA a revista de divulgação e integração da Geologia de Engenharia e Ambiental no Brasil.

Desejamos a todos uma ótima leitura.

---

# ARTIGOS CIENTÍFICOS

# CALIBRAÇÃO DE MODELO NUMÉRICO POR MEIO DE EVIDÊNCIAS PARA PREDIÇÃO DE EVENTOS DE INSTABILIDADE

CALIBRATION OF NUMERICAL MODELS THROUGH EVIDENCE FOR PREDICTION OF INSTABILITY EVENTS

GUSTAVO ANTONIO PEREIRA BATISTA

*MSc. Geotechnical Engineer, Perth, Austrália, GAPBatista@gmail.com*

ANDRÉ PACHECO DE ASSIS

*Professor Dr., Universidade de Brasília - UNB, Brasília, Brasil, AAssis@unb.br*

KOBUS DU PLOOY

*Geotechnical Engineer, AngloGold Ashanti, Perth, Austrália, KDPlooy@anglogoldashanti.com*

JAIRO HENRIQUE DA SILVA

*Engenheiro Geotécnico, AngloGold Ashanti, Crixás, Brasil, JHSilva@anglogoldashanti.com.br*

PAULO ANDRÉ CHARBEL

*Professor Dr., Instituto Federal de Goiás - IFG, Goiânia, Brasil, Paulo.Charbel@ifg.edu.br*

## RESUMO ABSTRACT

A diluição não planejada representa um dos fatores que mais impactam economicamente a indústria da mineração. O seu aumento torna o processo de escavação instável podendo inviabilizar áreas de lavra. A predição de eventos de instabilidade não desejados em uma mina subterrânea pode se dar a partir da aplicação do conceito de retroanálise, a fim de proceder com a calibração do modelo. Nesse contexto, é apresentado uma metodologia de retroanálise por meio de interpretações 3D de juntas ubíquas e seus impactos na prevenção da diluição em lavra de veios estreitos pelo método sublevel stoping, bem como os resultados da calibração dos parâmetros de resistência do maciço em áreas escavadas a 750 m de profundidade utilizando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os parâmetros de resistência do maciço foram calibrados utilizando um método probabilístico, respeitando a heterogeneidade natural do maciço rochoso e quantificando o dano causado a partir da probabilidade de ruptura. Os estudos corroboram para a importância da aplicação de uma metodologia adequada na previsão do comportamento do maciço, sendo considerada fator essencial para o desenvolvimento de projetos de suporte assertivos e

Unplanned ore dilution represents one of the main factors that economically impact in the mining industry. Its increasing turns the excavation process unstable and it can also turn the stoping areas unfeasible from an economic perspective. The prediction of non-desired instability events in an underground mine, can be done by applying the concepts of back analyses, through keeping a constant model calibration. In this context, a methodology to back analyze by 3D interpretations of ubiquitous joints, their impacts in the prevention of non-planned dilution, along narrow stopes performed through the method sublevel stoping. As also, the calibration results applied for the rock mass resistance parameters, in excavated areas, at a depth of 750m, utilizing the Mohr-Coulomb failure criterion. The rock mass resistance parameters were calibrated utilizing the probabilistic method, respecting the natural heterogeneity of the rock mass and quantifying the caused damage, from the failure probability. This study corroborates highlighting the importance of applying an adequate methodology for forecasting the rock mass, being an essential factor for projecting

consequentemente a causa para a elevação dos índices de segurança.

**Palavras-chave:** Diluição não planejada, Modelagem numérica, Método probabilístico, Escavação subterrânea, Juntas Ubíquas.

## 1. INTRODUÇÃO

A Mineração Serra Grande (MSG), pertencente ao grupo Anglo Gold Ashanti, está localizada na cidade de Crixás, a noroeste do estado de Goiás, distante 320 km de Goiânia e 400 km de Brasília. Atualmente a MSG conta com 3 minas subterrâneas e 2 minas a céu aberto ativas, sendo as operações de subsolo responsáveis por 85% da produção da unidade. O método de lavra Sublevel Open Stope tem sido amplamente utilizado nas minas da MSG, contribuindo atualmente com mais de 80% da produção planejada.

Charbel (2015), descreve que a diluição na mineração é definida como a contaminação do minério com rocha estéril, provocando uma redução do teor da substância útil no minério lavrado. Na lavra subterrânea ela pode ser dividida em diluição planejada, interna ou primária, e diluição não planejada, externa operacional ou secundária. A diluição planejada representa a rocha estéril, situada dentro dos limites de lavra planejada. A diluição não planejada ou operacional consiste no estéril que se posiciona além dos limites do realce planejado. O seu aumento acarreta um acréscimo nos custos de carregamento de transporte, tratamento de minério e deposição do rejeito podendo inviabilizar algumas áreas de lavra.

A diluição não planejada pode ter como origens principais a instabilidades do maciço rochoso, seja estrutural ou por redistribuição de tensões, ou erros operacionais, como por exemplo, aqueles que se referem ao processo de perfuração e desmonte do realce. Para uma melhor dinâmica na leitura a diluição não planejada será descrita apenas como diluição.

Com intuito de determinar os parâmetros de resistência das juntas de uma região instável, esse artigo apresenta dois estudos de casos da Mina 3, jazida de maior importância da MSG, em profundidades de 750 m que contemplou diluição supe-

assertive support systems and consequently, being a main reason for elevating the safety levels.

**Keywords:** Unplanned Dilution, Numeric Modelling, Probabilistic Method, Underground Excavation, Ubiquitous Joint.

rior a 100% e conteve a geometria do *hangingwall* (HW) controlada pelas estruturas que compõem o maciço rochoso. O primeiro exemplo será intitulado como INT 722 retratando uma região a 720 m de profundidade e o segundo será tratado como INT 742 a uma profundidade de 740 m.

O painel de lavra a 750 m de profundidade da Mina 3 é caracterizada pela ocorrência de um veio de quartzo contínuo e aurífero em sua base com espessura entre um a três metros e com 100 a 150 m de comprimento. O veio ocorre entre uma zona cisalhante de caráter rúptil-dúctil localizada no interior do pacote metassedimentar hospedado por xisto carbonoso. O minério de forma geral apresenta mergulho variando de 60° a 70° e o método de lavra é *Sublevel Open Stope, Top-Down*, sem uso de *rock-fill* para estabilidade.

Os testes em laboratórios permitem obter os parâmetros do maciço rochoso anisotrópico, cuja variabilidade de suas propriedades físicas é extremamente grande e imprevisível. Dessa forma, o uso de um banco de dados coletados em uma região distante da região em que se deseja analisar está sujeito a erros. Devido a isso, os modelos tridimensionais baseados em retroanálise tornam-se uma ferramenta eficaz para calibrar os parâmetros do maciço rochoso local.

O nível de precisão dos modelos pode ser medido por meio da realização de retroanálises para determinar quanto esses modelos podem corresponder ao comportamento observado da mina. Um exemplo de como proceder com retroanálise é descrito por Batista (2019), demonstrando técnicas de modelagem numérica aplicada a ambientes de mineração para obtenção de áreas instáveis.

Wiles (2006), descreve que a razão pela qual executam modelos numéricos é a tentativa de determinar por que as instabilidades ocorreram no passado e prever quando elas ocorrerão no futuro, para que seja possível evitar problemas e realizar um melhor planejamento.

O entendimento do estado de tensões em um maciço rochoso e o seu comportamento diante de uma escavação, muitas vezes constituem situações de grande complexidade e sua análise por métodos analíticos convencionais são, em geral, simplistas e distantes da realidade. Por isso, técnicas de modelagem numérica têm sido amplamente utilizadas como ferramentas para o estudo do comportamento de maciços rochosos, com representação de geometrias de mina mais próximas à realidade e com o uso de equações matemáticas.

## 2. OBJETIVO

O objetivo é apresentar a retroanálise por meio de interpretações tridimensionais das juntas ubíquas e seus impactos na prevenção da diluição não planejada em lavras estreitas pelo método *sublevel stoping*, bem como os resultados da calibração dos parâmetros de resistência do maciço utilizando o método probabilístico, respeitando a heterogeneidade natural do maciço rochoso e quantificando o dano causado a partir da probabilidade de falha utilizando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

## 3. METODOLOGIA

Sabe-se que o entendimento do estado de tensões em um maciço rochoso, o seu comportamento diante de uma escavação e, conseqüentemente, a interação entre escavações, muitas vezes constituem situações de grande complexidade e sua análise por métodos analíticos convencionais são, em geral, simplistas e distantes da realidade. Para Jager e Ryder (1999), um modelo permite considerar qualquer representação ou abstração de um sistema ou processo com a finalidade de definir e resolver um problema.

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb estabelece que a ruptura ocorre quando a tensão cisalhante num determinado ponto da amostra atinge a resistência ao cisalhamento do material, a qual depende de uma parcela coesiva ( $c$ ) e outra friccional ( $\varphi$ ). Conforme a amostra é comprimida com incremento de  $\sigma_1$ , a resistência ao cisalhamento será mobilizada para um plano inclinado assim como apresentado na Figura 1A. O valor da

resistência pode ser determinado pela equação 1, onde: ( $\tau_R$ ) é a resistência ao cisalhamento ao longo do plano de ruptura, ( $c$ ) é a coesão, ( $\sigma_n$ ) é a tensão normal atuando no plano de cisalhamento e ( $\varphi$ ) é o ângulo de atrito do plano de cisalhamento.

$$\tau_R = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

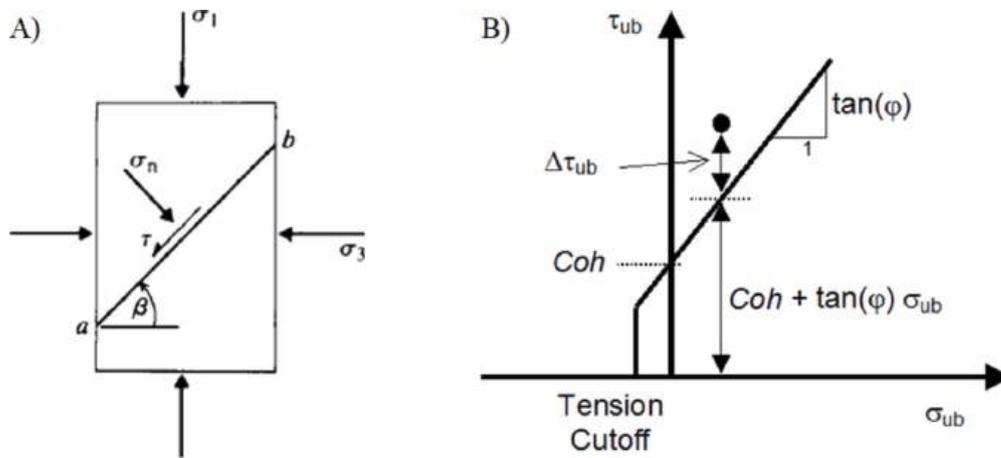
As componentes de tensão normal ( $\sigma_n$ ) e cisalhante ( $\tau$ ) atuantes no plano de cisalhamento podem ser determinadas por meio de trigonometria pelas equações 2 e 3, sendo ( $\sigma_1$ ) a tensão principal maior e ( $\sigma_3$ ) a tensão principal menor. Essa equação é frequentemente referida como critério Mohr-Coulomb e é aplicada em mecânica das rochas para ruptura por cisalhamento em rochas, juntas em rochas e maciços rochosos. O critério assume que a ruptura ocorre ao longo do plano sem nenhuma dilatação.

$$\sigma_n = 0.5(\sigma_1 + \sigma_3) + 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (2)$$

$$\tau = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \sen 2\beta \quad (3)$$

Na Figura 1B descreve-se graficamente o critério analisado. Na análise elástica, as tensões máximas de cisalhamento ( $\tau$ ) no plano ubíquo e tensão normal ( $\sigma_n$ ) configuram o estado de tensões na ruptura. Inserindo os valores de ( $\sigma_n$ ) e ( $\tau$ ) para os diversos valores de tensões normais em que foram realizados os ensaios, são encontradas envoltórias de Mohr-Coulomb onde a inclinação da reta representa o ângulo de atrito ( $\varphi$ ) e a interseção com o eixo das tensões cisalhantes ( $\tau$ ) representa a coesão ( $c$ ) do material. O critério é linear, mas como a rocha não pode suportar grandes tensões de tração, um corte de tensão é frequentemente incluído.

Na análise da ruptura de uma lavra, os planos instáveis foram rompidos e os planos estáveis estão preservados. Os valores na superfície do realce rompido correspondem às tensões principais atuantes naquela envoltória e descreve a curva intrínseca. Sendo assim, quando inserido no gráfico é possível obter coesão e ângulo de atrito determinando os parâmetros das juntas que condicionaram a instabilidade da lavra.



**Figura 1.** A) Ruptura por cisalhamento conforme o critério Mohr-Coulomb (Brady e Brown, 2004) e B) Critério de ruptura em termos de tensão normal e cisalhante (Map3D User's Manual).

Nos modelos serão analisadas as magnitudes das tensões cisalhantes quando excedidos à resistência da foliação por meio do parâmetro tensão cisalhante excedente (excess shear stress) ( $\tau_{ub}$ ). Para calcular as tensões cisalhante e normal nas juntas ubíquas, o estado de tensão na superfície analisada é reorientado para determinar a máxima tensão cisalhante no plano cisalhante ubíquo e a tensão normal a esse.

Se  $\tau_{ub}$  exceder a força cisalhante, então é uma região instável. Valores de  $\tau_{ub}$  que superam a força podem ser calculados conforme já descrito no círculo de Mohr-Coloumb na equação 4. Sendo assim, poderá apresentar o potencial de ruptura da seguinte maneira:

$$d\tau_{ub} = \tau_{ub} - (c + \sigma_n \tan \varphi) \quad (4)$$

Daemen (1983) desenvolveu uma formulação que permite a determinação das zonas de cisalhamento ao redor de túneis ou poços escavados em maciços rochosos interceptados por um sistema de juntas ubíquas paralelas à escavação, descrevendo que planos de fraqueza paralelos ou semi-paralelos ao eixo longitudinal de aberturas subterrâneas facilitam a instabilização das paredes. Na análise elástica, as  $(\tau)$  e  $(\tau)$  no plano ubíquo máximo podem ser usadas com o critério de resistência de Mohr-Coulomb para estimar a quantidade de escorregamento devido à sobretensão, em uma falha, conjunto de juntas ou plano de estratifica-

ção na orientação especificada. Uma vez que estes parâmetros são dependentes da orientação, este critério é representativo para a estabilidade do maciço rochoso anisotrópico, sendo assim mais apropriado para estudo de rochas foliadas, como é o caso da MSG.

Na calibração do modelo, foi utilizado o programa Map3D desenvolvido pela empresa canadense Map3D International Ltda. O programa Map3D é um código de elemento de contorno em três dimensões que permite modelagem de escavações tabulares e maciças em meios contínuos, elásticos e homogêneos. É indicado na modelagem tridimensional de maciços rochosos para avaliação de condições de instabilidade em escavações de geometrias complexas e irregulares. Barbosa (2010) exemplifica que este tem sido utilizado em diversos projetos de dimensionamento de mina subterrânea ou de superfície que requerem, por exemplo, sequenciamento de lavra, condição de estabilidade de taludes, rampas de acesso, retroanálise dos parâmetros do maciço, entre outros usos.

Este parâmetro pode ser exibido no Map3D usando "Plot> Strength Factors> dTub". Neste caso, os valores positivos de  $d\tau_{ub}$  são locais onde as tensões extrapolam a resistência - portanto, instáveis. Valores negativos de  $d\tau_{ub}$  são locais onde as tensões não excedem a resistência - assim, estáveis. Valores zero de  $d\tau_{ub}$  são locais onde as tensões são iguais à força. Como esse é um critério de melhor ajuste, os valores de  $d\tau_{ub}$  de zero indicam

apenas 50% de probabilidade de ruptura podendo ser calculada no Map3D usando “Plot > Strength Factors > NTub”.

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISES

A estruturação do modelo numérico no Map3D parte da construção da geometria da lavra planejada, devendo ocorrer o sequenciamento do modelo conforme o seu avanço. Para essa etapa foram utilizadas seções verticais para construção das áreas planejadas com pequenas simplificações da geometria, de forma que o resultado não fosse comprometido. A Figura 2 exemplifica os interníveis modelados no software e a sequência de lavra

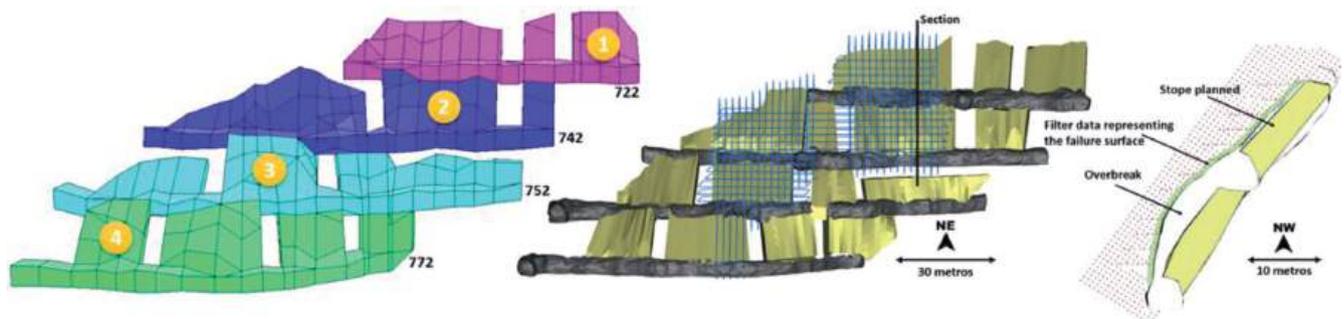
é ilustrada pelos números, sendo a primeira lavra o INT 722, sequenciado pelo INT 742 até a última sequência de lavra denominada pelo número quatro com a lavra do INT 772.

Em outubro/2016 análise de tensões *in situ* foi conduzida na Mineração Serra Grande por meio dos Ensaio de Fraturamento Hidráulico e os dados das principais tensões *in situ* baseado em todos os trabalhos já desenvolvidos na MSG são resumidos pelas equações 5, 6 e 7 assim como suas orientações respectivamente. Esses resultados são utilizados como premissa no modelo numérico para obter os novos estados de tensões na superfície do overbreak e a calibração dos parâmetros de resistência do maciço.

Magnitude	Plunge/Bearing	Stress at 750mRL
$\sigma_1 = 0,049 \times \text{Depth} + 11$ (5)	00°/330°	47,7 MPa
$\sigma_2 = 0,032 \times \text{Depth} + 7$ (6)	00°/150°	31,0 MPa
$\sigma_3 = 0,028 \times \text{Depth}$ (7)	90°/060°	21,0 MPa

Os planos de análise foram inseridos apenas na região de maior diluição. Para os dois exemplos que serão analisados, as seções de análise são espaçadas a cada 2 m e sua construção respeita o sequenciamento da lavra. As seções verticais e horizontais contém malha pequena o suficiente para garantir que seja possível determinar o contorno da região instável, garantindo a qualidade

da informação. O passo seguinte é manipular os dados no software Gem4D, o qual irá representar os dados de modelagem do Map3D. Os dados analisados devem conter apenas aqueles que encontram no contato da escavação final (Figura 2 - Seção), região de transição do meio estável para o instável.



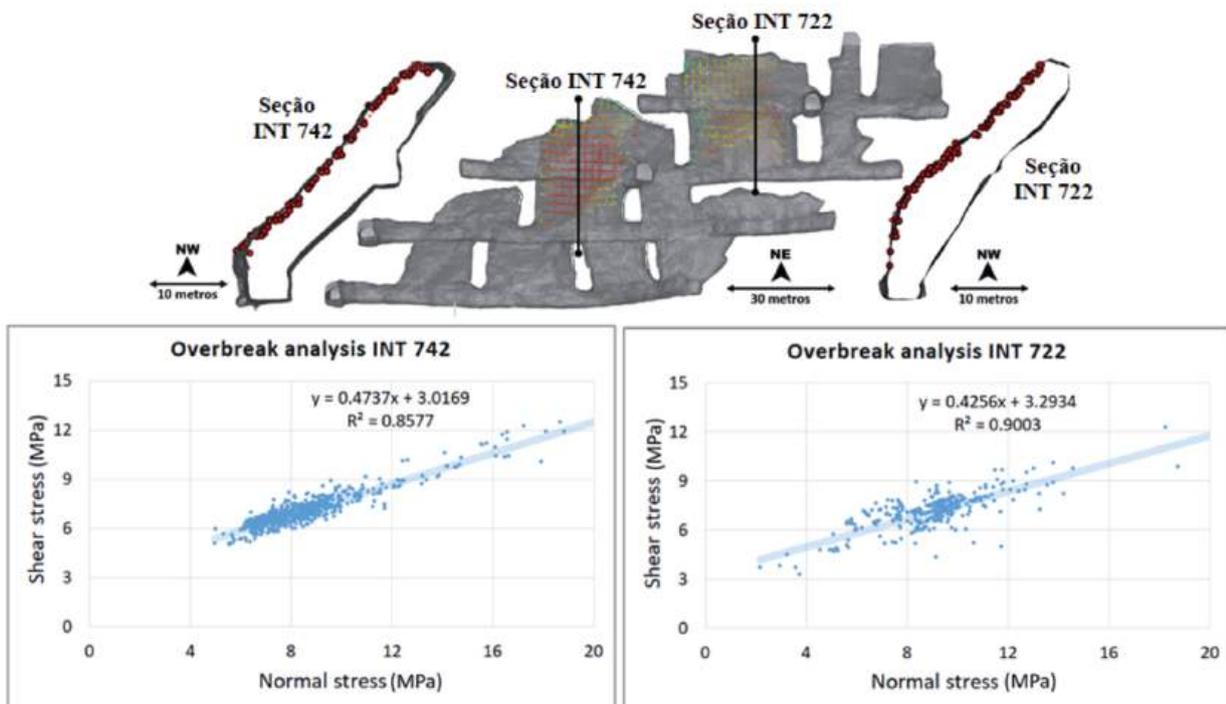
**Figura 2.** Construção do modelo numérico no software Map3D e a sequência de extração inúmeros de 1 a 4. As seções analisadas devem coincidir com a superfície do realce executado, layout final da lavra.

Os dados analisados contêm apenas aqueles que estão no contato da escavação final, a fim de identificar os parâmetros de tensão normal ( $\sigma_n$ ) e cisalhante ( $\tau$ ) na superfície da ruptura real. Assim, é possível determinar os valores reais de coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ). Na Figura 3 é possível identificar todos os pontos analisados para o INT 722 e INT 742 e suas seções em relação à superfície de quebra.

Os valores de coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ) obtidos por retroanálise do INT 722 foram, respectivamente, 3,29 MPa e 23,1° (Figura 3). A cor-

relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal mostrou um resultado relevante, indicando confiabilidade de 90%, o que permite classificar a avaliação como representativa.

O segundo estudo de caso contempla a retroanálise do INT 742. A análise realizada apresentou um valor de coesão ( $c$ ) de 3,02 MPa e ângulo de atrito ( $\phi$ ) de 25,3° (Figura 3). Os resultados obtidos apresentaram confiabilidade de 85%, inferior ao primeiro caso, contudo uma dispersão baixa sendo bastante representativa.



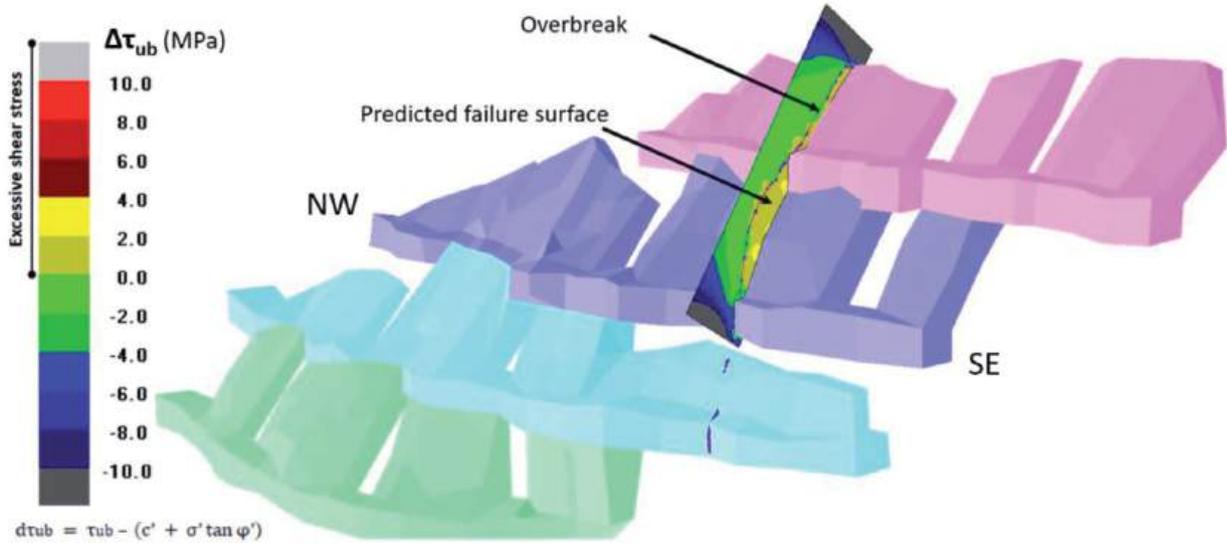
**Figura 3.** Painel do INT 750 evidenciando os pontos analisados. O critério de ruptura do INT 722 e INT 742 correspondem a 90% e 86% de confiabilidade respectivamente. Os gráficos representam os valores de tensão cisalhamento e tensão normal utilizados para determinar o ângulo de atrito e a coesão.

Após a obtenção dos resultados, o valor da coesão e do ângulo de atrito dessas análises foram aplicadas no software Map3D com intuito de verificar se a superfície de instabilidade gerada pelo programa é aderente à real. As análises do INT 722 com confiabilidade de 90% são eficazes para prever a região da ruptura conforme apresentado na Figura 4. A tensão excessiva de cisalhamento exposta pelos valores positivos é limitada pela linha que representa a ruptura máxima ocorrida no realce, região instável. Assim, a ferramenta provou sua relevância prevendo condições instáveis.

O entendimento desse estudo abre caminho para que os modelos de bloco 3D da MSG sejam integrados em um único banco de dados geotécnicos como uma única matriz de visualização, sendo denominado de Modelo Geotécnico para Integração Rápida - GMRI. Os dados de classificação do maciço gerados no software LeaFrog, juntamente com os dados de tensão e deformação analisados no Map3D, podem ser unificados em um único banco de dados e consolidados no Gem4D, de forma que seja possível gerar análises de estabilidade precisas. As componentes de ( $\sigma_n$ ) e

( $\tau$ ) podem ser determinadas a partir dos dados de tensão principal máxima e mínima analisadas no Map3D, conforme descrito nas Equações 2 e 3. Os parâmetros de ( $\sigma_n$ ) e ( $\tau$ ) da envoltória de resistên-

cia podem ser obtidos na retroanálise. Sendo assim, a divisão da tensão cisalhante da envoltória pela tensão cisalhante analisada irá obter o fator de segurança em um modelo tridimensional.



**Figura 4.** Modelo numérico da superfície da ruptura usando os parâmetros calibrados ( $c$  e  $\phi$ ). A linha representa o realce executado com a diluição real (overbreak). Na seção analisada a região estável é representada pelos valores negativos e a região instável pelos valores positivos.

Em outra perspectiva, os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros dos ensaios de laboratório. Um total de nove amostras foram testadas para seis estágios de tensão confinante, e quatro amostras falharam como rocha intacta e não devido à estrutura. Os testes foram

realizados na Trilab em Brisbane/Austrália. Em geral, uma boa correlação foi encontrada entre todas as amostras do laboratório e os seguintes parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb foram derivados e são resumidos na Tabela 1 e comparados com os resultados da análise.

**Tabela 1** - Parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb para os Ensaios de Laboratório e Análise Numérica

Parâmetros	Ensaios de Laboratório	Análise - INT 722	Análise - INT 742
Coesão ( $c$ )	1,96 Mpa	3,29 Mpa	3,02 Mpa
Ângulo de atrito ( $\phi$ )	36,1°	23,1°	25,3°

Os parâmetros obtidos nos ensaios de laboratório são mais resistentes que os valores obtidos na calibração do modelo com ( $c$ ) variando entre 1,44 MPa a 2,68 MPa e ( $\phi$ ) entre 30,4° a 40,9°. Algumas considerações podem ser atribuídas para essa diferença como as amostras do laboratório são da mesma litologia porém próximo do realce analisado, o nível de escala das amostras de laboratório

são inferiores ao analisado e os parâmetros das juntas ubíquas podem ter uma alta amplitude de resultado. A Figura 5 mostra os valores de tensão cisalhamento e tensão normal para os parâmetros Ensaios de Laboratório e Análise Numérica.

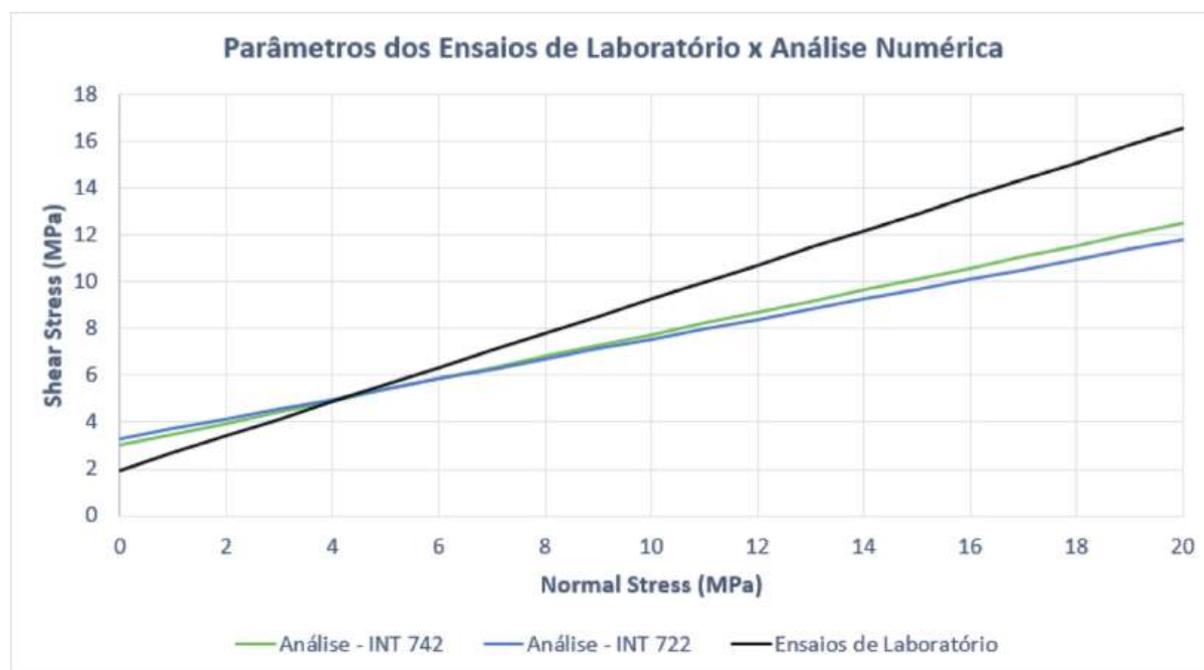


Figura 5. Comparação dos parâmetros dos Ensaio de Laboratório e Análise Numérica

#### 4.1 Metodologia Determinística X Probabilísticos

De forma a ilustrar os dados apresentados, uma metodologia determinística implicaria em apresentar uma determinada estabilidade sem considerar a dispersão dos dados. No item anterior, por meio de retroanálise, foram obtidos parâmetros do maciço rochoso que controlam a estabilidade da mina, sendo esses dados equivalentes. Sendo assim, a análise do modelo determinístico poderia unir os dados, visto que, são semelhantes, e determinar o valor médio encontrado definindo a reta intrínseca que estabelece a ruptura do maciço rochoso para o Painel 750. A unificação dos dados apresenta coesão de 3,3 Mpa, ângulo de atrito de 23,5°. A metodologia aplicada não leva em consideração a dispersão dos dados e o coeficiente de determinação é de 88,4%.

De posse a reduzir erros ou determinar os parâmetros mais adequados, a dispersão de dados será avaliada de forma probabilística, já que um total de 957 dados foram analisados nas duas retroanálises. A metodologia consiste em fixar o ângulo de atrito e verificar a dispersão dos dados na coesão. Os contornos de probabilidade de 10, 50 e 90% são interpretados conforme a distribuição dos dados de coesão no histograma. Portanto,

para que o projeto seja bem-sucedido em 90% dos casos, as análises devem ser projetadas utilizando a coesão de P=10% para o maciço rochoso. Assim, os valores probabilísticos inseridos no modelo tridimensional irão projetar rupturas de proporções diferentes, respeitando a simetria inicialmente realizada pelo modelo determinístico.

Com o propósito de comparar os dados de coesão e facilitar o entendimento, os resultados são retratados no histograma individualmente. O histograma da dispersão da coesão da ruptura do INT 722 e INT 742 são apresentados na Figura 5. Para o INT 722, o valor médio de P50% é igual a 2,99 MPa, P10% é de 2,36 MPa e P90% e 3,5 MPa. O mesmo pode ser obtido a partir do histograma com os valores de coesão do INT 742, obtendo P10% de 2,28 MPa, P50% de 2,55 MPa e P90% de 2,96 MPa (Figura 6). Mesmo as duas regiões apresentando semelhanças nos resultados pelo método determinístico, a coesão contém variações de resistência diferentes, sendo mais elevada no INT 722 em relação ao INT 742.

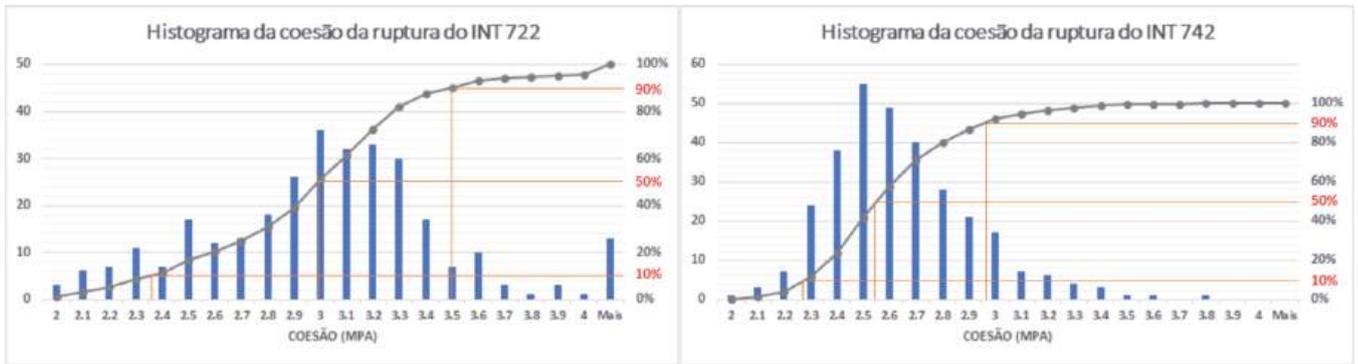


Figura 6. Histograma da distribuição dos valores de coesão determinando os contornos de probabilidade.

Os valores determinísticos e probabilísticos são resumidos na Tabela 2 inserindo também os valores unificados das duas rupturas nomeando como Painel 750. Baseado nos dois métodos, é possível interpretar que os valores determinísticos, para os três casos, apresentaram valores de coesão superiores aos de probabilidade de 50%.

Desta forma, os projetos desenvolvidos para esse estudo com a metodologia determinística são otimistas, contrários a segurança, podendo ocasionar instabilidades em regiões superiores ao projeto, dimensionando de forma inadequada o sistema de suporte.

Tabela 2. Determinação dos parâmetros de coesão baseado nos Métodos Determinístico e Probabilístico

	Determinístico		Probabilístico			
	INT 722	INT 742	Painel 750	INT 722	INT 742	Painel 750
Coesão - P10% (MPa)				2,36	2,28	2,39
Coesão - P50% (MPa)	3,29	3,02	3,30	2,99	2,55	2,78
Coesão - P90% (MPa)				3,5	2,96	3,23
Ângulo de Atrito	23,1°	25,3°	23,5°	23,1°	25,3°	23,5°

De posse das novas informações, um projeto geotécnico deve seguir os modelo probabilísticos com os valores de coesão com confiabilidade de 90%, logo, probabilidade de ruptura de 10% ( $P=10\%$ ), podendo ser denominados de modelo conservador. Sendo assim, os parâmetros de ruptura devem ser inferiores aos apresentados no modelo determinístico e no modelo probabilístico  $P=90\%$ , denominado de modelo otimista.

Com intuito de retratar essa variação, foi gerado um novo projeto quantificando a ruptura esperada nas probabilidades de 10% e 90% do INT 722. Utilizando a probabilidade de ruptura de  $P=90\%$ , modelo otimista, a análise resulta em valores de tensões que excedem a resistência com rupturas de até 2,2 m conforme a Figura 7 na li-

nya pontilhada em vermelho. Na probabilidade de ruptura de  $P=10\%$ , modelo conservador, é esperado rupturas com até 4,6 m com probabilidade de falha de 10%, demonstrado na mesma imagem na linha pontilhada em azul.

A região de incerteza entre os contornos de probabilidade de 10% e 90% tem 2,4 m de distância. O modelo representa uma região de instabilidade média de 3,3 m, com uma probabilidade de 50%. O sistema de suporte deve ser dimensionado respeitando a probabilidade de até 4,6 m para assertividade do projeto.

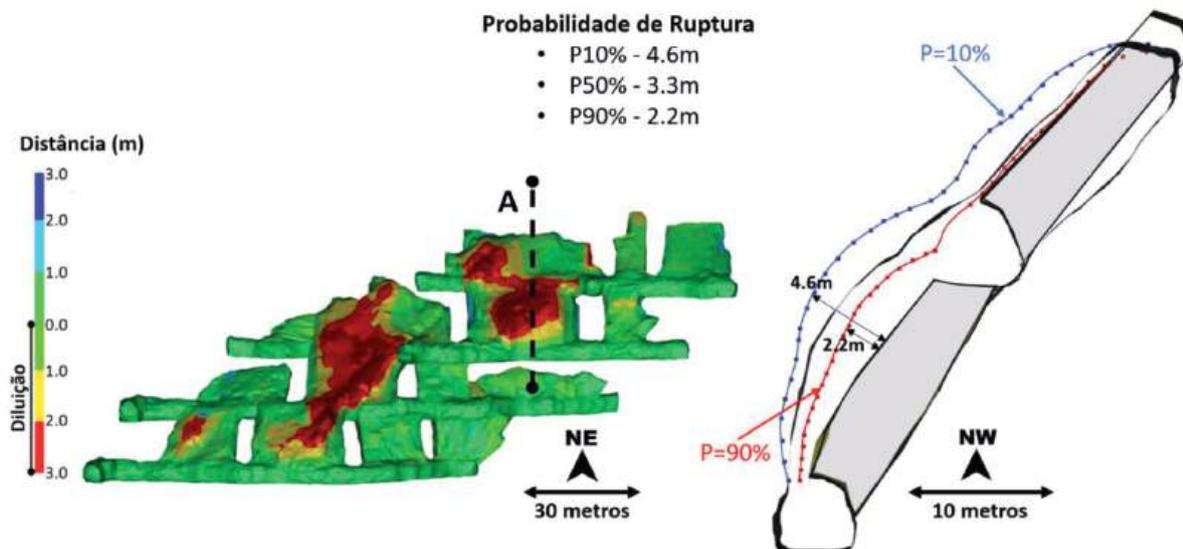


Figura 7. Variação da probabilidade de ruptura  $P=10\%$  e  $P=90\%$  e a incerteza do modelo numérico.

A incerteza do resultado do modelo pode estar associada aos seus parâmetros de entrada. Contudo, é necessário levar em consideração irregularidades operacionais. O desvio da perfuração, o excesso de carga máxima por espera ou a razão de carga no desmonte podem interferir nos resultados e não ser possível convergir um modelo analisado. Apesar disso, tem-se que considerar que há um limite para a precisão de qualquer modelo devido à variabilidade natural do maciço rochoso.

## 5. CONCLUSÃO

Este artigo demonstra, de maneira simples, como é possível aumentar a confiabilidade das informações utilizadas nas avaliações geotécnicas, permitindo a otimização dos layouts de mina de maneira rentável e segura.

As retroanálises realizadas nos INT 722 e 742 da Mina 3 provaram ser um método confiável para obter e calibrar os parâmetros do maciço rochoso no estudo de caso. O parâmetro de coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito ( $\varphi$ ) apresentaram boa equivalência com um coeficiente de correlação médio de 85,7% e 90,0% respectivamente.

Os valores obtidos para o ângulo de coesão e atrito podem ser usados para modelar as futuras áreas de lavra. Essa análise fornecerá confiança na metodologia e permitirá um melhor projeto

geotécnico para determinar a probabilidade de ruptura.

Resultados providos de ensaios de laboratório devem ser comparados com os resultados dos modelos numéricos e seus mecanismos de falha devem ser equivalentes. Uma retroanálise pode fornecer dados mais assertivos e representativos.

Os valores similares do modelo determinístico tendem erroneamente a unificá-los, determinando um valor médio. Esta ação gerou um coeficiente de determinação de 88,4%, apresentando coesão de 3,3 MPa e ângulo de atrito de 23,5°. Os resultados obtidos mostraram ser otimistas, não prevendo na maioria dos casos o comportamento do maciço rochoso, ocorrendo rupturas não esperadas com aumento do custo de produção.

Usando uma abordagem probabilística para projetar a ruptura, a relação entre confiabilidade do modelo e a incerteza nas previsões pode ser estabelecida quantificando os valores máximos e mínimos da área instável e a incerteza do modelo geotécnico derivado da análise estatística.

O uso da ferramenta probabilística, além de quantificar os parâmetros do maciço rochoso, determinou o contorno das probabilidades de 10% e 90%, gerando uma região de incerteza de 2,4 m, região essa de potencial de ruptura. No modelo conservador, a região de instabilidade foi de até 4,6 m de diluição, enquanto o modelo otimista apresentou valores de no máximo 2,2 m.

A confiabilidade do modelo numérico é quantificada em termos do desvio padrão por comparações diretas com observações do comportamento das minas. O método de retroanálise permite a comparação dos resultados do modelo numérico com o comportamento real da escavação, sendo uma ferramenta essencial para a confiabilidade do modelo.

## REFERÊNCIAS

- Barbosa, K. J. (2010) *Avaliação geotécnica de lavra subterrânea do corpo Serrotinho da Mina Cuiabá através de modelagem numérica tridimensional*. Dissertação (mestrado em Geotecnia) Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Batista, G.A.P., Da Silva, J.H; Ramires, J.E.F., Campos, M.P., Plooy, K.D. (2019) *Back analysis (BEM) in hard rock and the implications in further mining layouts*. 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering - ISRM, Foz de Iguaçu, PR, 2019.
- Batista, G.A.P. (2019) *Calibração do Modelo Numérico por Meio da Abordagem Probabilística e da Diluição Estruturalmente Controlada no Método de Lavra Sublevel Stopping*. Dissertação (mestrado em Geotecnia) Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Brady, B. H., Brown, E.T. (2004) *Rock mechanics for underground mining*. 3rd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 628p.
- Charbel, P.A. (2015) *Gerenciamento de risco aplicado à diluição de minério*. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- Daemen, J.J.K. (1983) *Slip Zones for discontinuities parallel to circular tunnels or shafts*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v.20, p.135-148.
- Jager, A. J., Ryder, J. A. (1999) *Rock Engineering Practice - a handbook for tabular hard rock mines*. Johannesburg: The safety in mines research advisory committee (SIMRAC), p.371.
- Wiles, T.D. (2006) Reliability of Numerical Modeling Predictions. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.43, p.454-472.
- Wiles, T.D. (2007) Map3D User s Manual, available from <http://www.Map3D.com>.

# PIPING E LIQUEFAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA: DESAFIOS PARA A SEGURANÇA DE BARRAGENS

PIPING AND LIQUEFACTION IN EARTH DAMS: CHALLENGES FOR DAM SAFETY

FELIPE ALVES FERNANDES GARCIA

*Engenheiro Geotécnico, Fundação Instituto de Pesquisas Tecnológicas – FIPT [felipe.fernandesgarcia@gmail.com](mailto:felipe.fernandesgarcia@gmail.com)*

## RESUMO ABSTRACT

Um dos grandes projetos de engenharia é a concepção de uma barragem. Isto se dá por conta do envolvimento de profissionais de diferentes especialidades, destacando geólogos e engenheiros geotécnicos. Por serem obras de grande volume de movimentação de terra e risco, muitos cuidados devem ser tomados para garantir a estabilidade da estrutura, principalmente em relação ao piping e liquefação do solo. Como observado na literatura mundial e em eventos recentes no Brasil, estes dois fenômenos têm causado colapsos de diversas estruturas de barragem, devendo, portanto, ser analisadas suas causas e gatilhos para ocorrência. É nesta perspectiva que a presente pesquisa se baseia, no estudo de colapso de barragens por meio dos fenômenos de piping e liquefação do solo. Como objetivos têm-se o entendimento de como ocorre tais eventos, analisando os seus gatilhos, além de detalhar fatores que aumentam a segurança contra os mesmos, destacando o sistema de drenagem interno, compactação do aterro e tratamento de fundações. A pesquisa é do tipo bibliográfica e inicialmente são apresentados os tipos de barragens, investigação geotécnica, instrumentação e fatores que influenciam na escolha do barramento. Em seguida é abordado sobre os fenômenos de piping e liquefação, destacando seus gatilhos para ocorrência e casos históricos reportados na literatura técnica. Por fim, são detalhados controles de fluxo de barragens, aprofundado em compactação do aterro, sistema de drenagem e tratamento de fundação. Após a apresentação de todos os pontos supracitados, conclui-se que a segurança de uma barragem de terra é baseada em um conjunto de fatores que vem desde a análise do local do empreendimento, destacando características do solo e tipo da barragem, até o estudo do dimensionamento de sistema interno de drenagem aliada a um bom controle

The design of a dam is a challenge task as many aspects must be considered and it involves different professionals, mainly geologists and geotechnical engineers. Large earth volumes are needed for dam's construction and large reservoirs are involved. Great care must be taken to ensure the dam's stability and to minimize the risks of a failure. As observed in the world literature and in recent events in Brazil, these piping and soil liquefaction have caused collapses of several dam structures and, therefore, their causes and triggers for their occurrence should be analyzed. The objective of this work is to present a review on the mechanics of these phenomena, their triggers and to point out preventive measures against these events, in the study of the collapse of dams through the phenomena of piping and soil liquefaction. The objectives are to understand how such events occur, analyzing their triggers, in addition to detailing factors that increase security against them, highlighting the internal drainage system, landfill compaction and foundation treatment. The research is of the bibliographic type and will present the types of dams, geotechnical investigations, instrumentation and factors that influence the choice of the dam are presented. Then, it is approached about the phenomena of piping and liquefaction, highlighting their triggers for their occurrence and historical cases reported in the technical literature. Finally, dam flow controls are detailed, in-depth in landfill compaction, drainage system and foundation treatment. After presenting all the aforementioned points, it is concluded that the safety of an earth dam is based on a set of factors that comes from the analysis of the site of the project, highlighting soil characteristics and type of the dam, to the study of the design of internal drainage

tecnológico de compactação e tratamento de fundação quando necessário.

**Palavras-chave** - piping, liquefação do solo, barragem de terra, sistema interno de drenagem, fluxo de barragem.

system combined with good technological control of compaction and foundation treatment when necessary.

**Keywords** - piping, internal erosion, soil liquefaction, earth dam, internal drainage system, seepage.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem se observado uma atenção maior para as estruturas de barragens no Brasil, não apenas devido aos recentes incidentes envolvendo ruptura de barramentos no estado de Minas Gerais, mas também à inserção de critérios mais rigorosos quanto à execução de barragens por parte dos órgãos responsáveis.

As graves consequências, não apenas econômicas, mas sociais como perda de vida humana e ambientais, acenderam um alerta sobre a segurança de barragens contra fenômenos que levam a ruptura como a erosão interna regressiva, a qual será denominada piping neste trabalho, por ser o termo corrente na engenharia geotécnica e a liquefação do solo. Tal conjuntura levou órgãos responsáveis por criar diretrizes de segurança a estabelecerem critérios mais rigorosos em projeto de barragens no país.

Resultado disto é o mercado geotécnico estar aquecido e com diversas demandas, em busca de profissionais qualificados que atuem nesta área para aumentar o suporte técnico em projetos e monitoramento de estruturas de barragens. Neste âmbito, torna-se fundamental estudar e analisar de forma aprofundada não somente os acidentes mais recentes, mas, o histórico de rupturas de barragens a fim de desenvolver tecnologias e critérios de projeto que tenham como foco maior segurança para os barramentos.

Massad (2010) cita que acidentes envolvendo rupturas de barragens é uma forma de tirar lições para novos projetos, como foram os casos das barragens de Fort Peck, Malpasset e Teton, que trouxeram ensinamentos que mudaram os rumos de projetos e execução de barragens contendo mais segurança contra o piping.

Souza (2017) também destaca sobre os aprendizados que devem ser absorvidos devido a rupturas envolvendo barragens, destacando o estudo

aprofundado sobre a geologia local, para que futuros projetos tenham maior segurança contra tais rupturas. No entanto, apesar de haver diversos estudos referentes aos desastres envolvendo barragens, ainda é observado, não apenas no Brasil, rupturas em que o problema observado foi falhas em projetos.

Massad (2010) inclusive cita uma publicação do ICOLD (Internacional Committee on Large Dams) de 1973, que de 236 rupturas de barragens, 32% foi devido a falhas de projeto, o que é um alerta sobre um maior entendimento acerca dos gatilhos que levam ao colapso de estruturas de barramento.

Em diversos estados do Brasil a construção de barragens tem uma grande importância para a economia e desenvolvimento humano. Mas, como apresentado, colapsos recentes de estruturas de barramento fizeram acender um alerta quanto aos critérios de projeto e implantação atrelados à segurança das mesmas.

É nessa perspectiva que se embasa o presente trabalho. Visto que, o desenvolvimento de pesquisas traz materiais que podem ser utilizados e consultados no meio profissional para o aperfeiçoamento de projetos geotécnicos mais seguros no que tange às barragens de terra e maior entendimento quanto às ações voltadas para aumentar a segurança contra piping e liquefação.

O objetivo deste artigo é analisar como ocorre o piping e liquefação do solo que resultam em ruptura de barragens, a fim de entender quais são os gatilhos para sua ocorrência e os procedimentos que podem ser inseridos em um projeto executivo para mitigar as possibilidades de ocorrência e aumentar a segurança contra ruptura devido a estes fenômenos em estudo.

## 2. METODOLOGIA

A fim de alcançar os objetivos citados, sistematizadas as informações a respeito da temática segurança de barragem de terra contra os fenômenos de piping e liquefação do solo, foi abordado a condição de compactação do barramento, a drenagem interna e posteriormente as relações de partículas que compõem o barramento e os filtros para que haja harmonia no sistema. Por último é apresentado os métodos numéricos para dimensionamento dos filtros vertical e horizontal a ser implantado no barramento.

### 2.1 Tipo da pesquisa

A pesquisa é do tipo bibliográfica, de forma que para obter as informações supracitadas foi lançado mão de pesquisas principalmente a nível de mestrado, as quais apresentavam estudos de caso de obras, possibilitando obter informações detalhadas acerca da temática proposta na presente pesquisa.

## 3. RUPTURAS DE BARRAGENS DEVIDO À LIQUEFAÇÃO

Nas últimas décadas tem-se dado uma atenção maior ao fenômeno de ruptura de barragens devido à liquefação do solo, muito devido aos diversos colapsos advindos deste fenômeno. Assim, neste item serão citados alguns casos históricos onde a ruptura ocorreu devido ao fenômeno em estudo. Mas, antes de elencar tais casos, vale fazer uma apresentação dos tipos de alteamento de barramento.

Em primeiro lugar cabe mencionar que a principal diferença entre uma barragem convencional (para reservação de grandes volumes de água) e uma barragem para contenção de rejeito se dá no talude de montante, que no caso da barragem para acúmulo de rejeitos tende a possuir um espaldar mais abatido, visto que não irá sofrer variações de tensões devido o rebaixamento do lençol freático. Na Figura 1 é apresentado um modelo deste tipo de barramento.

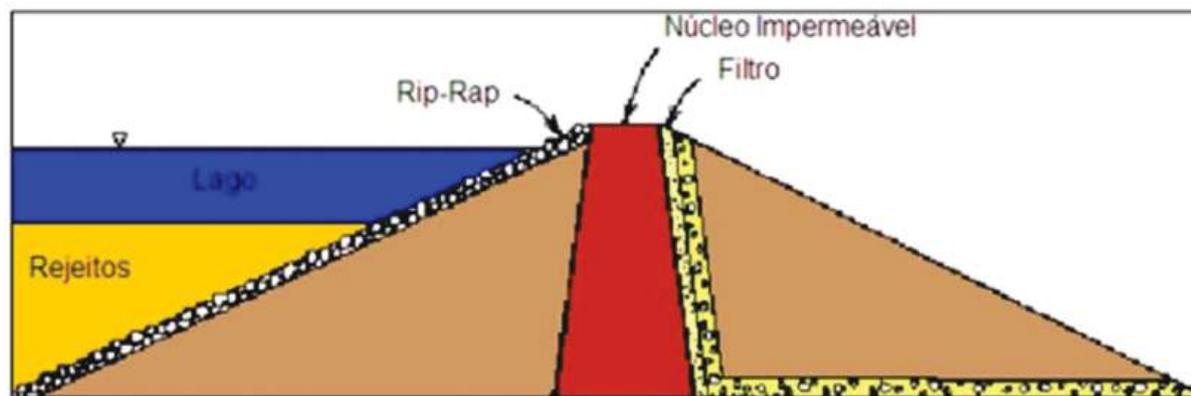


Figura 1 - Barragem convencional para rejeito (Engels e Dixon Hardy, 2008, Apud Freire Neto, 2009).

Outro tipo de barragem para contenção de rejeitos é a com alteamentos sucessivos. Neste modelo, se enquadram 3 diferentes sistemas denominados como: alteamento a montante, a jusante e a linha de centro.

O primeiro caso, mais comum de ser executado, possui como execução, de acordo com Freire Neto (2009), a concepção de um dique de partida

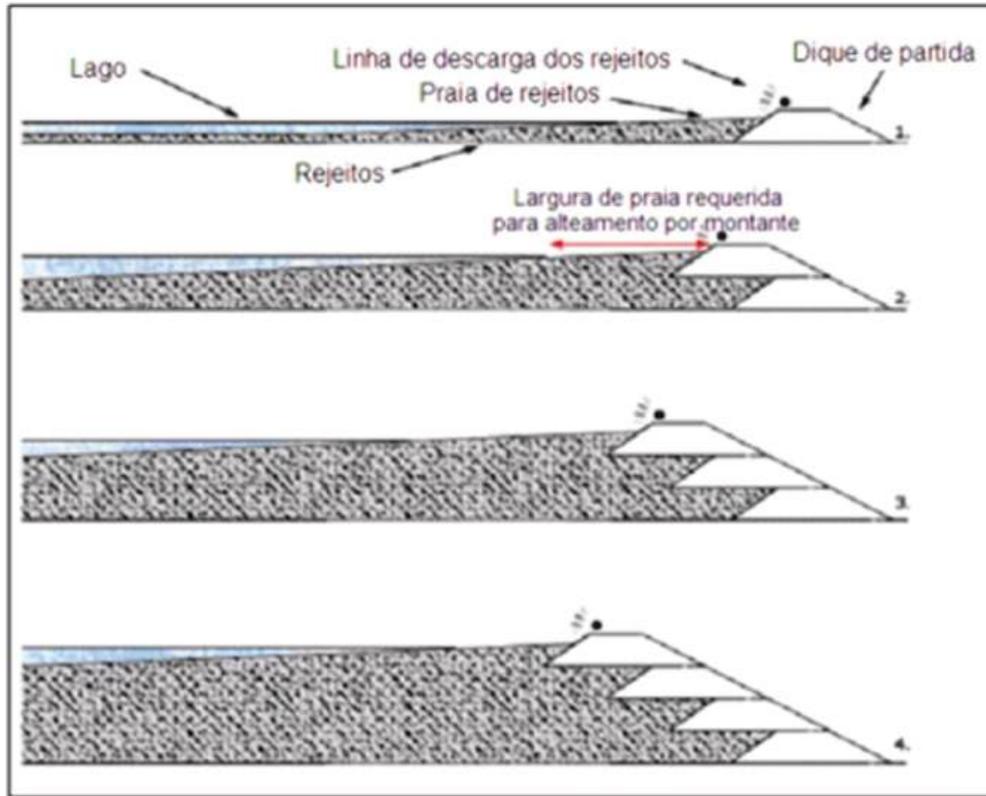
o qual se constitui por um aterro compactado ou enrocamento.

Mesmo sendo o método mais comum de ser executado, é o que apresenta maior instabilidade quanto a ruptura por liquefação. Isto se dá por conta do método resultar em um modelo de barragem em que os alteamentos sucessivos não possuem um sistema de drenagem interno conectado

e o rejeito lançado para ser contido servirá como fundação de outro alteamento.

Davies et al. (2000), apud Freire Neto (2009) inclusive citam que após estudos analisarem cer-

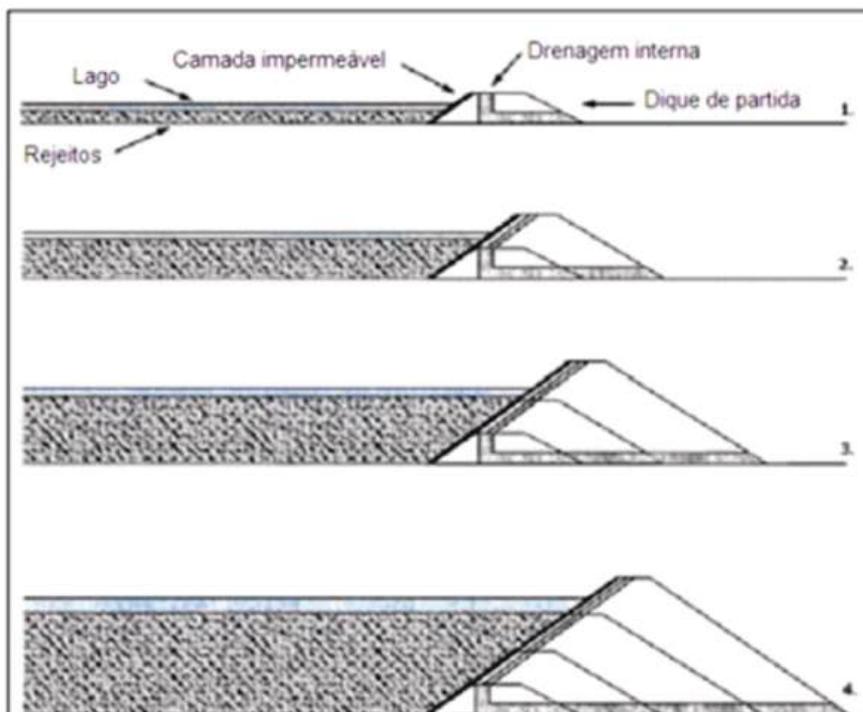
ca de três mil e quinhentas barragens de rejeito, aproximadamente metade foram executadas por meio desta técnica. Na Figura 2 é ilustrado o modelo deste tipo de alteamento.



**Figura 2** - Alteamento a montante de barragem de rejeito (Engels e Dixon Hardy, 2008, Apud Freire Neto, 2009)

O segundo método construtivo de barragem de rejeito é pelo método de alteamento à jusante. Este método se difere do primeiro principalmente por conta do volume de aterro que deve ser inserido para execução, o qual é bem superior ao primeiro método, o que necessita de mais jazidas e área para construção. Outro fator que os diferencia é que o sistema de drenagem é interligado entre os sucessivos alteamentos.

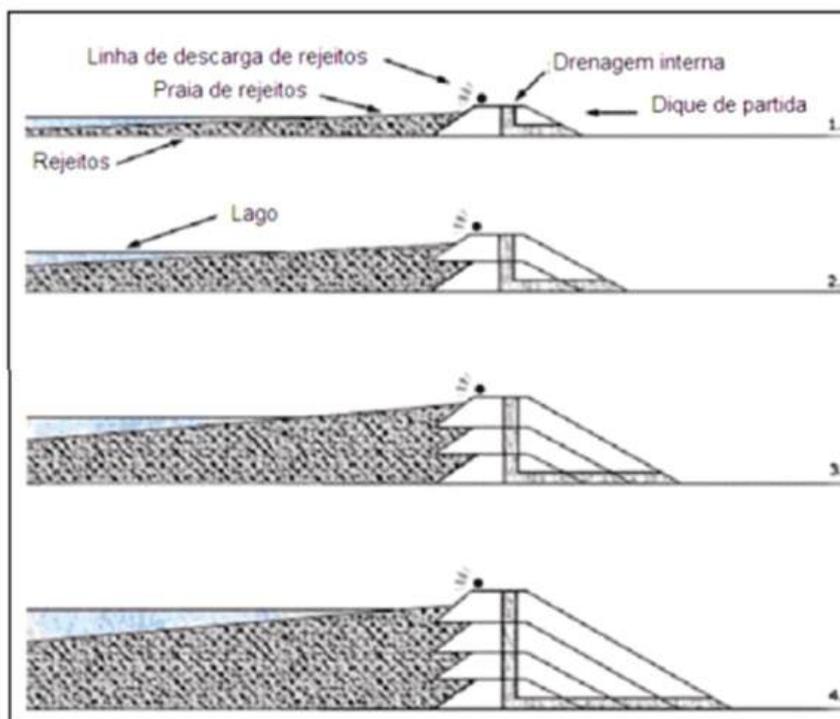
Além destes pontos, Freire Neto (2009) destaca que a grande vantagem desta metodologia executiva é que nela a estabilidade é maior pois cada alteamento é estruturalmente independente dos novos lançamentos. Na Figura 3 é apresentado este modelo de execução.



**Figura 3** - Alteamento a jusante de barragem de rejeito (Engels e Dixon Hardy, 2008, Apud Freire Neto, 2009).

Por fim, o método de alteamento a linha de centro é considerado um meio termo entre os dois anteriores, visto que apresenta maior estabilidade que o método a montante, mas não precisa de

um volume de material considerável em comparação com o método de alteamento a jusante. Uma representação desta metodologia é ilustrada na Figura 4.



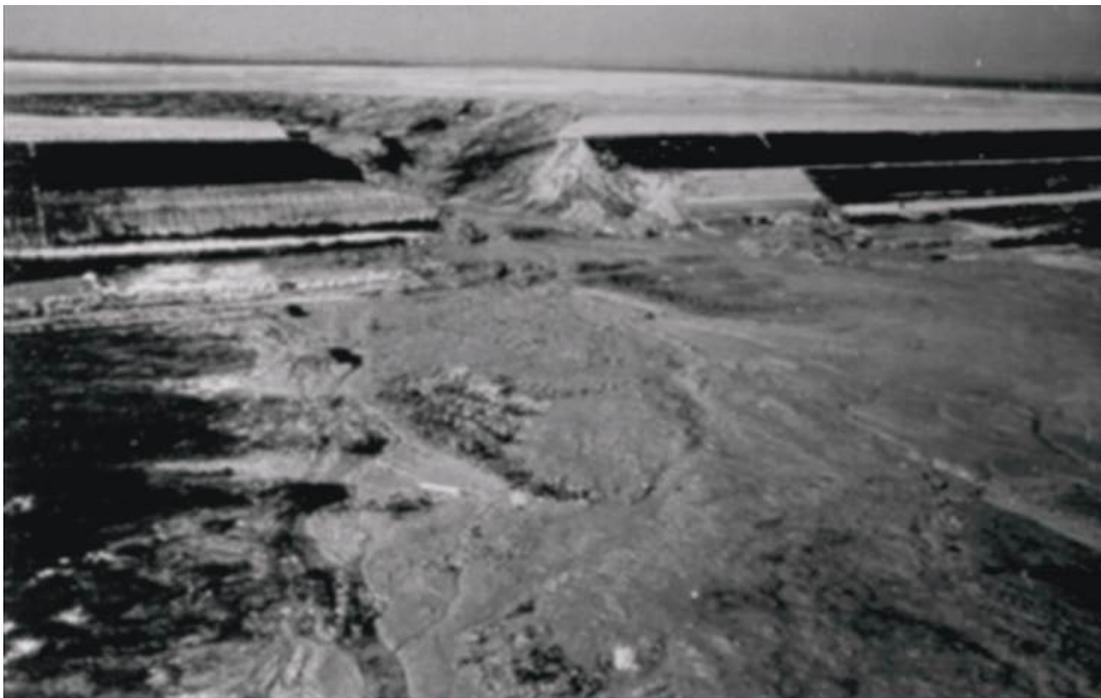
**Figura 4** - Alteamento a linha de centro de barragem de rejeito (Engels e Dixon Hardy, 2008, Apud Freire Neto, 2009)

Quanto à ruptura de barragens devido a liquefação do solo, a seguir serão citados casos históricos que foram reportados por Freire Neto (2009) os quais foram retirados de Davies et al. (2002).

O primeiro caso é o da Mina de Harmony, localizada na África do sul, em que nesse contexto o barramento foi construído pelo método de montante, o qual possuía diversas baías de rejeito e que além destas características, apresentava uma

pequena borda livre e o material era composto essencialmente por areia bem graduada com finos na ordem de 60%.

A ruptura se deu no dia 22 de fevereiro de 1994, quando uma chuva causou o galgamento da estrutura e, devido apresentar uma alta inclinação no talude de jusante, de 1V:2H, ocasionou processos erosivos os quais levaram ao gatilho da liquefação do material. A Figura 5 ilustra tal barragem colapsada.



**Figura 5** - Ruptura por liquefação da barragem da Mina de Harmony (Davies et al. 2002, apud Freire Neto, 2009).

Outro caso de colapso devido à liquefação do solo foi a barragem de rejeito da mina de Sullivan, localizada no Canadá. O processo de ruptura deste barramento se deu através do excesso de tensões cisalhantes aplicadas nos rejeitos de funda-

ção, o qual era composto por rejeitos. Mas, nesta situação, maiores consequências não ocorreram devido a outros diques terem contido o movimento do solo. A Figura 6 apresenta este colapso.



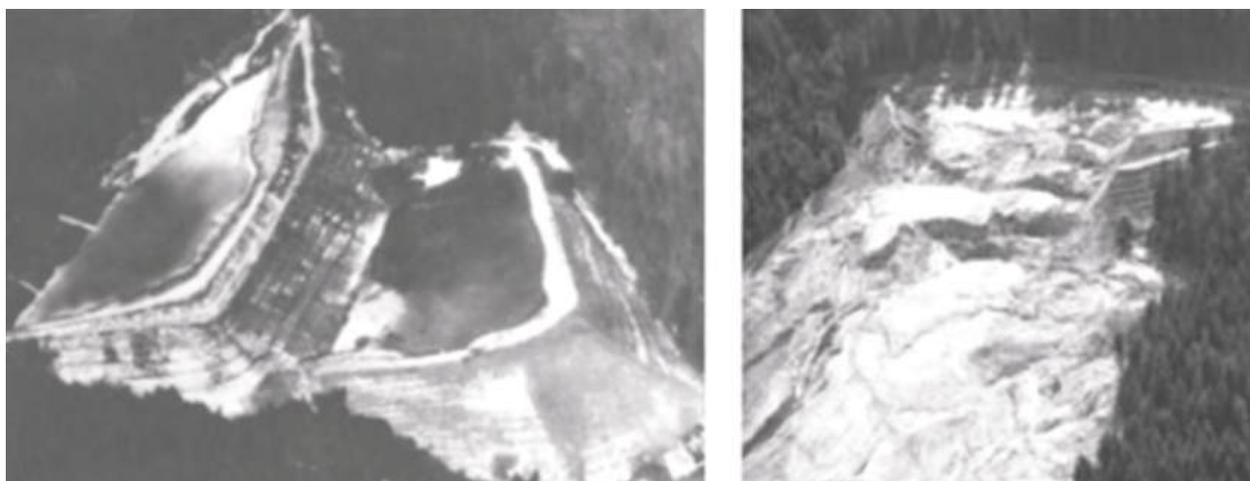
**Figura 6** - Ruptura por liquefação da barragem de Sullivan (Davies et al. 2002, apud Freire Neto, 2009).

Um caso trágico que levou à morte de 268 pessoas foi a ruptura da barragem de rejeito da mina de Stava, localizada na Itália. Este é considerado como um dos maiores acidentes de colapso de barragem de rejeitos e aconteceu no dia 19 de julho de 1985.

Neste caso, a ruptura resultou em uma massa de solo com velocidade de 60 km/h em um trecho de aproximadamente 4 km, o qual alcançou o vilarejo de Stava. O processo de colapso foi em

casca, com o processo construtivo sendo alteamento à montante em que cada dique possuía altura de 35m.

Após um alteamento romper, o movimento de massa levou ao galgamento da barragem seguinte, que também colapsou. Os taludes possuíam geometria de 1V:1,2H e 1V:1,5H, com imagens da geometria e ruptura apresentadas respectivamente na Figura 7.



**Figura 7** - Antes e depois da barragem de Stava (Davies et al. 2002, apud Freire Neto, 2009).

Na Espanha também foi reportada ruptura de barragem de rejeito, ocorrido na mina “Los Frailes”. Neste caso o colapso se deu pela fundação.

A fundação deste barramento era composta por aluvião, o qual estava sobre uma camada

de argila marinha altamente pré-adensada com a ruptura ocorrendo ao longo de uma faixa de aproximadamente 14 m de profundidade. A Figura 8 apresenta a ruptura desta barragem.



**Figura 8** - Ruptura da barragem “Los Frailes” (Davies et al. 2002, apud Freire Neto, 2009).

Um caso de grande repercussão aqui no Brasil foi o da Barragem do Fundão, localizada no estado de Minas Gerais, que rompeu no dia 5 de novembro de 2015. Neste caso destaca-se a velocidade do alteamento da mesma, o qual foi pelo método à montante, fator este destacado anteriormente como um dos gatilhos para ocorrência da liquefação do solo.

Freire Neto (2009) e Machado (2017) destacam o que Mittal e Morgenstern (1976) citam acerca da taxa de alteamento, sugerindo que seja de 4,6 m/ano até 9,1 m/ano para que ocorra a dissipação do excesso de poropressão.

Contudo, como relatado por Machado (2017), a taxa de alteamento da Barragem do Fundão foi superior a esta faixa, tendo uma média de 12,30 m/ano no ano da ruptura.

### 3.1 Controle de fluxo em barragens

O controle de fluxo em barragens é um fator essencial para a sua segurança. Tanto em termos de colapso por piping quanto por liquefação, a verificação do fluxo e análise de eventuais tratamentos são fundamentais para a estabilidade do barramento.

Diversos aspectos são importantes para realizar o controle de fluxo, incluindo compactação do aterro, sistema de drenagem interna e tratamento em conjunto; em que tais questões serão aprofundadas nos próximos itens da presente pesquisa.

### 3.1.1 Compactação do aterro e controle tecnológico

Massad (2010) apresenta um detalhado estudo que compreende desde compactação em laboratório, comportamento mecânico de solo compactado, até controle tecnológico. Entre os aspectos citados neste assunto, o autor destaca sobre o par ordenado máxima densidade seca e umidade ótima, que norteiam a compactação em campo a partir do cálculo do grau de compactação.

O autor discute sobre o comportamento mecânico do solo compactado com a permeabilidade, resistência ao cisalhamento e compressibilidade

do solo, relacionando com o ponto ótimo da curva de compactação. Esta abordagem demonstra que o ponto ótimo da curva de compactação não representa as melhores características de maneira simultânea, mas sim o ponto de melhor equilíbrio entre as três.

A seguir serão apresentados estudos que explicam sobre os três aspectos: permeabilidade, resistência ao cisalhamento e permeabilidade. Massad (2010) apresenta estudos conduzidos por Lambe e Whitman (1969), que demonstram a variação da permeabilidade a depender da umidade de compactação. Estes resultados são ilustrados na Figura 9.

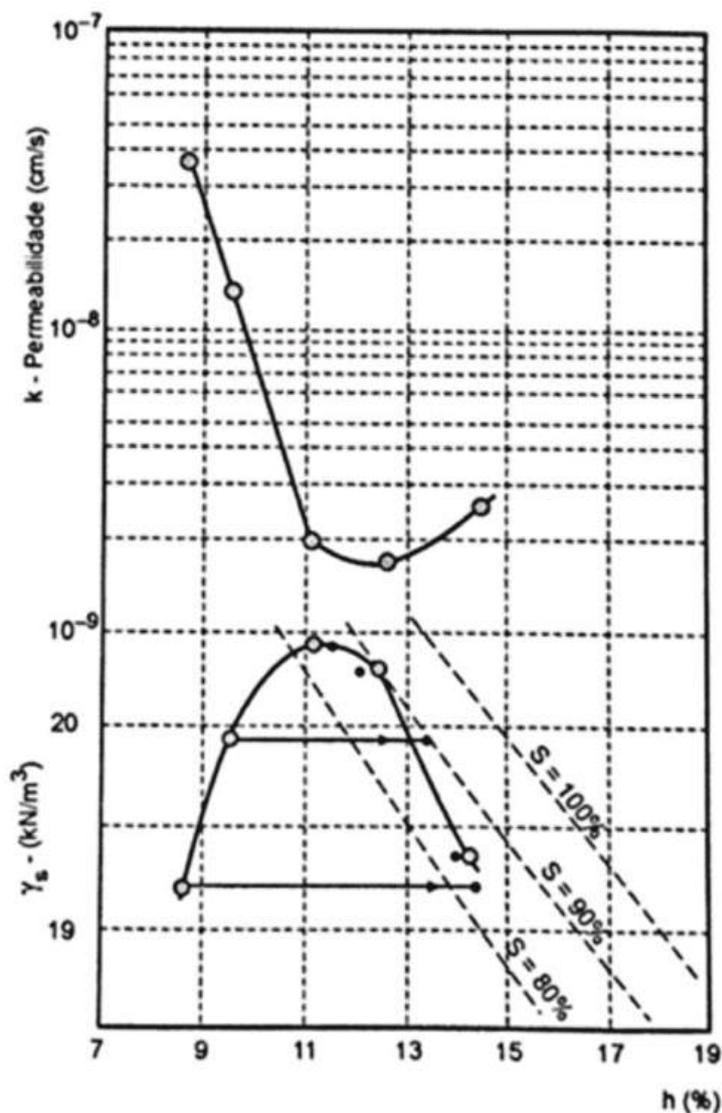


Figura 9 - Permeabilidade do solo a depender da umidade de compactação (Lambe e Whitman 1969, apud Massad, 2010).

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 9, pode-se observar que o ramo seco da curva de compactação é a região em que o solo apresenta maiores permeabilidades. Conforme a umidade de compactação vai sendo aumentada a permeabilidade reduz, de forma que alcança menores valores com umidade um pouco acima da ótima. Após este ponto, a permeabilidade volta a aumentar para valores de umidade no ramo úmido.

Em termos de compressibilidade, Souza Pinto (2006) apresenta estudos que demonstram que solos compactados no ramo seco da curva de compactação tendem a apresentar menores deformabilidades. Tais resultados corroboram pesquisas feitas por Lambe e Whitman (1969), as quais são ilustradas em Massad (2010). Tal comportamento é ilustrado na Figura 10.

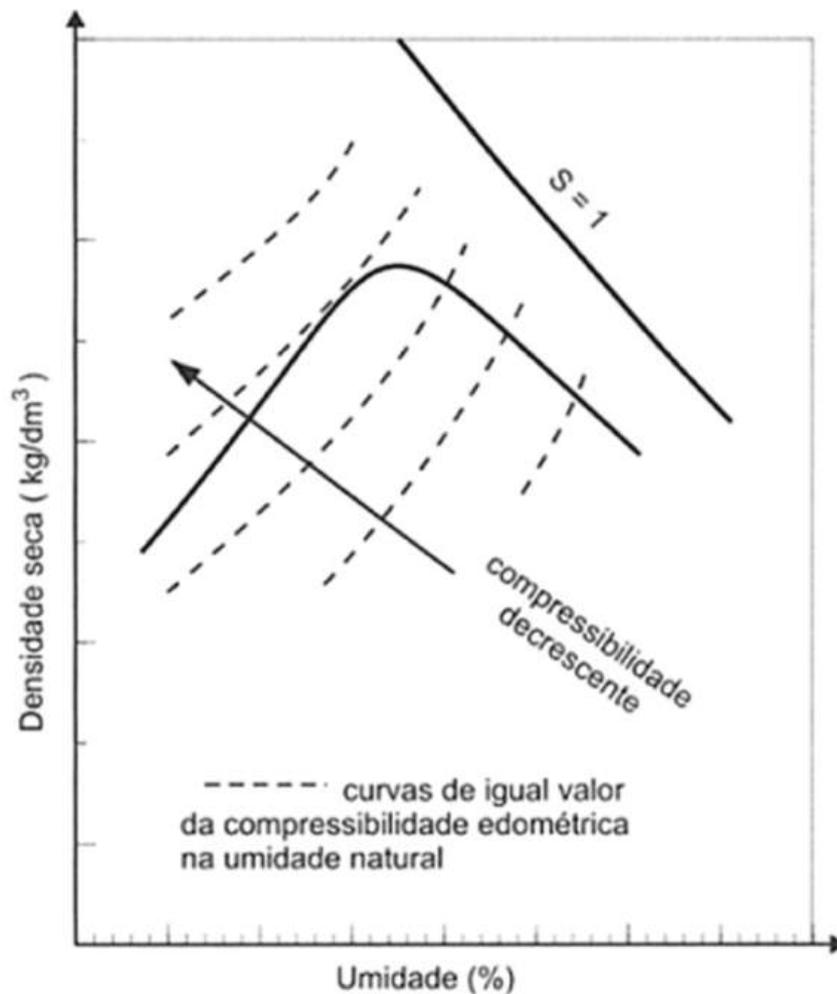


Figura 10 - Variação da compressibilidade do solo compactado nos ramos seco e úmido (Souza Pinto, 2006).

Por fim, Massad demonstra os resultados de Lambe e Whitman (1969) quanto à resistência ao cisalhamento do solo. Na Figura 11 é demonstra-

do que solos compactados no ramo seco da curva de compactação apresentam maiores resistências que aqueles compactados no ramo úmido.

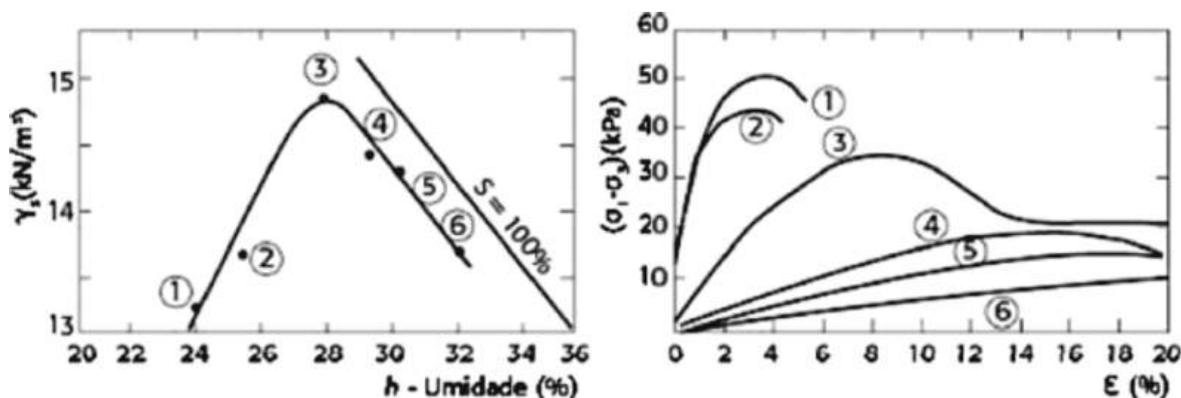


Figura 11 - Resistência ao cisalhamento do solo a depender da umidade de compactação (Lambe e Whitman 1969, apud Massad, 2010).

Como sintetização de todos os resultados apresentados, pode-se criar 3 regiões de comportamento de solo compactado na curva de compactação quanto à permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento, que são listados a seguir:

- Ramo seco: trecho com maiores valores de permeabilidade e menores valores de compressibilidade e resistência;
- Ponto ótimo: região com menores valores de permeabilidade e mediano para compressibilidade e resistência;
- Ramo úmido: região com valores medianos de permeabilidade e menores de compressibilidade e resistência.

São nestas apresentações do comportamento do solo compactado quanto à permeabilidade,

compressibilidade e resistência ao cisalhamento que reside a abordagem de Massad (2010) sobre a otimização de seções do aterro do corpo de uma barragem de terra. Nesta otimização, o autor cita que para tornar o aterro menos permeável e mais estável é necessário realizar a compactação dos espaldares de jusante e montante com umidade 1% abaixo da ótima, para obter maior estabilidade. Já na região central realiza-se a compactação com a umidade 2% acima da ótima, para obter menores valores de permeabilidade.

Esta condição resultaria em um aterro mais estável nos taludes de jusante e montante, além de formar um “septo” no núcleo, funcionando como uma barreira contra a percolação da água no interior do maciço. Tal contexto é apresentado na Figura 12.

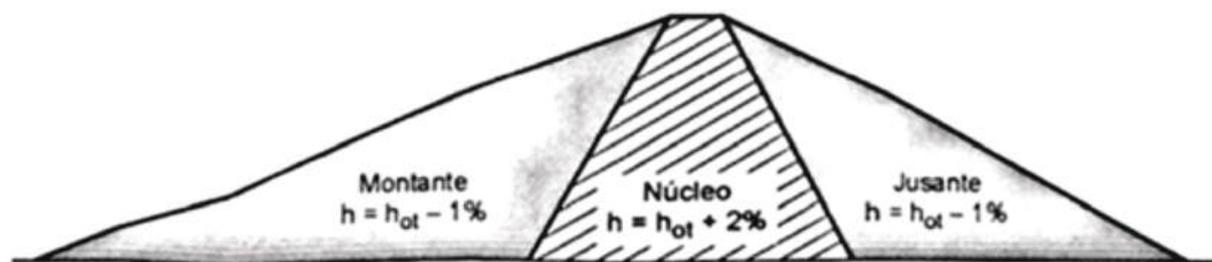


Figura 12 - Otimização de seção de barragem (MASSAD,2010).

### 3.1.2 Sistema de drenagem interna

Antes de dissertar sobre o sistema de drenagem, é importante frisar que uma barragem de terra não é um corpo impermeável. Naturalmente

irá ter percolação pelo corpo do aterro e que esta ocorrência deve ser analisada a fim de inserir sistemas que dificultem a percolação, como citado no item anterior, e também elementos que direcionam o fluxo no interior do aterro de forma que

busque evitar a saturação do talude de jusante, sendo este o sistema de drenagem interno de uma barragem.

Como citado por Souza (2017), o sistema de drenagem interno de uma barragem tem como objetivo evitar que ocorra a surgência de água na face do talude de jusante, o que caso aconteça irá certamente desenvolver processos erosivos e conseqüentemente o piping. Garcia cita que a inexistência de um sistema interno de drenagem ou até o mau funcionamento dele é fator condicionante para acarretar este fenômeno (Garcia, 2024)

A principal metodologia para realizar o dimensionamento deste sistema interno de drenagem é a partir do critério de Terzaghi. A partir desta proposta, Terzaghi segue dois princípios: é necessário que o material funcione como um dreno, direcionando a água que percola no interior do corpo do aterro; e atue como filtro impossibilitando que partículas do aterro sejam carreadas para o sistema de drenagem.

Nesta perspectiva, Pinto (2010) ilustra um exemplo de como um solo é escolhido para com-

por o sistema de drenagem a partir deste critério, destacando que sua utilização depende da análise granulométrica do solo do corpo do aterro e do possível solo a compor o sistema.

Pelo critério de Terzaghi, duas condições devem ser satisfeitas sendo a primeira o critério de drenagem que indica que o diâmetro equivalente a passante de 15% do filtro deve ser 5 vezes maior que o diâmetros equivalente passante 15% do solo do aterro ( $D_{15} > 5 \cdot d_{15}$ ). A segunda condição estabelece o critério de filtragem e diz que o diâmetro equivalente do filtro a passante 15% tem que ser 5 vezes menor que o diâmetro equivalente a passante 85% do solo do corpo do aterro ( $D_{15} < 5 \cdot d_{85}$ ).

Para exemplificar a aplicação destas condições, na Figura 13 o autor apresenta diversas curvas granulométricas, em que a curva S representa o material do corpo do aterro e as restantes são de jazidas hipotéticas. Logo abaixo são destacados os diâmetros equivalentes de 15% passante dos solos P, Q e R, além do próprio solo do corpo do aterro.

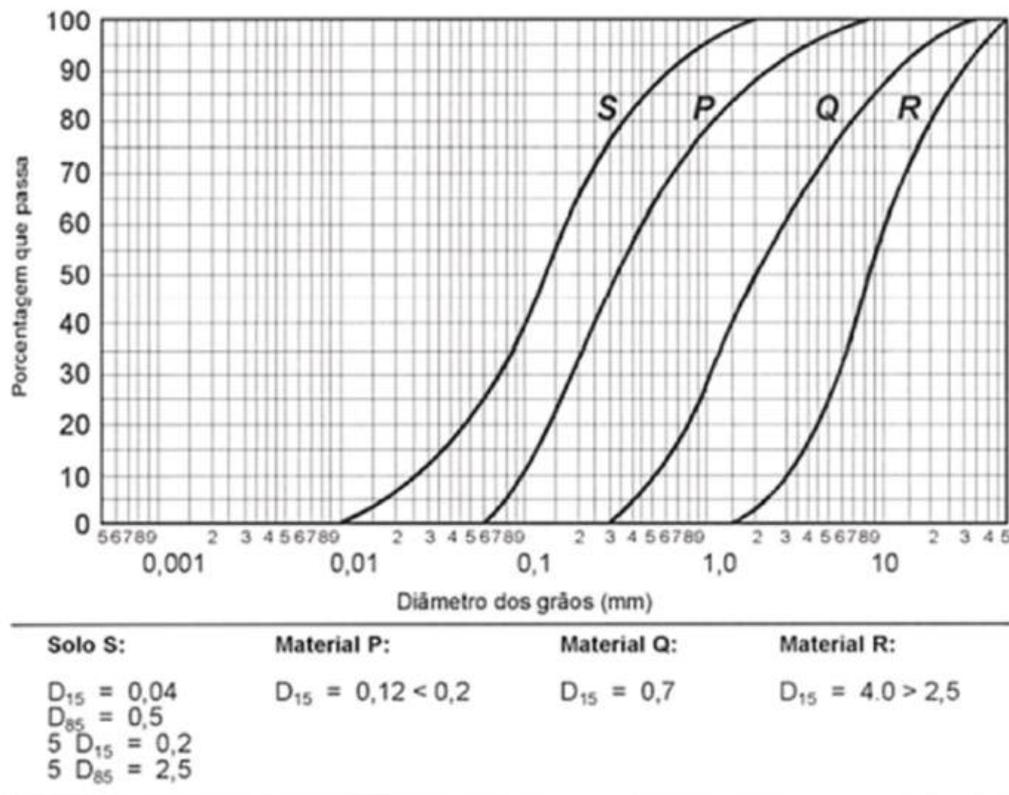


Figura 13 - Exemplo de aplicação de critério de filtro de Terzaghi (Souza Pinto, 2006).

A partir da análise dos parâmetros apresentados na Figura 13 observa-se que o solo que se enquadra nas duas condições do critério de filtro de Terzaghi é o Q. O solo P não é adequado porque não é muito mais permeável que o solo do aterro, o que não seria favorável para funcionar como dreno; o solo R não atende ao critério de filtragem.

Além do método de Terzaghi, o qual é largamente utilizado tanto no Brasil como em outros países, vale destacar outros critérios para dimensionamento a fim de aumentar a estabilidade de uma barragem tanto em relação ao piping, como também à liquefação do solo.

Mas, é importante destacar que o desenvolvimento dos critérios geralmente se baseia em estudos experimentais de laboratório com materiais granulares. Para o dimensionamento da capacidade de escoamento dos filtros, são utilizados fatores de segurança elevados, maiores ou iguais a 10, tendo em vista o papel fundamental de evitar poropressões que possam vir comprometer a estabi-

lidade da barragem, como citado por Assis (2003). A seguir são destacados critérios que se baseiam na granulometria, permeabilidade, coeficiente de não uniformidade e índice de vazios do solo.

Para dimensionamento do filtro de solos coesivos, Vaughan e Soares (1982) se basearam em estudos de permeabilidade do material em conjunto com o material adjacente ao filtro. Nesta proposta, os autores citam que a permeabilidade do solo ( $K_f$ ) do filtro é dada pela equação 1.

$$k_f < 6,7 \cdot 10^{-6} \times \delta^{1,52}$$

Onde  $\delta$  é o diâmetro referente a passante 85%, em  $\mu\text{m}$

Um critério para solos argilosos é proposto por Sherard e Dunnigan (1984) que se baseia na análise do material a ser utilizado, pois para cada um deles existe um critério que é norteado pela granulometria do mesmo. A Tabela 2 ilustra estes critérios a depender do solo.

**Tabela 2** - Critério de Sherard e Dunnigan (1984) apud Sandroni e Guidicini (2022)

Silte e argila (+ 85% < 0,074mm)	$D_{15}/D_{85} \leq 9$
Silte e areia argilosa (40 a 85% < 0,074 mm)	$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$
Material intermediário (15 a 40% < 0,074mm)	$D_{15} = (40 - A)/(40-15) \cdot ((4 \cdot D_{85}) - 0,7) + 0,7 \text{ mm}$
Material grosso (15% < 0,074 mm)	$D_{15}/D_{85} \leq 4 \text{ a } 5$

\*Nota: A representa a % de partículas finas, ou seja, menores de 0,074 mm

Em 1964, o professor Araken Silveira apresentou uma teoria geométrica-probabilística que permite realizar uma análise de carreamento, onde é possível calcular o número de confrontos  $n$ , necessário para reter uma partícula com diâmetro  $d=d_v$  do material-base no interior do filtro (que possui determinada distribuição de vazios), através da equação 2:

$$n = \log \frac{(1 - P^*)}{\log pv}$$

Onde  $P^*$  é o nível de confiança do processo e  $PV$  é a percentagem de vazios maior ou igual a  $d_v$ .

Se a partícula percorre uma distância  $S$ , (Silveira sugere  $s = D_{50}$  ou igual à média geométrica dos diâmetros) em cada confronto, o percurso total de penetração será de acordo com a equação 3:

$$S = n \times s$$

Humes (1995, 1996) mostra que como os contatos entre as partículas ocorrem através de suas superfícies laterais, a probabilidade de um grão se agrupar com outros para formar um vazio, deve ser associada à distribuição em área lateral (PAL) das partículas do filtro, que é facilmente obtida através da distribuição em massa.

Os métodos supracitados se referem à determinação do material que melhor se enquadre para funcionar como filtro e dreno no sistema interno de drenagem de uma barragem de terra. Quanto à espessura do filtro vertical e altura do filtro horizontal, Massad (2010) relata que as seguintes expressões (equações 4 e 5) são utilizadas a fim de se obter a geometria, que são influenciadas pela vazão absorvida pelo filtro ( $Q$ ), o coeficiente de permeabilidade do material inserido no sistema de drenagem ( $K_{fv}$  e  $K_{fh}$ ) e o comprimento do filtro ( $L$ ).

$$B = \sqrt{\frac{Q \cdot L}{K_{fh}}} \quad (\text{Altura do filtro horizontal})$$

$$b = \frac{Q}{K_{fv}} \quad (\text{Espessura do filtro vertical})$$

Adicionalmente aplica-se o gradiente hidráulico ( $h/L$ ), isto é, a relação entre a coluna de água e o comprimento de percolação máximo admitido no dimensionamento da espessura do filtro horizontal. A largura do filtro vertical ( $b$ ), por sua vez, é considerada geralmente como sendo entre 0,7 m e 1,0 m devido a aspectos construtivos para tornar possível a escavação da zona do filtro.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das informações obtidas e informadas no artigo, conclui-se que a segurança de uma barragem de terra quanto aos fenômenos piping e liquefação do solo requer o estudo do fluxo pelo corpo do barramento e sua fundação.

No projeto de barragem de terra, dois pontos devem ser analisados criteriosamente, o fluxo pela fundação e pelo corpo do aterro, visto que caso não sejam analisados de maneira eficiente podem desenvolver processos erosivos que levam ao piping. Além do processo erosivo, o aumento descontrolado da poropressão ocasionado pela saturação do maciço é o principal fator que leva a estrutura ao colapso pelo fenômeno da liquefação.

Nessa perspectiva, o dimensionamento correto do sistema interno de drenagem e a inserção de elementos na fundação que aumentam a segurança contra este fenômeno, devem ser tra-

tados como prioridades para evitar a ruptura do barramento.

#### REFERÊNCIAS

Assis, A. P. (2003). Apostila de barragens. Disciplina do curso de pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. ENC/FT. Brasília, DF.

Freire Neto, J. P. (2009). Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO.

Garcia, F. A. F. (2024). Segurança de barragens de terra contra os fenômenos de piping e liquefação do solo. Monografia de especialização apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

Humes, Ciro. (1985). Porosimetria de filtros de proteção. Uma análise de critérios de filtro para materiais granulares. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Humes, Ciro. (1995). Considerações sobre a determinação da distribuição de vazios de filtros de proteção de obras geotécnicas. Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Machado, Nathália Couto. M149r Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação. 2017.

Massad, F. (2010). Obras de terra: curso básico de geotecnia. 2 ed. São Paulo. Oficina de Textos.

Oliveira, A. G. S. (2008). Análise da eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem utilizados em fundações permeáveis de barragens de Terra. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Oliveira, P. H. A. (2012). Problemas hidrogeológicos em barragens envolvendo o mecanismo de retroerosão tubular. Trabalho Final de Curso: Graduação em Geologia

Sandroni, S. (2012). Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento. Curso de Mestrado da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro

Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. e Talbot, J. R. (1984). Basic properties of sand and gravel filters. *Jornal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 100 (6): 684: 700.

Silveira, Araken. (1963). Umas considerações sobre filtros de proteção (Uma análise do carreamento). Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Souza Pinto, C. (2006). Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3ª Ed. São Paulo. Oficina de Texto.

Souza, A. N. (2017). Análise do comportamento da barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves – Açu/RN – durante sua fase de construção, primeiro enchimento e operação do reservatório. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Souza, M. M. (2013). Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC/ Mariana Miranda de Souza. – Rio de Janeiro – RJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

# ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO DE BANCO DE DADOS DE SONDAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOMECÂNICO DE UMA CAVA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

PREPARATION AND VALIDATION OF A DRILLING DATABASE AND CONSTRUCTION OF A GEOMECHANICAL MODEL IN OPEN PIT MINE OF QUADRILÁTERO FERRÍFERO

ORLANDO FARIA PRADO

Geólogo, Pós-Graduado em Geologia pela UFSC. e-mail: orlandoprado.geologia@gmail.com

MURILO DA SILVA ESPÍNDOLA

Engenheiro, Doutor em Engenharia Civil pela UFSC. e-mail: murilo.espindola@ufsc.br

CRISTIAN NUNES ESTEVAM

Geólogo, Pós-Graduado em Geociências pela USP. e-mail: cristian.estevam@usp.br

## RESUMO ABSTRACT

O gerenciamento seguro e eficiente de operações de mineração a céu aberto é um desafio, que pode ser potencializado por inconsistências em dados geomecânicos. Propriedades geomecânicas são indispensáveis para o conhecimento de rochas e solos e, devido ao crescente volume de dados e informações gerados em cada empreendimento minerário e a quantidade de equipes envolvidas durante campanhas de sondagens, é necessário realizar a validação destes dados. A validade dos dados é fundamental para a produção de modelos tridimensionais acurados e analisar sua qualidade, é uma lacuna corriqueira em projetos geomecânicos. Este estudo visa abordar essa lacuna, focando na avaliação da consistência de um banco de dados geomecânicos, sua validação e análises. Utilizando dados de uma mina brasileira, agora inativa, aplicamos critérios de classificação geomecânica para criar um modelo tridimensional geomecânico de uma cava hipotética. A metodologia empregada envolveu a correlação de parâmetros geomecânicos e a aplicação de critérios de classificação como o *Rock Mass Rating* (RMR) e o *Weak Rock*. Os resultados indicam uma melhoria significativa na precisão dos modelos geomecânicos com a adoção de variáveis *proxy* cor-

The safe and efficient management of open-pit mining operations is a challenge, potentially intensified by inconsistencies in geomechanical data. Geomechanical properties are crucial for understanding *rocks* and *soils*. Due to the rising volume of data and information generated in each mining project, and the multiple teams involved during drilling campaigns, data validation is essential. The data's validity is key for creating accurate three-dimensional models. Analyzing this validity is a common gap in geomechanical projects. This study aims to fill this gap by evaluating the consistency of a geomechanical database, its validation, and analyses. Using data from a now-inactive Brazilian mine, we applied geomechanical classification criteria to create a 3D geomechanical model of a hypothetical pit. The methodology involved correlating geomechanical parameters and applying classification criteria like the *Rock Mass Rating* (RMR) and *Weak Rock*. The results show a significant improvement in the accuracy of geomechanical models with the use of correlated proxy variables. This contributes to safer, more efficient mining operations. This work serves as a guide for integrating geomechanical data into 3D models, aiding

relacionadas, o que contribui para a operação de minas mais seguras e eficientes. Este trabalho serve como um guia para a integração de dados geomecânicos em modelos 3D, contribuindo para futuras pesquisas e aplicações práticas na indústria de mineração.

**Palavras-chave:** propriedades geomecânicas; banco de dados geomecânico; validação; modelo geomecânico tridimensional.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo geomecânico de cavas é fundamental para garantir a segurança e eficiência das operações de mineração a céu aberto. O maciço que contém o depósito mineral sofre alteração durante o processo de lavra (Braga Neto, 2020), que implicam na contínua mudança das características geomecânicas. É claro inferir que a caracterização das propriedades geológicas e geotécnicas, que abrange os estudos relacionados à descrição geológica do maciço e o levantamento dos parâmetros geotécnicos deste, são fundamentais para garantir a segurança operacional. É importante destacar ainda, que a utilização de modelos geomecânicos vem sendo construída há anos por pesquisadores e profissionais na indústria do petróleo, porém ainda são incipientes os trabalhos no âmbito da mineração.

A elaboração de modelos geomecânicos requer o levantamento de dados e informações acerca das propriedades geológicas e geotécnicas de uma área. Geralmente o levantamento de dados é realizado por diversas equipes, o que pode resultar em inconsistências nos parâmetros de descrição, que são posteriormente incorporadas aos modelos. O agrupamento destes dados e informações em banco de dados e elaboração de modelos tridimensionais vem sendo cada vez mais discutida no meio técnico e acadêmico como nos trabalhos de Hammah & Curran (2006), Vatcher *et al.* (2016), Kring & Chatterjee (2020), Liu *et al.* (2021) e Aquino *et al.* (2021).

Com o avanço das tecnologias de coleta de dados e modelagem 3D, torna-se cada vez mais importante compilar, validar e analisar os dados e informações gerados durante a operação de uma mina. Neste sentido, buscou-se avaliar a consistência dos dados de um projeto de mineração e elaborar um modelo geomecânico tridimensional,

future research and practical applications in the mining industry.

**Keywords:** geomechanical; drilling; data base; model; classification

que represente a mina, através de banco de sondagens contendo descrições geomecânicas dos testemunhos. As classes geomecânicas aqui estudadas derivam dos trabalhos de referência do *Rock Mass Rating - RMR* de Bieniawski (1993) e do *Weak Rock* (Martin & Stacey 2018).

O objetivo desta pesquisa é a elaboração e avaliação da consistência de um banco de dados, analisando a correlação dos parâmetros geomecânicos correlacionáveis e aplicando critérios de classificação geomecânica, obtendo-se trechos de classe geomecânica em furos de sondagem, que subsidiaram a elaboração de um modelo tridimensional geomecânico de uma cava hipotética.

A base de dados utilizada é oriunda de uma mina brasileira que teve sua operação encerrada e devido ao sigilo imposto pelos proprietários do negócio, ainda vigente, é tratada aqui como uma cava hipotética.

## 2. MATERIAIS E MÉTODO

Para alcançar o objetivo proposto esta pesquisa foi dividida em três fases que contemplam a i) compilação, organização e validação do banco de dados espacial, ii) elaboração de seções de resistência mecânica das rochas, grau de alteração e seções geomecânicas e iii) elaboração do modelo geomecânico após a análise crítica dos resultados.

A base de dados foi compilada a partir de levantamentos geológicos e geomecânicos executados durante a operação da mina pela empresa que a opera e por empresas terceiras que prestaram serviços de prospecção de dados em campanhas de sondagens.

A base de dados compilada tem dois tipos principais de dados: sondagens e modelo 3D geológico-geomecânico. Os dados básicos das sondagens, onde constam o código da sondagem, a posi-

ção espacial (X, Y e Z, em EPSG 31982 e o azimute ( $^{\circ}$ )), foram agrupados e registram as características básicas dos intervalos amostrados. Os dados dos parâmetros utilizados na classificação geomecânica, como, unidades litológicas dadas em: litotipos naturais (Itabiritos, Filitos, Hematitas, Xistos, Rochas intrusivas, Quartzitos, Lateritas, Canga, Brecha e Dolomito), litotipos antrópicos (Aterros, Material Rolado, Pilhas de Estéril) e sem recuperação, resistência-consistência (Mega pascal, ISRM adaptada, 1981), intemperismo (ISRM, 1981), grau de fraturamento (fraturas/metro, modificado pelo IPT, 1997), RQD (porcentagem, conforme Deere, 1963), tipo de descontinuidade (ABGE, 1988), espaçamento (milímetros, ABGE, 1988), abertura das paredes (milímetros, Bieniawski, 1989), rugosidade (ISRM, 1981), material de preenchimento (Bieniawski, 1989), intemperismo da parede (ISRM, 1981), persistência (ISRM,

1981) e condição de água (ISRM, 1981) compõem as variáveis aqui estudadas dos intervalos amostrados na sondagem, aqui tratados como intervalos geomecânico. Os dados de investigação direta foram compilados em seu completo teor, fato que permitiu a validação integral dos dados.

Dados adicionais de ensaio de granulometria foram obtidos para realizar análises cruzadas com o parâmetro litológico do material quanto a sua resistência dividido em materiais: compacto, médio e friável. (Quadro 1). Foi definido um parâmetro de validação para ensaios granulométricos: que apontaram massa de sedimentos com percentual de massa, granulometria maior que 200 mm, superior a 50% foram classificados como material compacto; quando o percentual de massa representa entre 50% e 30% foi considerada material médio; e para percentual de massa menor que 30% foram consideradas como material friável.

**Quadro 1** - Correlação de dados proposta para os parâmetros de resistência e análises granulométricas.

Índice de Resistência		Ensaio de Peneiramento	Resistência da Litologia
R0	Extremamente Branda	Percentual de massa passante < 30% passante na peneira 200 mm	Friável
R1 (-)	Muito Branda (inferior)		
R1 (+)	Muito Branda (superior)		
R2 (-)	Branda	Percentual de massa entre 50% e 30 % passante na peneira 200 mm	Média
R2 (+)	Pouco resistente		
R3	Medianamente resistente		
R4	Resistente		
R5	Muito resistente	Percentual de massa passante > 50% passante na peneira 200 mm	Compacta
R6	Extremamente resistente		

O grau de fraturamento é expresso pela quantidade de descontinuidades por metro linear de maciço rochoso de acordo com o proposto por Guidicini (1972). O RQD representa a relação entre a soma de todos intervalos de material maiores que 10 cm e o comprimento total do intervalo amostrado que é de um metro, variando valores de 0 até 100.

Os intervalos amostrados considerados válidos foram então classificados geomecanicamente com base nos critérios de classificação geomecânica a partir do sistema *Weak Rock* proposto por Martin & Stacey (2018) e o sistema *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1993) a fim de abranger representatividade dos diferentes litotipos presentes na

cava. Os sistemas de classificação geomecânica de maciços englobam critérios qualitativos e/ou quantitativos, fornecendo indicações no que diz respeito às propriedades intrínsecas sobre a qualidade do maciço. A aplicabilidade de cada sistema de classificação está relacionada ao grau de resistência da rocha intacta apresentado em cada intervalo amostrado. As rochas presentes na cava em estudo apresentam em sua maioria um grau de resistência baixo, sendo assim, o autor optou por utilizar o sistema de classificação RMR (Quadro 2) em litologias que apresentam valores de resistência entre as classes R2 (+) a R6, o sistema de classificação *Weak Rocks* para litologias que apresentam valores de resistência R0 e R2 (-) (Quadro 3).

**Quadro 2** - Parâmetros e pesos relativos para classificação geomecânica no sistema RMR. Traduzido de Bieniawski (1993).

1 - PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS									
PARÂMETROS			INTERVALO DE VALORES						
1	Resistência do material intacto	Índice de resistência à carga pontual (Mpa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Para esses valores baixos, é preferível realizar o teste de compressão uniaxial		
	Resistência à compressão uniaxial (Mpa)		> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
	Peso		15	12	7	4	2	1	0
2	Qualidade do testemunho (%): RQD (do inglês - <i>Rock Quality Designation</i> )		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Peso		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 0,6 m	0,6 m - 2 m	200 m - 600 mm	60 mm - 200 mm	< 60 mm		
	Peso		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas descontínuas, fechadas, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura < 1 mm, paredes duras	Superfície pouco rugosa, abertura < 1 mm, paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5 mm ou abertura de 1 mm - 5 mm, contínuas	Preenchimento mole > 5 mm ou abertura > 5 mm, contínuas.		
	Peso		30	25	20	10	0		
5	Água subterrânea	Infiltração em 10 m de túnel (L/min)	0	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
	Relação entre a pressão da água na fratura e a tensão principal		0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	Condições gerais		Seco	Umedecido	Úmido	Gotejamento	Fluxo abundante		
	Peso		15	10	7	4	0		
2 - PESO DE AJUSTE EM FUNÇÃO DA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES									
Direção e mergulho das descontinuidades			Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável		
Peso	Túneis		0	-2	-5	-10	-12		
	Fundações		0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60		
3 - CLASSE DE MACIÇOS ROCHOSOS DETERMINADA PELA SOMATÓRIA DOS PESOS									
Somatória dos pesos			100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20		
Classe nº			I	II	III	IV	V		
Descrição			Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito pobre		
4 - CARACTERÍSTICAS DOS MACIÇOS ROCHOSOS SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO RMR									
Classe nº			I	II	III	IV	V		
Stand-up time médio			20 anos para abertura de 15 m	1 ano para abertura de 10 m	1 semana para abertura de 5 m	10 horas para abertura de 2,5 m	30 minutos para abertura de 1 m		
Coesão da massa rochosa (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Ângulo de atrito (graus)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		

**Quadro 3** - Parâmetros de resistência da ISRM modificada (Traduzido de Martin & Stacey,2018).

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA	DESCRIÇÃO	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL Martelo	AVALIAÇÃO DE CAMPO						MÉTODO UTILIZADO
			Martelo	risco canivete <sup>1</sup>	queda canivete	raspagem canivete <sup>1</sup>	risco unha	pressão manual	
R6	Extremamente resistente	>250	lasca	não	não	não	não	não	RMR 1993 não não não não
R5	Muito resistente	250-100	quebra com dificuldades e vários golpes	não	não	não	não	não	
R4	Resistente	100-50	quebra com vários golpes	risco superficial	-	não	não	não	
R3	Medianamente resistente	50-25	quebra com dificuldade com um golpe			com muita dificuldade	não	não	
R2	R2+ (concreto)	Pouco Resistente 25 - 10	quebra com um golpe	risca	ponto pequeno	com dificuldade	não	não	
	R2- (solo-cimento)	Branda 10 - 5	fragmenta com um golpe		ponto grande	produz pó	risco superficial	não	WEAK
R1	R1+ (tijolo)	Muito branda superior 5 - 3		desagrega	risca fundo	penetra	com facilidade produz muito pó	risca	
	R1- (saprólitos)	Muito branda inferior 3 - 1	corta (separa)		descasca esculpe		penetra	quebra as bordas	VERY WEAK
R0	Extremamente branda	1 - 0,25		-	penetra	-	corta	desagrega	EXTREMELY WEAK

<sup>1</sup> varia conforme presença de minerais de hábito lamelar

Método de avaliação da consistência das Rochas
1 - Reação ao golpe com martelo de geólogo
2 - Resistência ao risco com a ponta do canivete
3 - Reação à queda do canivete
4 - Reação à raspagem da lâmina do canivete na borda da amostra
5 - Reação ao risco com a unha
6 - Reação à pressão dos dedos

Índice de Reação ao Método	
	ALTA
	MÉDIA
	BAIXA

A elaboração de seções geomecânicas compreendeu a segunda etapa do trabalho e foi realizada a partir do banco de dados de sondagens validado, resultando em 24 seções guias a partir das classes geomecânicas RMR (1993) e classes geomecânicas do *Weak Rocks* (2018), com espaçamento médio de 1.668 m entre as seções. Para as

seções do grau de intemperismo e do grau de resistência foram geradas 12 seções. Todas estas 24 seções seguiram padrão de melhora da qualidade do maciço com o aumento da profundidade, considerando os materiais de cobertura para agrupar regiões com comportamentos geomecânicos similares (Figura 1).

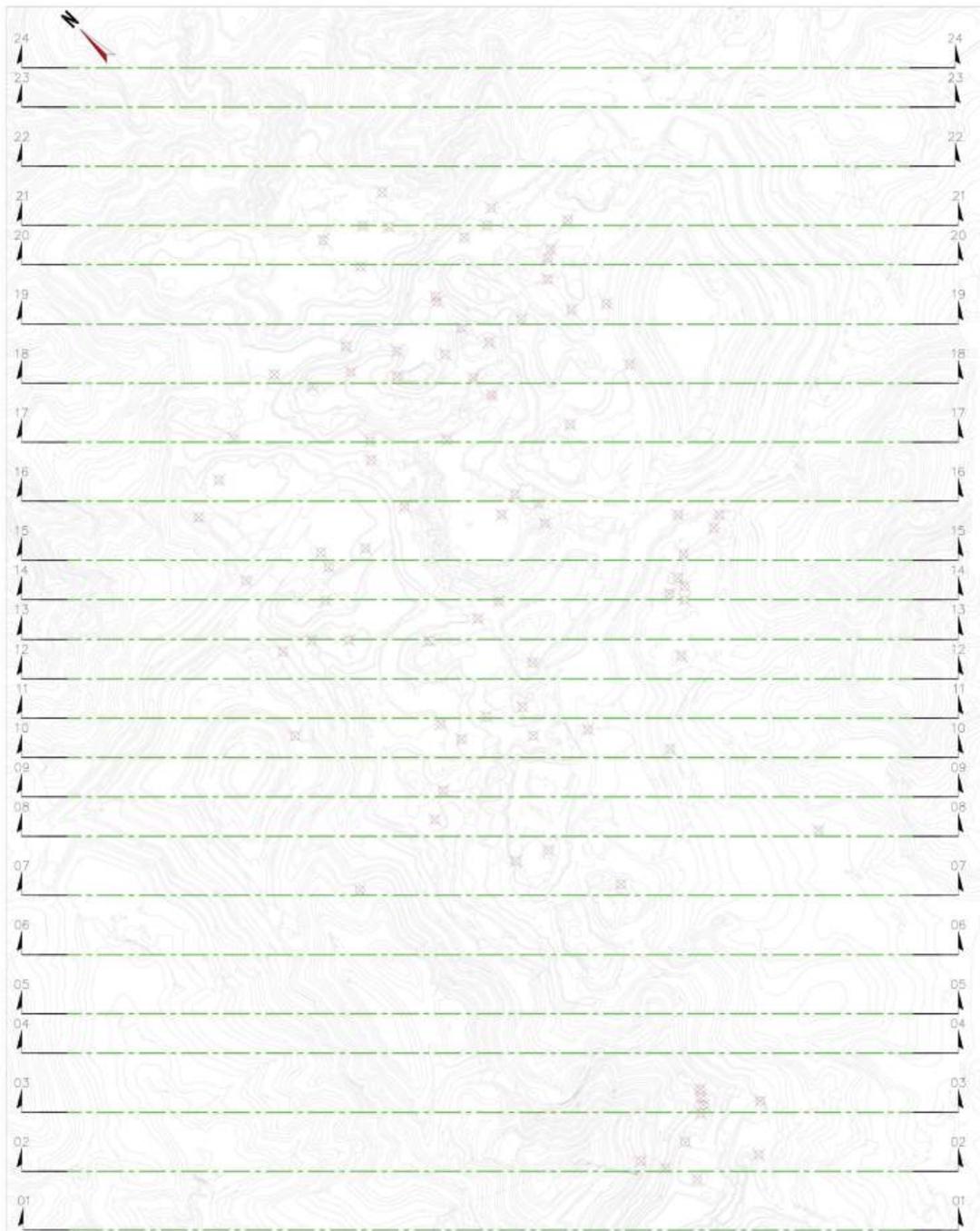
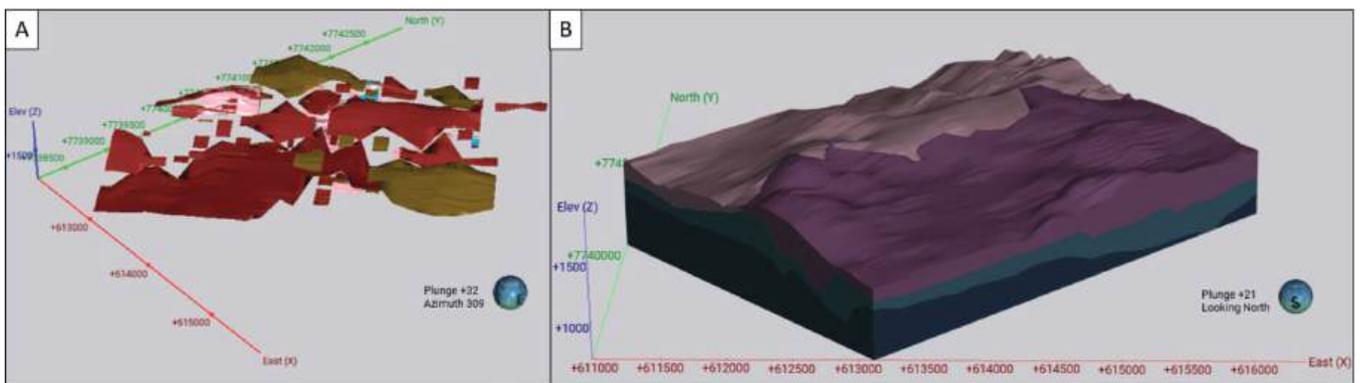


Figura 1 - Localização das seções geomecânicas elaboradas e as sondagens utilizadas.

A produção do modelo geomecânico, último procedimento desta pesquisa, foi realizada com o programa Leapfrog Geo a partir dos dados validados das sondagens, mapeamento, seções geomecânicas e de modelo geológico preexistente. Superfícies foram geradas a partir das seções geomecânicas para, posteriormente, criar os sólidos. Os sólidos tomaram como referência as superfícies e os dados de sondagens, de modo a representar todo o registro geológico amostrado. A estimativa do modelo de blocos teve início com a validação dos sólidos a partir do modelo de blocos geológicos, onde os blocos tiveram 70 m, os sub-blocos tiveram 10 m, e o número de blocos para X, Y e

Z, foi de 60, 44 e 120, respectivamente. Devido à dimensão dos blocos, foi realizado carimbo com as classes geomecânicas identificadas nos sólidos (Figura 2A) e nas lentes (Figura 2B), para que não houvesse subestimativa ou perda de informações de camadas delgadas. A análise exploratória dos dados foi realizada para identificar padrões e auxiliar na escolha de parâmetros das estimativas. A estimativa foi realizada com o método vizinho mais próximo e inverso do quadrado da distância, com raio de busca de 400, 600 e 200 m para X, Y e Z, respectivamente. Os resultados foram então comparados em termos de volume, média e comportamento espacial.



**Figura 2** - (A) Sólidos gerados das classes; (B) Lentes após a geração das superfícies.

Esta pesquisa estudou 21.996,00 metros amostrados em testemunhos de sondagem, contido em 180 furos de sondagens, onde foram agrupados materiais de comportamento semelhante nos parâmetros utilizados, a partir da documentação dos furos.

A fim de se averiguar a veracidade das informações descritas nas sondagens, realizou-se uma série de validações. A primeira parte da análise concentrou-se no levantamento das informações faltantes, revelou que para os 21.996,00 metros de sondagem analisados, 68% não possuem a descrição do preenchimento de discontinuidades; em 30% dos metros investigados na base de dados não há descrição da abertura das discontinuidades; em 26% não há descrição do intemperismo da parede; para 21% a rugosidade não é descrita; em 17% a estrutura não é descrita e também em 17% o tipo de material de preenchimento não é apontado. Nos intervalos que não possuem descrição de algum dos parâmetros supracitados, quando pos-

sível, foi adotado valores de referência de outros intervalos próximos.

Todos os intervalos apresentavam a descrição do material quanto a litologia, possui predominância de variedades de itabiritos (46,1%), filitos (15,0%), hematitas (8,7%); e apresenta contribuição de aterro (8,0%), xistos (6,6%), rochas intrusivas (4,3%), quartzito (3,1%), sem recuperação (2,0%), laterita (1,8%), material rolado (1,4%), canga (1,2%), brecha (1,1%), material pilha de estéril (0,5%) e dolomito (0,3%).

As etapas seguintes consistiram na validação das informações descritas, comparando aqueles que possuem correspondência.

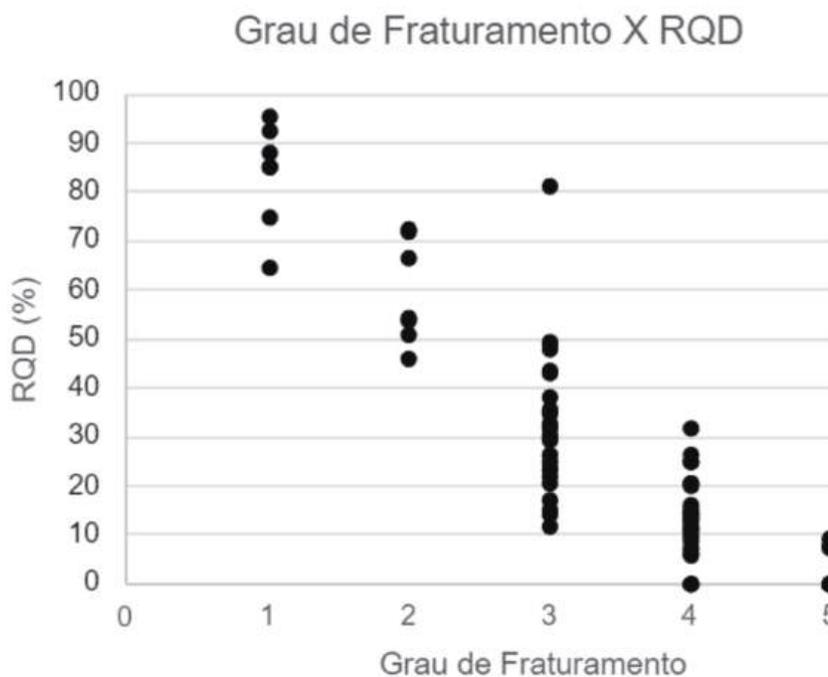
A validação da coerência entre os Parâmetros de Resistência e o Grau de Alteração utilizando os critérios apresentados no Quadro 4, demonstrou uma aderência satisfatória entre os dois parâmetros, visto que 85,1 % da correlação entre os dados é compatível, 12,4 % são incompatíveis e 2,5 % não puderam ser determinadas pela ausência de descrição de algum dos parâmetros.

**Quadro 4** - Critério de Validação parâmetros de resistência frente ao grau de alteração.

Índice de Resistência		Grau de alteração	Resistência da Litologia
R0	Extremamente Branda	W6 W5 W4	Friável
R1 (-)	Muito Branda (inferior)		
R1 (+)	Muito Branda (superior)		
R2 (-)	Branda		
R2 (+)	Pouco resistente	W4 W3	Média
R3	Medianamente resistente		
R4	Resistente		
R5	Muito resistente	W3 W2 W1	Compacta
R6	Extremamente resistente		

Foi realizada uma análise na aderência entre os valores de fraturamento e RQD nos intervalos amostrais. Para a primeira classes de fraturamento foi identificada apenas uma amostra, sendo o RQD de 59,3; para a segunda classe o RQD médio vale 84,9 e foi calculado a partir de 8 amostras; a terceira classe possui 14 amostras e RQD médio

de 66,1; a quarta classe apresenta 42 amostras que exibem RQD médio de 33,5; a quinta classe teve 41 amostras computadas e RQD médio de 13,4; e a sexta classe possui 173 amostras com RQD médio de 0,2. A correlação entre os parâmetros é exibida na Figura 3 .



**Figura 3** – Correlação entre Grau de Fraturamento e RQD.

Para a análise do grau de fraturamento frente ao espaçamento das descontinuidades, utilizou-se cinco classes de acordo com o fraturamento indicado no intervalo amostral. Para a primeira classe de fraturamento (maciço), foi identificada apenas uma amostra, sendo o espaçamento médio de 3,0 mm.; para a segunda classe (pouco fraturado) o espaçamento médio também foi de 3,0 mm, calcu-

lado a partir de 4 amostras; a terceira classe (moderadamente fraturado) possui 28 amostras e espaçamento médio de 2,0 mm.; a quarta classe (muito fraturado) apresenta 16 amostras que exibem espaçamento médio de 1,8 mm.; a quinta classe (intensamente fraturado) teve 37 amostras computadas e espaçamento médio de 1,7 mm. A correlação entre os parâmetros é exibida na Figura 4.



**Figura 4** - Correlação entre Grau de Fraturamento e Espaçamento

Uma última análise foi realizada comparando a tipologia do material quanto à resistência frente ao ensaio de peneiramento. Esta análise só foi possível ser realizada em 572 intervalos (34,0%) dos 1306 intervalos totais, pois apenas estes apresentavam ambas as variáveis. A primeira classe contempla 252 intervalos (19,3%) que foram classificadas como material litológico friável, a classe litológica do tipo médio foi identificada em 10 intervalos (0,8%) e a classe material litológico do compacto teve 76 intervalos identificados (5,8%). Dos 572 intervalos, 234 (17,9%) foram definidos como inválidos devido a não aderência dos parâmetros de validação, ou seja, havia divergências entre parâmetro litológico quanto a resistência descrita na sondagem e o resultado de ensaio granulométrico executado.

Os resultados acima submetidos a validação foram então agrupados e se dois parâmetros ou mais estiveram ausentes, tais como grau de fraturamento, RQD, resistência e grau de intempe-

risimo, o intervalo amostral com estes parâmetros faltantes foi descartado.

Finalizada a validação cruzada de dados e informações, o banco de dados foi considerado validado, onde 21.644,06 m (98,4 %) dos intervalos amostrados apresentaram dados e informações compatíveis com as descrições fornecidas e 351,94 m (1,6 %) foram considerados incompatíveis. Os dados e informações incompatíveis foram assim desconsiderados por não possuírem as informações necessárias para a classificação geomecânica.

Para todos os intervalos amostrais validados foram aplicados os critérios de classificação geomecânica *Weak Rocks* (Martin & Stacey, 2018) e *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1993). Foram determinadas nove classes gerais (Quadro 5) sendo cinco delas relativas ao universo RMR (67,6%), quatro delas representativas do universo *Weak Rock* (19,7%) e duas adicionais que representam os perfis intempéricos de solo desenvolvidos na cava e aterros (12,8%).

**Quadro 5** - Correlação entre índice de resistência e o sistema de classificação utilizado (Martin & Stacey, 2018 Adaptado)

Índice de Resistência		Resistência à compressão Uniaxial (Mpa)	Sistema de classificação utilizado	Classe Geomecânica
R0	Extremamente Branda	1,0 - 2,5	Weak Rocks	Extremely Weak
R1 (-)	Muito Branda (inferior)	3,0 - 1,0		Very Weak
R1 (+)	Muito Branda (superior)	5,0 - 3,0		Weak
R2 (-)	Branda	10,0 - 5,0		
R2 (+)	Pouco resistente	25,0 - 10,0	RMR	Classe V
R3	Medianamente resistente	50 - 25		Classe IV
R4	Resistente	100 - 50		Classe III
R5	Muito resistente	250 - 100		Classe II
R6	Extremamente resistente	>250		Classe I

No universo de classificação geomecânica utilizando a metodologia RMR, à classe de maciço II (bom) o valor médio de RMR determinado foi de 69,7 e apresentou desvio padrão de 6,1; para a classe de maciço III (médio) o RMR médio foi de 50,4 e a dispersão das medidas foi de 5,7; para a classe de maciço IV (pobre) o valor médio de RMR foi de 36,0 e o desvio padrão foi de 5,7.

Após a análise estatística dos dados para o universo RMR (Bieniawski, 1993), notou-se que a classe de maciço IV apresenta valor médio de RMR 35 para o Itabirito e o Filito; a classe de maciço III apresenta valor médio de RMR 50 para o Itabirito e Filito, valor médio de RMR de 51 para as Hematita e RMR de 52 para as Rochas Intrusivas; a classe de maciço II apresenta amostragem apenas no Itabirito com valor médio de RMR 70.

Nas amostras representativas ao universo de classificação geomecânica *Weak Rocks* (Martin & Stacey, 2018), obteve-se que 205 amostras (31,4 %) foram classificadas como *weak rock*; amostras classificadas como *very weak* foram 136 (20,8 %); e *extremely weak* representam 61 (9,3 %) amostras.

Das litologias representativas englobadas pelo universo de classificação *Weak Rocks* (Martin & Stacey, 2018), o Itabirito apresenta 235 intervalos, divididos nas classes: *weak* (59,6%) *very weak* (27,7 %) e *extremely weak* (12,8%); o Filito apre-

senta 70 intervalos amostrais divididos em: *weak* (27,1%), *very weak* (51,4%) e *extremely weak* (21,4%) *very weak* (51,4%); as hematitas possuem 36 intervalos amostrais divididos em: *weak* (66,7%), *very weak* (22,2%) e *extremely weak* (11,1%); as rochas intrusivas possuem 19 intervalos amostrais, divididas nas classes: *weak* (26,3%), *very weak* (68,4%) e *extremely weak* (5,3%); o Quartzito possui 18 intervalos amostrais divididos nas classes: *weak* (44,4%), *very weak* (27,8%) e *extremely weak* (27,8%).

As 24 seções litológicas-geomecânicas intersectaram todas as classes litológicas e todas as classes geomecânicas, representando o comportamento maciço ao longo de 66,6 km de transectos. A cava é predominantemente coberta por solos lateríticos, aterro e canga. Este comportamento é verificado em todas as seções e evidenciado pela predominância de classes geomecânicas pertencentes às classes *extremely weak*, *weak* e maciços classe IV, III e II. As classes geomecânicas são controladas pelas dobras do terreno, assim como a litologia e a profundidade.

A área modelada representa 18 km<sup>2</sup> e ocorreu somente onde existiram seções geomecânicas, resultando em um modelo geomecânico onde cada bloco gerado pelo modelo em determinada classe possuem o mesmo valor (Figura 5).

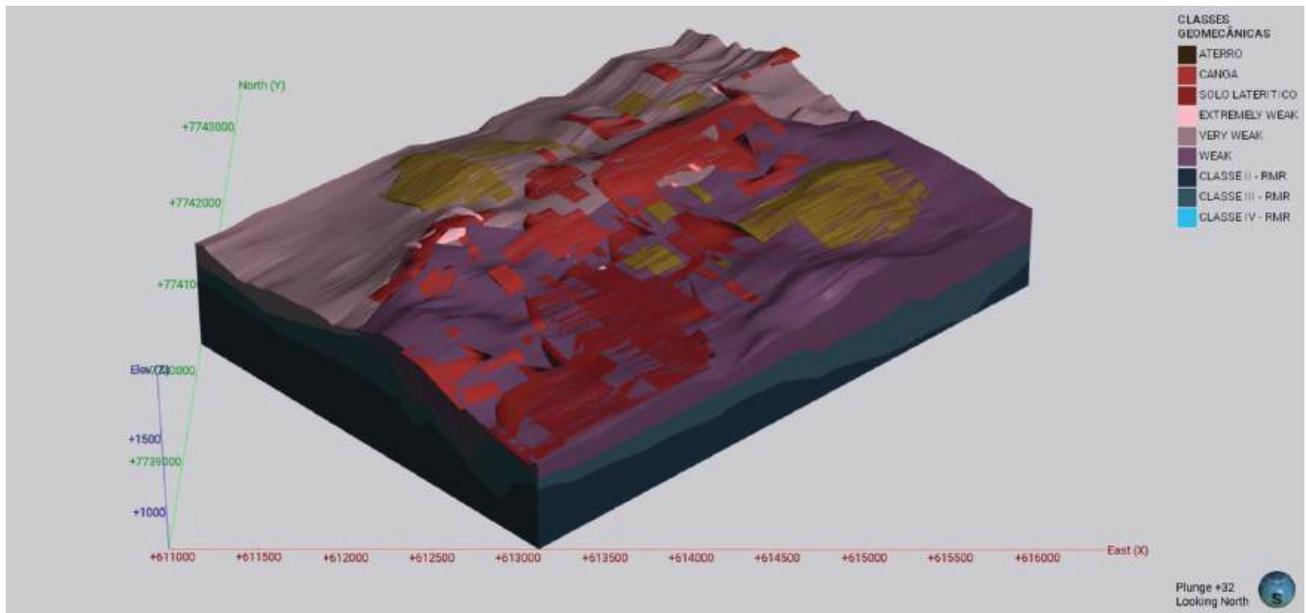


Figura 5 - Modelo Geomecânico blocos tridimensionais com os blocos carimbados por classe.

Considerando o método *Weak Rocks* (Martin & Stacey, 2018), a classe *extremely weak* ocorre como lentes e camadas não contínuas, de até 50m de espessura, tanto na formação ferrífera friável como nas encaixantes estéreis, e é restrita a profundidades superiores a cota 1100m. A classe *very weak* é identificada como uma camada contínua nas encaixantes leste, limitada pelo contato com a formação ferrífera, ocorrendo subordinadamente como lentes na formação ferrífera friável e no encaixante oeste. As rochas classificadas como *weak* são as mais frequentes descritas nas sondagens e ocorrem na forma de camadas contínuas nas encaixantes da porção oeste e em meio a formação ferrífera friável, tanto como lentes como em corpos espessos.

Considerando a classificação de Bieniawski (1993) a classe de maciço IV não é comum, pois ocorre sob forma de lentes, tanto na formação ferrífera quanto nas encaixantes (filito e rochas intrusivas). Apresenta resistência variando entre R2+ até R6 e grau de alteração W2 a W4. A classe de maciço III é predominante, quando consideramos Bieniawski (1993) e ocorre principalmente nas tipologias compactas (lentes de hematita e itabirito), no corpo principal de itabirito em profundidade e em rochas encaixantes profundas. As cotas de topo deste contato variam entre 1500m e 975m, já as cotas de base entre 1300m e 672m. A espessura do maciço de classe III varia entre 75m e 288m.

O grau de resistência encontrado é entre R2+ a R6, com alteração entre W1 e W4.

A classe de maciço II predomina em rochas encaixantes estéreis e formação ferrífera em profundidades, em média, abaixo da cota 1200 m. Raramente ocorre em lentes de hematita e itabirito compacto em meio a formação ferrífera friável, além da ocorrência pontual de uma grande lente na rocha intrusiva na porção sudoeste. Esta classe possui grau de resistência entre R3 e R6 e alteração entre W1 a W4. A classe de maciço I foi obtida em apenas uma sondagem, entretanto não foi representativa o suficiente para ser modelada devido a sondagens mais próximas exibirem outro comportamento geomecânico.

### 3. DISCUSSÃO

Após todas as análises realizadas nos intervalos amostrais dos furos de sondagem, a cava hipotética é composta pelas litologias predominantes: Itabiritos, Filitos e Hematitas, além de Quartzitos, Rochas Intrusivas e coberturas. As litologias que contêm formações ferríferas foram divididas entre friáveis, médias e compactas de acordo com os ensaios de peneiramento, onde foi feito uma validação entre a descrição tipológica de resistência da litologia com o ensaio de peneiramento, nos intervalos em que os ensaios foram efetivamente

realizados, permitindo a validação e a desconsideração de certos trechos que não apresentaram resultados de correlação entre os dados.

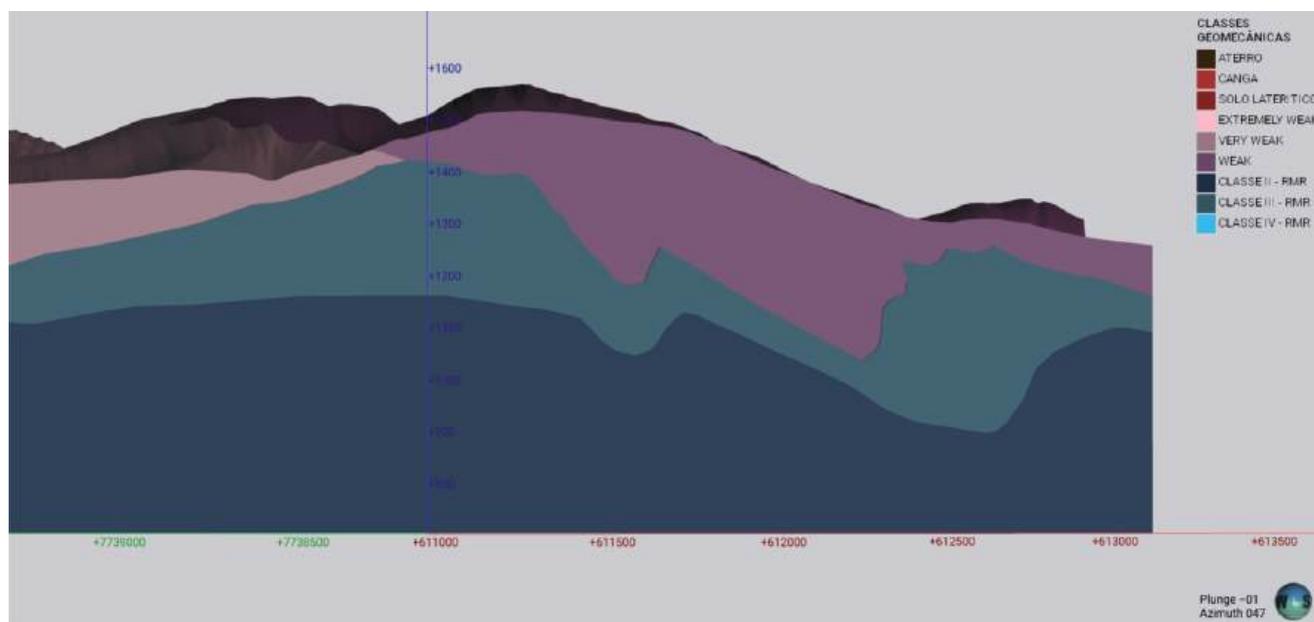
Para todos os intervalos foi realizada a classificação geomecânica do trecho, através dos sistemas RMR e *Weak Rocks*. As litologias são preferencialmente mais representativas no sistema de classificação *Weak rocks*, com as classes *very weak/weak rock* associada aos litotipos friáveis das formações ferríferas. Filitos e Rochas Intrusivas com valores médios de resistência R2; a classe *extremely weak* restringe-se apenas no setor leste com corpos dispersos com valores médios de resistência R0.

O valor de resistência à compressão uniaxial foi estimado, sendo recomendada a execução de ensaios triaxiais em litologias que apresentem valores de resistência < 25 Mpa, restrito a classes geomecânicas regidas pelo universo de classificação *Weak Rocks*, sendo representativo na cava

com maciço classe *extremely weak, very weak, weak* e RMR classe V

As litologias regidas pelo sistema RMR estão associadas às formações ferríferas médias e compactas em maior expressividade, e pequenas lentes associadas aos Filitos. A Classe III do sistema RMR é a com maior expressividade na cava, relacionado aos itabiritos médios com alto a muito alto grau de fraturamento e a Rocha intrusiva no setor oeste; a classe IV associado a Itabiritos médios com grau de fraturamento muito alto e Filito da porção nordeste da cava; a classe II ocorre majoritariamente nos litotipos compactos e médios com valores de resistências elevado (R4).

As classes de maciço RMR (Classes II, III e IV) ocorrem, em superfície, como lentes e corpos em meio de maciços classificados como *Weak Rock*. A partir da cota 1150m de acordo com o modelo, ocorrem apenas maciços Classe II (Figura 6).



**Figura 6** - Seção tipo com as principais classes geomecânicas, indicando a ocorrência superficial das variedades *Weak Rocks* e Classes RMR não aflorantes.

Apesar de haver diversos intervalos com parâmetros de classificação faltantes, não houve implicações para a determinação da classe geomecânica na área. Este fato pode ser atribuído a escolha de parâmetros de classificação conservadores, quando há disponibilidade de variáveis diretamente correlacionáveis, sempre preconizando

a segurança nesta associação. A qualidade do modelo proposto mais está associada à quantidade e qualidade dos dados de entrada que dos métodos utilizados para a classificação.

Na validação do método de interpolação estatístico mais adequado para a elaboração do modelo geomecânico da cava proposta, o método do

Vizinho Mais Próximo é o mais adequado, pois este método estima uma quantidade maior de valores para blocos vizinhos, atribuindo valores apenas no alcance do raio de busca determinado, tendendo a diminuir com o aumento da distância.

Durante o processo de revisão e validação do modelo geomecânico elaborado, algumas divergências foram encontradas, quanto à descrição litológica do trecho quando comparada com

a classe geomecânica. A exemplo a Figura 7, onde a litologia é descrita como Itabirito Friável, porém a classe geomecânica produto da modelagem é dita como *Weak*. Essa divergência pode ser explicada pela quantidade de investigações utilizadas na construção do modelo, que apesar de numerosas (180 furos) espaçadas em 18 km<sup>2</sup> acabam não sendo o suficiente para um modelo idêntico à realidade.

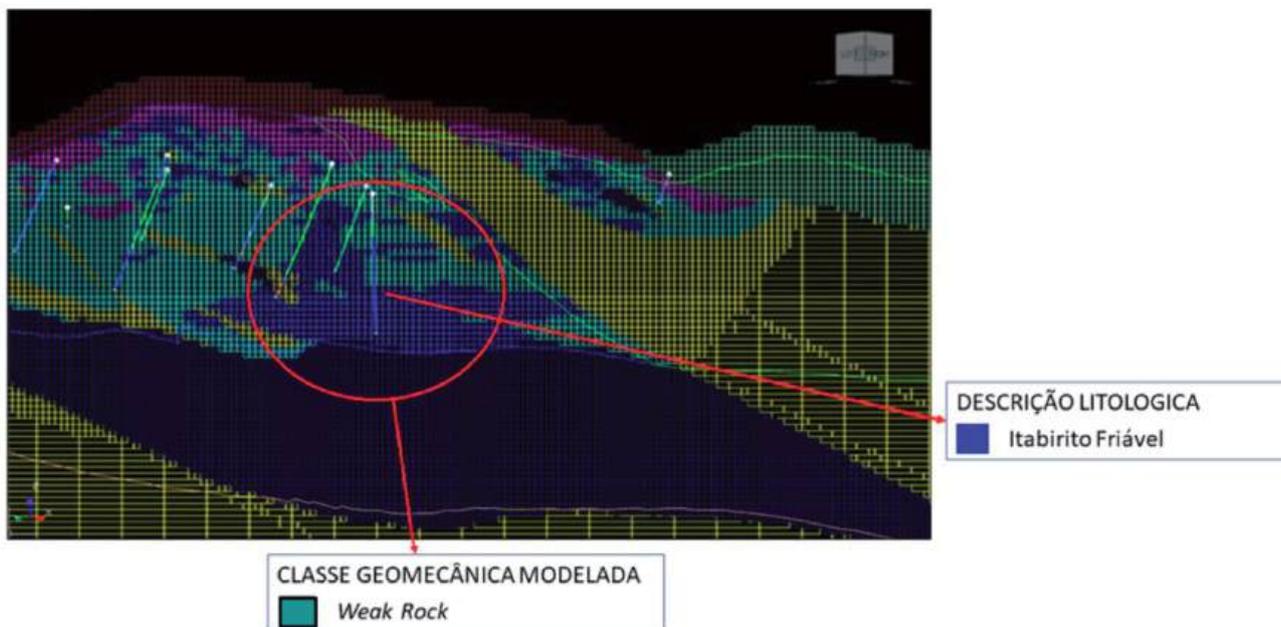


Figura 7 - Inconsistências encontradas entre o Modelo Geomecânico elaborado e descrição litológica no furo de sondagem.

#### 4. CONCLUSÕES

A validação dos parâmetros de descrições geomecânicas correlacionáveis de grau de resistência da litologia (friável, média e compacta) e granulometria apresentaram uma correlação positiva valor de  $R^2 = 0,98$ , indicando que as litologias descritas como friáveis apresentam valores passantes na peneira 200 mm < 30%. Apesar da boa correlação dos dados, apenas em 572 intervalos (34,0%) foi possível essa validação devido à ausência de informação de ensaio de peneiramento.

A correlação entre os parâmetros de classificação de grau de fraturamento e RQD apresentou uma boa correlação entre os dados com valores de  $R^2 = 0,87$ , maciço com valores de baixo RQD = 40% estão restritos a grau de fraturamento F4 e F5. Os valores que não apresentaram correlação

podem estar relacionados a ausência de informações das variáveis grau de fraturamento ou RQD.

Apesar de que a ausência de alguns parâmetros de descrição das sondagens não influenciam na qualidade dos dados de entrada e posterior classificação geomecânica do maciço, impossível não mencionar que no mercado de investigações brasileiro voltado para projetos geotécnicos há uma carência notável em padronização e controle de qualidade, não utilizando metodologias de sucesso na exploração mineral como o QAQC (*quality assurance and quality control*), sendo imprescindível a definição e aplicação de protocolos e procedimentos, boas práticas, controle nas atividades de campo e na aquisição de dados geológicos.

O modelo geomecânico elaborado é satisfatório, sendo mais representativo e preciso nas cotas próximas à superfície e em regiões que concentram ao menos um furo de sondagem a cada 80

m para o modelo como um todo (18 km<sup>2</sup>), sendo concentrado na região de interesse mineral.

Para a elaboração de projetos geotécnicos em áreas minerárias a utilização de modelos geomecânicos com o *input* de dados e calibrações das variáveis presentes nos intervalos de descrição aqui utilizados atende satisfatoriamente, prevendo mecanicamente o comportamento do maciço de interesse. Durante a execução de projetos referenciados por modelos assim propostos, é indispensável a realização de mapeamentos geológicos-geotécnicos e a obtenção de parâmetros geomecânicos, bem como o entendimento do comportamento estrutural das litologias em superfície, para refinar o modelo utilizado e executado na atividade proposta, de forma segura e eficiente.

Até a data de elaboração deste artigo, não pudemos encontrar nenhum tipo de norma ou protocolo que padronize a obtenção de dados geomecânicos de sondagens e espaçamento de investigação em projetos de cavas a céu aberto. Sugerimos a utilização para o espaçamento mínimo de investigação diretas os preconizados em (DNIT6b) com no mínimo uma sondagem a cada 120 m de corte. Para os critérios de descrição de trechos geomecânicos, recomenda-se a utilização dos critérios metodológicos aqui utilizados.

## REFERÊNCIAS

OLIVEIRA, A. M. S. *et al.* Geologia de engenharia e ambiental. São Paulo. ABGE, v. 2, p. 479, 2018.

AQUINO, I. B. M.; ROLO, R. M.; ZINGANO, A. C.; LIMA, H. M. Classificação geomecânica prévia do maciço rochoso do entorno de escavações subterrâneas usando modelos de blocos estimados por krigagem dos indicadores. Estudo de caso: mineração fazenda brasileiro-Bahia/Brasil. *Holos*, 4, 1-23, 2021

BIENIAWSKI, Z.T. 1973. Engineering classification of *rock masses*. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, 15:335-44. Bieniawski, Z. T. 1993. Classification of *rock masses* for engineering: the RMR system and future trends. In:

BRAGA NETO, J. A.. Classificação geomecânica de taludes de mineração a céu aberto. 2020. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. 174 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA. COORDENAÇÃO GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA. INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos / instruções de serviço. - 3. ed. - Rio de Janeiro, 2006

GUIDICINI, G. *et al.* Um método de classificação geotécnica preliminar de maciços rochosos. *Semana Paulista de Geologia Aplicada*, v. 4, p. 285-331, 1972.

HAMMAH, R. E.; CURRAN, J. H. Geostatistics in geotechnical engineering: Fad or empowering?. In: *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. p. 1-5.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1997. Caracterização geomecânica do maciço rochoso do Trecho Faria Lima - Vila Sônia, Linha 4 - Amarela do Metrô de SP. Relatório no 34902.

ISRM. *Rock characterization, testing and monitoring*. ISRM suggested methods, p. 211, 1981.

KRIGE, D. G. A practical analysis of the effects of spatial structure and of data available and accessed, on conditional biases in ordinary kriging. In: *Geostatistics Wollongong '96*. Proceedings of the 5th International Geostatistical Congress, Wollongong, NSW, Australia. 1996. p. 799-810.

LIU, F. *et al.* Geostatistics-block-based characterization of heterogeneous *rock mass* and its application on ultimate pit limit optimization: a case study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 80, n. 2, p. 1683-1700, 2021.

MARTIN, D.; STACEY, P. (Ed.). *Guidelines for open pit slope design in weakrocks*. CSIRO PUBLISHING, 2018.

VATCHER, J.; MCKINNON, S. D.; SJÖBERG, J. Developing 3-D mine-scale geomecanical models in complex geological environments, as applied to the Kiirunavaara Mine. *Engineering geology*, v. 203, p. 140-150, 2016

# REVISÃO SOBRE AS APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO BRASIL

REVIEW ON THE GEOTECHNICAL APPLICATIONS OF WATER TREATMENT PLANT SLUDGE IN BRAZIL

MAITÊ MILLÉO ALMEIDA

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, Brasil, maitemilleo12@gmail.com*

CARLOS EMMANUEL RIBEIRO LAUTENSCHLÄGER

*Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, Brasil, cerlautenschlager@uepg.br*

BIANCA PENTEADO DE ALMEIDA TONUS

*Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, Brasil, bpatonus@uepg.br*

## RESUMO ABSTRACT

O lodo de estações de tratamento de água é um resíduo composto de água e sólidos suspensos cujas características são variáveis dependendo da origem da água bruta e do método de tratamento aplicado na ETA. Mesmo sendo considerado um resíduo sólido, seu descarte inadequado tem sido uma prática muito comum e por isso entende-se como necessário ampliar as pesquisas para compreender as diversas alternativas de destinação e aplicação do lodo de ETA dentro do panorama brasileiro. Compreendeu-se como objetivo desse trabalho a exposição das aplicações geotécnicas brasileiras do lodo de ETA mais recorrentes na última década. Para isso foi utilizada a plataforma Periódicos Capes como base de pesquisa onde utilizou-se os termos “lodo de ETA”, “resíduo” e “lama de ETA” para delimitar os artigos. Após selecionados os artigos que se enquadraram em aplicações geotécnicas do resíduo, foi realizada a leitura e análise dos trabalhos. Os estudos abordados envolvem o emprego do lodo de ETA em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, a utilização na fabricação de tijolos ecológicos de solo-cimento e lodo de ETA, a utilização do resíduo para a recuperação de áreas degradadas e o monitoramento

The water treatment plants sludge is a residue composed of water and suspended solids whose characteristics are variable depending on the origin of the raw water and the treatment method applied in the WTP. Even though it is considered a solid waste, its improper disposal has been a very common practice and therefore it is understood as necessary to expand research to understand the different alternatives for the destination and application of WTP sludge within the Brazilian scenario. This work aimed to exposure the most recurrent Brazilian geotechnical applications of WTP sludge in the last decade. For this, the “Periódicos Capes” platform was used as a research base, where the terms <WTP sludge,> <waste,> and <WTP mud> were used to narrow the articles. After selecting the articles that would fit into geotechnical applications of the waste, the reading and analysis of the works was carried out. The studies addressed involve the use of WTP sludge in waterproofing layers of sanitary landfills, the use in the manufacture of ecological WTP sludge-soil-cement bricks, the use of the waste for the recovery of degraded areas, and the monitoring of physical and environmental parameters of WTP

dos parâmetros físicos e ambientais da aplicação do lodo de ETA. Ao final, foram apresentadas as considerações finais sobre as aplicações geotécnicas do lodo de estações de tratamento de água.

**Palavras-chave:** lodo de estação de tratamento de água, resíduo, destinação de resíduos

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional acelerado de grandes centros urbanos, obteve-se um aumento na procura por meios que possam contribuir na busca por soluções de problemas ambientais que surgiram como resultado das ações humanas. Um exemplo dessas questões ambientais é o resíduo proveniente da lavagem dos decantadores e filtros nas estações de tratamento de água (ETAs) de ciclo convencional, também conhecido como lodo de ETA (LETA) (Silva, 2021), ou resíduo de ETA (RETA) (Araújo *et al.*, 2015).

O lodo de ETA é um resíduo composto de água e sólidos suspensos e possui características variáveis com relação à origem da água bruta e com os processos e produtos utilizados ao longo do tratamento da água (Roque; Montalvan; Boscov, 2021). Embora seja classificado segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo sólido, o descarte inadequado desse lodo em corpos de água tem sido uma prática muito comum no Brasil, expressando a necessidade de ser destinado adequadamente (Montalvan, 2016).

Verifica-se o crescimento da quantidade de pesquisas que objetivam a busca por soluções econômicas e benéficas no reaproveitamento do lodo, visto que os padrões ambientais atuais se apresentam mais rigorosos em relação aos anteriores quando se trata do descarte do resíduo (CONAMA, 2011) e a disposição final do lodo ainda é considerada onerosa para as ETAs (Campos *et al.*, 2023). Além desse fator, ocorre também o aumento do custo de transporte desses resíduos das ETAs até aterros sanitários e a falta de áreas adequadas para destinação em regiões urbanas (Prim, 2011; Gonçalves *et al.*, 2017).

Nessa perspectiva, diversas alternativas têm sido utilizadas para a realização do descarte final do lodo. Alguns exemplos que podem ser citados é o lançamento nas redes coletoras, em lagoas com

sludge application. At the end, the final considerations on the geotechnical applications of sludge from water treatment plants were presented.

**Keywords:** water treatment sludge (WTS), waste, waste disposal

alto tempo de detenção, a aplicação em aterro sanitário, adubação e aproveitamento de subprodutos do lodo. Porém, a gestão do lodo de ETA por tais métodos é, via de regra, uma atividade complexa com custos operacionais elevados (Rodrigues; Holanda, 2013).

Nesse contexto, compreende-se como pertinente entender as atuais destinações e aplicações do lodo de ETA dentro do panorama brasileiro para que seja possível assimilar mais possibilidades de utilizações do material com a expectativa de que ocorra o reuso do lodo. Portanto, para este trabalho, teve-se como objetivo a exposição das aplicações geotécnicas de lodo de ETA de maior recorrência na última década no Brasil.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foi determinado como período de busca os anos de 2013 a 2023 por abranger grande parte dos trabalhos desenvolvidos atualmente e por proporcionar o acesso às inovações da área.

As pesquisas foram efetuadas na plataforma Periódicos Capes. Esta interface agrega artigos de 117 bases de dados nacionais e internacionais dentro das áreas de Engenharia Sanitária e Engenharia Civil, as quais incluem coleções de periódicos, bibliotecas e repositórios digitais. Foram utilizados os termos “lodo de ETA”, “resíduo” e “lama de ETA” com o objetivo de ampliar o campo de pesquisa e obter uma maior quantidade de resultados.

Após essa definição, foi realizada a leitura e análise dos trabalhos para compreensão das aplicações mais recorrentes do lodo de ETA na perspectiva geotécnica dentro do panorama brasileiro tendo como objetivo assimilar as possibilidades de utilização desse material.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da pesquisa executada com as palavras-chaves determinadas, foram gerados 81 artigos dentro do período temporal de 10 anos

(2013-2023). Os artigos foram filtrados de forma com que fossem selecionados aqueles dentro da temática de geotecnia e podem ser observados no Quadro 1.

**Quadro 1.** Levantamento dos artigos encontrados

Autor	Título
Cabral (2013)	Avaliação da incorporação do lodo de ETA UFV na manufatura de tijolos de solo-cimento
Pereira; Oliveira (2013)	Confecção de tijolos ecológicos como alternativa para reutilização dos resíduos produzidos por centrais dosadoras de concreto
Rodrigues; Holanda (2013)	Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento
Coelho (2016)	Avaliação da capacidade reativa de uma lama de ETA para remoção de metais pesados de escorrências rodoviárias
Montalvan (2016)	Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da Estação de Tratamento de Água Cubatão.
Gonçalves <i>et al.</i> (2017)	Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário
Lucena <i>et al.</i> (2017)	Monitoramento de parâmetros físicos e ambientais de camadas de solo estabilizadas com lodo de ETA e de ETE
Marchiori <i>et al.</i> (2021)	Avaliação do potencial de utilização de resíduo de ETA como impermeabilizante de obras de terra para a contenção de resíduos
Scapin (2021)	Avaliação da utilização de solo e lodo de estação de tratamento de água como material de cobertura e de fundo em células experimentais de resíduos sólidos urbanos
Morselli <i>et al.</i> (2022)	Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo
Santos; Pinto; Cavalcanti (2022)	Aplicações da lama de ETA visando à mitigação de impactos ambientais: uma revisão integrativa
Villanova; Machado (2022)	Lodo de Estação de Tratamento de Água: destinação e reciclagem
Campos <i>et al.</i> (2023)	Inovação tecnológica sustentável na construção civil: tijolo de solo-cimento com reaproveitamento de lodo de estação de tratamento de água
Knierim; Delongui; Barbosa Pinheiro (2023)	Estudo do comportamento mecânico e hídrico do uso do lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico
Mazzutti; Klamt; Faro (2023)	Study of the hydro-mechanical behavior of a stabilized soil with water treatment plant sludge for application in sanitary landfills

O primeiro exemplo de aplicação geotécnica do lodo de ETA elencado é no emprego de camadas impermeabilizantes de aterros sanitários. O lodo é classificado como resíduo sólido classe II, não perigoso e não inerte, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), porém seu descarte mais comum não ocorre de acordo com as diretrizes da norma técnica, sendo esse em corpos hídricos.

O descarte incorreto do lodo de ETA é considerado prejudicial para o ambiente onde ele é descartado, principalmente por causa do potencial de poluição do seu lixiviado. Nesse contexto, tem-se aumentado o número de pesquisas onde se busca a aplicação do lodo em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários (Gonçalves *et al.*, 2017).

Entretanto, de acordo com Marchiori *et al.* (2021), Morselli *et al.* (2022) e Knierim, Delongui e Pinheiro (2023), o lodo em si pode não apresentar os parâmetros necessários para funcionar sozinho como material impermeabilizante. Por esse motivo, a alternativa viável de utilização do resíduo seria a incorporação do lodo com solos já aplicados em camadas do aterro, como camadas de base e camadas de cobertura (Montalvan, 2016; Gonçalves *et al.*, 2017).

Dessa forma a mistura poderia atingir a condutividade hidráulica mínima requerida para barreiras, onde é determinada pela NBR 13896 (ABNT, 1997) como  $10^{-7}$ cm/s. Isso auxiliaria no preenchimento dos vazios presentes no solo natural, visto que a granulometria do lodo pode pos-

suas características de silte, ou seja, uma granulometria mais fina (Morselli *et al.*, 2022), além de impedir a percolação do chorume gerado dentro do aterro (Santos; Pinto; Cavalcanti, 2022).

Outros pontos positivos dessa aplicação incluem a substituição de uma parcela do material granular original pelo lodo — pois dessa forma ocorre a preservação do solo original e a destinação do lodo de ETA —, e a redução do peso total da estrutura por causa do baixo peso específico do material (Marchiori *et al.*, 2021).

Outra questão é a porcentagem de lodo que pode ser adicionada no solo natural sem que haja prejuízo nas características hidráulicas e mecânicas da mistura. Montalvan (2016) encontrou na proporção 3:1 de solo-lodo uma condutividade hidráulica aceitável para o uso da mistura como material de revestimento de fundo em aterros sanitários, mas as misturas 4:1 e 5:1 não apresentaram valores aceitáveis de utilização.

Knierim, Delongui e Pinheiro (2023) também estudaram as porcentagens de lodo e definiram que a mistura composta de 85% de solo e 15% de lodo de ETA apresentou melhor aplicação em camadas de base e de cobertura de aterros sanitários. Foram observados resultados que indicaram melhora da resistência ao cisalhamento do traço, o que permitiria a execução de aterros com uma maior altura assim como a construção de taludes mais íngremes e mais seguros.

Os autores também observaram que misturas 50% de solo e 50% de lodo não foram possíveis de serem utilizadas em ambas as camadas citadas, porém para camadas diárias (intermediárias) a utilização das misturas seria considerada uma alternativa ambientalmente benéfica.

Além dos autores já citados, Mazzutti, Klamt e Faro (2023) realizaram análises com misturas solo-lodo de ETA de Frederico Westphalen - RS, onde observaram que a mistura com 30% de adição de lodo pode ser definida como a melhor para aplicação em camadas de aterros sanitários. Os autores atingiram resultados de coeficiente de permeabilidade mínimos para aplicação em aterros, além de valores de resistência à compressão simples satisfatórios.

Scapin (2021) analisou as misturas solo-lodo de ETA em porcentagens distintas sob a ótica de parâmetros químicos, biológicos e físicos.

A autora executou as análises a partir de células experimentais de resíduos sólidos urbanos, as quais eram representativas de células de aterros sanitários.

Após análise da massa de resíduo no interior das células e do chorume produzido, a autora concluiu que o lodo gerado não auxiliou no aumento dos parâmetros considerados nocivos para o meio ambiente. Portanto, poderia ser considerada a utilização do lodo em camadas de aterros sanitários a partir das porcentagens estudadas pela autora.

O próximo exemplo de aplicação de lodo de ETA é a utilização do resíduo na confecção de tijolos solo-cimento. Esse tipo de tijolo ecológico pode ser utilizado quando se tem o objetivo de uma obra de baixo custo e considera-se que os materiais utilizados para sua produção não provocam prejuízo ambiental por causa de seu processo de cura ocorrer por evaporação (Pereira; Oliveira, 2013).

A principal influência da adição de lodo na confecção de tijolos solo-cimento é a diminuição da resistência mecânica dos corpos cimentícios e isso ocorre devido ao lodo interferir na hidratação do cimento (Rodrigues; Holanda, 2013).

De acordo com Rodrigues e Holanda (2013), as especificações para tijolos solo-cimento foram alcançadas com a adição de 1,25% em peso de lodo de ETA substituindo parcialmente o solo, mas essa porcentagem pode variar dependendo das características do lodo a ser utilizado.

Cabral (2013) obteve resultados positivos para adição do lodo em até 6% antes de que ocorresse a diminuição da resistência. Observa-se que ambas as porcentagens ainda podem ser consideradas baixas e, por causa disso, o lodo pode apresentar dificuldades em ser incorporado em grandes quantidades com o solo-cimento (Rodrigues; Holanda, 2013).

Em relação às outras propriedades tecnológicas (absorção de água, massa específica e resistência à compressão), a adição do lodo provocou alterações significativas visto que o resíduo tende a aumentar o teor de partículas finas, matéria orgânica e plasticidade da mistura solo-cimento, o qual interfere na hidratação do cimento.

Apesar das diferenças de características, a adição de lodo ainda é considerada uma alternativa viável para a reaproveitamento do material

visto que, se mantido o traço correto durante a fabricação, a resistência desejada ainda pode ser atingida (Campos *et al.*, 2023).

De acordo com Campos *et al.* (2023), o reaproveitamento do lodo para a fabricação de tijolos solo-cimento acaba diminuindo os custos para a ETA, diminui o impacto ambiental gerado pelo lodo e pode gerar lucros mesmo que os tijolos acabem tendo um elevado consumo de cimento para sua fabricação, quando comparado com as outras opções existentes no mercado.

Outro exemplo de pesquisa é a aplicação de lodo de ETA em solos de áreas degradadas. Santos, Pinto e Cavalcanti (2022) observaram que o lodo possui grande potencial de ser utilizado na recuperação de áreas degradadas, graças à sua composição.

Coelho (2016) concluiu que o lodo pode apresentar potencial de adsorção e por isso considerase relevante avaliar a capacidade de remoção de metais pesados, como níquel, chumbo e zinco, de fluídos como efluentes e água bruta.

Entretanto, apesar de ser considerado uma alternativa viável, é necessário garantir um controle maior na aplicação do lodo para que não ocorra alterações elevadas das propriedades estruturais do solo ou do meio onde ele for aplicado (Villanova; Machado, 2022).

Para poder utilizar o lodo dessa forma é necessário realizar uma análise dos metais pesados constituintes do resíduo e verificar a presença de matéria orgânica e argilominerais, essenciais para a capacidade de troca catiônica (CTC) do material. Conhecer o CTC do solo e do resíduo é importante visto que o potencial de retenção dos metais pesados dependerá da quantidade de cargas negativas presentes no solo e no resíduo que for aplicado (Morselli *et al.*, 2022).

A partir da análise dos metais pesados e da matéria orgânica, Morselli *et al.* (2022) concluíram que o lodo de ETA Santa Bárbara, em Pelotas/RS, poderia ser empregado na remediação de áreas contaminadas ou degradadas por causa do potencial de adsorção de metais pesados e nutrientes, de forma que evitasse a contaminação de corpos hídricos e lençóis freáticos.

Além das pesquisas já levantadas, também foram encontrados artigos sobre o monitoramento de parâmetros físicos e ambientais da aplicação

do lodo de ETA. Lucena *et al.* (2017) analisaram amostras de solo-lodo-estabilizante em camadas de pavimento durante o período de um ano.

Os autores levaram em consideração certos parâmetros, incluindo umidade, recalque das amostras, pH e concentração de metais, e observaram nos resultados que a decisão de incorporar estabilizante pode ser uma solução viável para a utilização do lodo em pavimentação.

Por fim, considerando a quantidade de artigos selecionados a partir da metodologia definida, foram levantados trabalhos publicados em congressos ou simpósios nacionais de geotecnia ou em repositórios de universidades públicas que não estão presentes na plataforma Periódicos Capes. Essa alternativa teve como objetivo analisar os trabalhos mais recentes envolvendo a utilização geotécnica de lodo de ETA.

Nesse contexto, destaca-se os resultados encontrados por Almeida *et al.* (2023) e Fiedler (2023). Os autores caracterizaram e incorporaram lodo de ETA em amostras de solo laterítico com o objetivo de entender o comportamento da mistura a partir de ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade e ensaio de adensamento unidirecional.

A partir dos resultados, Fiedler (2023) concluiu que, sob o ponto de vista da consolidação, a aplicação do lodo de ETA em camadas de aterros sanitários pode ser considerado viável, visto que as amostras solo-lodo apresentaram coeficiente de compressão muito inferior ao do lodo puro.

#### 4. CONCLUSÕES

Em relação à utilização de lodo de ETA em camadas impermeabilizantes, o tema agregou 53,33% dos autores citados no presente trabalho. Essa porcentagem demonstra o aumento do número de pesquisas voltadas para aplicações em aterros sanitários e o potencial de aprofundamento do tema.

Os autores citados observaram que o lodo sozinho não poderia ser empregado, mas ele em conjunto com um material granular poderia ser uma forma de utilização ambientalmente benéfica, visto que o lodo contribui em características geotécnicas da mistura.

Porém, verificou-se um consenso entre os autores destacados nessa revisão da literatura em relação à necessidade de estudos mais aprofundados para entender o impacto a longo prazo do uso do lodo de ETA em aterros sanitários.

A respeito do emprego do lodo de estações de tratamento de água na remediação de solos contaminados, observou-se a necessidade de expandir as pesquisas brasileiras com o uso desse resíduo. Reconhece-se que o lodo pode possuir potencial de adsorção de metais tóxicos presentes em resíduos urbanos depositados nos aterros, mas entende-se como necessário estudos mais aprofundados para compreender a composição os metais já presentes no lodo e a possibilidade de a utilização do resíduo alterar as composições do solo onde for aplicado.

Para a aplicação do lodo de ETA na confecção de tijolos ecológicos de solo-cimento, foi concluído que, apesar da baixa porcentagem de lodo possível de ser utilizada no traço do tijolo, o uso do resíduo foi considerado de custo benefício positivo para as estações de tratamento de água e para o comprador ou fabricante do material visto seu impacto ambiental positivo.

O último tema levantado, sobre o monitoramento dos parâmetros físicos e ambientais da aplicação do lodo de ETA, destacou a necessidade de atentar-se à possibilidade de contaminação de solos por causa da origem do lodo. Aprofundar o conhecimento em alternativas de destinação do lodo precisa caminhar paralelamente com a preocupação ambiental em relação a este resíduo.

Nesse contexto, observa-se que o emprego do lodo de ETA em atividades geotécnicas é uma utilização plausível para destinação do material, desde que seja levado em consideração o risco de contaminação ao ambiente que uma aplicação sem a devida análise pode ocasionar.

Por esse motivo, é necessário atentar-se à necessidade de estabelecer padrões de aplicação do lodo de estação de tratamento de água e aprofundar os estudos em relação às utilizações do resíduo, como visto em trabalhos publicados em eventos técnicos nacionais e repositórios de universidade.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES e à Universidade Estadual de Ponta Grossa.

## REFERÊNCIAS

Almeida, M. M.; Fiedler, D. T.; Beraldo, R. J.; Lautenschläger, C. E. R.; Paz, E. C. 2023. Caracterização geotécnica do lodo da estação de tratamento de água Iraí com aplicação de ensaios de laboratório e ensaio MEV. *In: XIII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Ponta Grossa, PR. Anais.* p. 520.

Araújo, F. C. Scalize, P. S.; Albuquerque, A.; Angelim, R. R. 2015. Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. *Cerâmica*, v. 61, n. 360, p. 450-456.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação, Rio de Janeiro, 2004. 71p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação, Rio de Janeiro, 1997. 12p.

Cabral, V. A. L. 2013. Avaliação da incorporação do lodo de ETA UFV na manufatura de tijolos de solo-cimento. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

Campos, T. V. O.; Santos, E. S.; Ozi, E. J.; Marques, A. 2023. Inovação tecnológica sustentável na construção civil: tijolo de solo-cimento com reaproveitamento de lodo de estação de tratamento de água. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, [s. l.], p. 10.

Coelho, G. M. R. 2016. Avaliação da capacidade reativa de uma lama de ETA para remoção de metais pesados de escorrências rodoviárias. Dissertação (Mestrado) - Universidade da Beira Interior, Covilhã.

- Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011. Brasília, DF: CONAMA, 2011.
- Fiedler, D. T. 2023. Análise da incorporação do lodo de uma estação de tratamento de água (ETA) em solo para utilização em camadas impermeabilizantes de aterro sanitário. 87 f. Dissertação - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.
- Gonçalves, F. Souza, C. H. U.; Tahira, F. S.; Fernandes, F.; Teixeira, R. S. 2017. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. *Revista DAE*, v. 65, n. 205, p. 5-14.
- Knierim, L. S.; Delongui, L.; Barbora Pinheiro, R. J. 2023. Estudo do comportamento mecânico e hídrico do uso do lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico. *Revista DAE*, v. 71, n. 240, p. 51-64.
- Lucena, L. C. L. Silva, J. A. Marinho Filho, P. G. Portela, M. G. 2017. Monitoramento de parâmetros físicos e ambientais de camadas de solo estabilizadas com lodo de ETA e de ETEX. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 10, n. 3, p. 873.
- Marchiori, L.; Studart, A.; Morais, M.; Albuquerque, A.; Cavaleiro, V. 2021. Avaliação do potencial de utilização de resíduo de ETA como impermeabilizante de obras de terra para a contenção de resíduos. In: *Coleção Desafios das Engenharias: Engenharia Sanitária 2*. 2. ed. Ponta Grossa: Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua. p.: 205-212.
- Mazzuti, E.; Klamt, R.; Faro, V. 2023. Study of the hydro-mechanical behavior of a stabilized soil with water treatment plant sludge for application in sanitary landfills. *Soils and Rocks*, v. 46, n. 1.
- Montalvan, E. L. T. 2016. Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da Estação de Tratamento de Água Cubatão. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 134 p.
- Morselli, L. B. G. A.; Carmo, L. A. G.; Quadro, M. S.; Andreatza, R. 2022. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. *Scientia Plena*, v. 18, 5: 11.
- Pereira, V. C. 2013. Confecção de tijolos ecológicos como alternativa para reutilização dos resíduos produzidos por centrais dosadoras de concreto. *Anais do Congresso Nacional de Iniciação Científica. Anais... Em: 14 Congresso Nacional de Iniciação Científica - CONIC SEMESP*. Campinas: SEMESP.
- Prim, E. C. C. 2011. Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário. Tede de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 279 p.
- Rodrigues, L. P.; Holanda, J. N. F. 2013. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. *Cerâmica*, v. 59, 352: 551-556.
- Roque, A.; Montalvan, E. L. T.; Boscov, M. E. G. Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da estação de tratamento de água Taiaçupeba. *Geotecnia*, [s. l.], n. 151, p. 33-52, 2021.
- Santos, L. K. D. J.; Pinto, C. D. O.; Cavalcanti, L. A. P. 2022. Aplicações da lama de ETA visando à mitigação de impactos ambientais: uma revisão integrativa. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 9, n. 21, p. 469-482.
- Scapin, J. 2021. Avaliação da utilização de solo e lodo de estação de tratamento de água como material de cobertura e de fundo em células experimentais de resíduos sólidos urbanos. 2021. 197 f. Doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Silva, A. R. D. 2021. Comportamento geotécnico de misturas de areia argilosa laterítica e lodo da estação de tratamento de água Taiaçupeba, município de Suzano, São Paulo. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 190 p.
- Villanova, D. L.; Machado, V. F. 2022. Lodo de Estação de Tratamento de Água: destinação e reciclagem. *Revista Liberato*, v. 23, 40: 139-148.

---

# NOSSA HISTÓRIA

Apresentamos nesta seção de Artigos Históricos o texto “Por menos ensaios e instrumentações e por uma maior observação da natureza” de autoria do Geólogo Álvaro Rodrigues dos Santos, originalmente apresentado pelo autor no I Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1976, Rio de Janeiro. Anais... vol. 1, São Paulo: ABGE, p. 177-185. Consultado sobre a pertinência desta republicação, o autor sugeriu incluir duas observações como se segue:

*OBS 1: esse trabalho representou a sinalização de um ponto de virada para a Geologia de Engenharia brasileira em direção aos paradigmas conceituais de sua ciência mãe, a Geologia, e à adoção da abordagem fenomenológica como seu especial método de trabalho. Lembre-se que até essa época a GE brasileira observava excessiva influência do método de trabalho da Engenharia Geotécnica, o que lhe impedia de desempenhar plenamente sua própria personalidade e suas principais responsabilidades no contexto da Geotecnia. Manteve-se nessa nova publicação basicamente o mesmo texto, apenas observando alguns aperfeiçoamentos de linguagem e algumas atualizações gramaticais.*

*OBS 2: aconselha-se que a leitura desse trabalho seja feita à luz das lembranças trazidas pelo contexto geral da Geotecnia brasileira nos meados dos anos 1970.*

# POR MENOS ENSAIOS E INSTRUMENTAÇÕES E POR UMA MAIOR OBSERVAÇÃO DA NATUREZA

ÁLVARO RODRIGUES DOS SANTOS

*Geólogo, Consultor em Geologia de Engenharia e Geotecnia, santosalvaro@uol.com.br*

## RESUMO

O autor critica a tendência de nosso meio técnico em usar despropositadamente no campo da Geotecnia o resultado de observações indiretas obtidas através de uma crescente cadeia de ensaios e instrumentações tecnológicas. Outrossim, discute a validade da tentativa de matematização de certos parâmetros geológicos, propondo, como alternativa, a racional e intensiva observação fenomenológica da natureza, com destaque aos processos naturais atuais a que está submetida e às suas respostas às solicitações impostas por obras já instaladas, como a fonte principal e mais segura de dados para projeto.

## 1. INTRODUÇÃO

Provavelmente tendo como causa mais remota o gradativo afastamento do homem, e particularmente do homem técnico e urbano, dos fenômenos e processos da natureza, cuja observação direta um dia foi sua principal fonte de sabedoria e conhecimento, vêm-se incrementando despropositadamente no campo da geologia e da geotecnia as observações indiretas obtidas de uma gama infundável de ensaios e instrumentações tecnológicas a cada momento mais sofisticados e dispendiosos.

Acreditamos que já se faz necessário iniciar um balanço crítico dos frutos desta tendência, com atenção a um balanço entre ganhos e prejuízos para a engenharia geotécnica.

Queremos deixar claro que não descartamos a validade científica dos ensaios tecnológicos, mas sim somos de opinião que seu papel dentro

de uma análise geotécnica deva ser mais relativizado e ponderado. Esse papel, cremos seja bem mais secundário e suplementar do que aquele que normalmente lhes vem sendo exigido.

Colaborando com esse objetivo, esse trabalho pretende expor algumas ideias que temos a respeito do tema e que estamos levando à prática na seção de Estradas da Divisão de Minas e Geologia Aplicada IPT, relativas, particularmente, ao tratamento da questão da estabilidade de taludes.

## 2. OS ENSAIOS TECNOLÓGICOS - ALGUMAS RESTRIÇÕES

Para que se possam utilizar os métodos de análise de estabilidade disponíveis (Fellenius, Bishop, Coulomb, Taylor, etc. e seus tratamentos mais atuais como Hoek e Londe, Patton, etc.), há que se admitir tantas limitações e restrições (hipóteses básicas) que, e isso de alguma maneira o reconhecem os vários autores, nos forçam a sair do campo real para trabalharmos e raciocinarmos no campo das suposições. De fato, desconhecemos na natureza um maciço tão isotrópico e permeável aos métodos prospectivos disponíveis que permita um tratamento teórico e simplista.

E imagine-se a gravidade do problema quando vemos que mesmo no caso de maciços com apreciável isotropia, como uma barragem de terra onde os parâmetros de resistência podem ser aproximadamente conseguidos através de métodos construtivos e seleção de materiais de empréstimo, surgem dúvidas quanto à interpretação do significado dos fatores de segurança obtidos

através dos diversos métodos de cálculo adotados. Neste sentido, transcrevemos a conclusão do interessante trabalho do Eng. Serge J.C. Hsu "Alguns aspectos do cálculo de estabilidade de taludes em barragens de terra", apresentado no V Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos (1974): *"Pensamos que ao projetista reserva-se o direito de aceitar ou rejeitar o resultado de qualquer ensaio ou cálculo de estabilidade que, pelo seu julgamento, esteja em desacordo com a sua experiência e bom senso"*.

Em terrenos naturais o problema é bem mais amplo, pois a natureza, com sua "incômoda" anisotropia, descarta a cada dez metros as possibilidades de emprego de cálculos generalizantes ingênuos. São mudanças mineralógicas e litológicas, são inversões em sistemas estruturais, diferentes estágios de alteração em um mesmo horizonte, características peculiares dos mais variados tipos de descontinuidades (rugosidades, preenchimentos, imbricamentos, etc.), comportamentos anômalos (e a anomalia aqui é antes uma regra que uma exceção) do sistema hidrogeológico, fendas de tração e uma dezena mais de outras variáveis que não admitem uma ponderação quantitativa particular tal que possamos, com segurança, considerá-las matematicamente no fornecimento de dados (entrada de dados) para equações e artifícios disponíveis para a determinação das forças atuantes e resistentes.

Não constituem novidade as constantes chamadas de atenção de diversos autores sobre os cuidados necessários no recolhimento de amostras para garantir sua pretendida representatividade. Mas, a prática de nosso dia a dia vem evidenciando uma certa ingenuidade nestas recomendações. E mais do que um eventual descaso para com a importância dos cuidados recomendados, cremos que a causa mais provável provém mesmo da extrema dificuldade em se definir o que seja ou não representativo de um determinado maciço em estudo. Como amostrar os arenitos Pirambóia e Botucatu com suas intensas heterogeneidades típicas de sedimentação fluvial e eólica respectivamente? Como amostrar um horizonte de alteração (Serra do Mar ou Basaltos do Sul Brasileiro) onde convivem em um mesmo espaço solos já em adiantado estado de alteração, núcleos resistentes à alteração, descontinuidades herdadas da rocha mãe, zonas mais e menos alteradas, fraturadas, etc.?

Como amostrar siltitos, argilitos, diamictitos das formações do grupo Itararé, quando muitas vezes não se torna possível sequer moldar os corpos de prova? E um corpo coluvionar? E um tálus?

E ainda, como definir um tipo de ensaio ideal que infira corretamente as condições hidrogeológicas (zonas de saturação, pressões de percolação, etc.) quando na maior parte das vezes a drenagem interna de um maciço natural se mostra com extrema irregularidade e erraticidade? E a prova está nos inúmeros "lençóis suspensos" que observamos em taludes viários já abertos.

A verdade é que a realidade de nossas estradas, onde as "quedas de barreira" já justificam plantões noticiosos, está a nos indicar que algo não vai bem. E notemos que isto acontece em nossas melhores estradas, onde, creio, não houve falta de ensaios tecnológicos nos estudos de projeto e em eventuais dimensionamentos de medidas de contenção.

Vejam alguns outros exemplos práticos onde a compulsão por se matematizar certos parâmetros da natureza pode nos conduzir a resultados incertos. Diversos autores (Patton, Hoek, Ruiz, etc.) chamam a atenção para a necessidade em se levar em consideração a influência das rugosidades e irregularidades de uma descontinuidade rochosa no cálculo da resistência ao cisalhamento. Inclusive sugere-se a adoção de um ângulo de atrito efetivo, pela adição ao ângulo de atrito que seria próprio da descontinuidade sem rugosidades, do ângulo médio entre as ondulações e a direção potencial de deslizamento. Agora, mesmo deixando de lado questões tais como a correção desta compensação quando a direção do deslizamento não é ortogonal às direções gerais das irregularidades, a consideração do espaçamento entre estas irregularidades, sua forma e gênese, situações de imbricamento, etc., torna-se procedente uma pergunta aos geólogos e demais técnicos familiarizados com o assunto: no decorrer de nossa atividade técnica quantas vezes nos deparamos com situações tais que nos permitam uma confiável ponderação sobre estes tipos de estruturas? E notem que estamos, no momento, pensando num corte já aberto e em um projeto de consolidação. E em cortes por abrir?

Em nossa opinião a utilização das técnicas de medida adotadas por Fecker e Ranjers, ou das ca-

tegorias de rugosidade propostas por Piteau, deve se restringir a casos bastante singulares, pois do contrário corremos o risco de introduzir erros bastante graves em nossos cálculos de estabilidade.

Ainda como ilustração, transcrevemos uma oportuna observação de Terzaghi: *“A ruptura da Barragem de Malpasset e diversos escorregamentos catastróficos de rochas em taludes situados acima dos portais de túneis de pressão, fizeram surgir o interesse das autoridades públicas ligadas à construção acerca do problema. Consequentemente, tornaram-se cada vez mais relutantes em liberar construções apoiadas em rocha a não ser que os interessados demonstrassem por meio de cálculos de estabilidade que a estrutura proposta não ocasionaria uma ruptura na rocha. Entretanto, com relação às fundações, tanto em rochas como em solo, condições reais podem impedir a possibilidade de obtenção de todos os dados necessários à previsão do comportamento do material a ser usado como fundação por métodos analíticos ou outro qualquer. Se for necessário fazer um cálculo de estabilidade nessas condições, este terá inevitavelmente que se basear em hipóteses bastante afastadas da realidade. Tais cálculos podem trazer mais danos que benefícios porque desviam a atenção do projetista de inevitáveis, porém importantes, lacunas no seu conhecimento, dos fatores que determinam a estabilidade de taludes em rochas sãs”*.

Outro exemplo da dificuldade e dos riscos em se pretender matematizar certos parâmetros geológicos refere-se ao mapeamento estrutural através de projeções estereográficas ou expedientes similares. Apesar dos maciços apresentarem normalmente direções estruturais preferenciais, algumas zonas se destacam por exibirem sistemas próprios autônomos cujas causas são complexas e variadas (processos de diferenciação magmática, zonas de descompressão, esforços localizados derivados de diferentes intensidades de resfriamento da rocha fundida, feições mineralógicas particulares, etc.). Deste modo, cada levantamento estrutural só é válido quando for corretamente restringido a uma zona individualizada de uma superfície rochosa que está sendo investigada. Uma vez que isto não seja obedecido, ou seja, quando junta-se no mesmo levantamento situações estruturais que não convivem o mesmo espaço no maciço, o que normalmente vem acontecendo, introduzimos enormes erros ao sugerirmos a possibilidade inexistente de combinações

de diferentes sistemas estruturais, ou ainda, ao sugerirmos a combinação de descontinuidades com amplitudes não similares.

### 3. FATOR DE SEGURANÇA OU TÁBUA DE SALVAÇÃO

Se publicamente é muito difícil para boa parte de nossos especialistas em estabilidade de taludes admitir sua insegurança diante dos resultados dos ensaios e das instrumentações por ele encomendados, intimamente por certo eles reconhecem essa fragilidade dos dados de entrada de seus cálculos de estabilidade. Como forma de compensar essa fragilidade o estrategema mais utilizado tem sido o adestrado manejo do fator de segurança (relação entre as forças resistentes e as forças atuantes). Isto normalmente se faz, a bem da segurança mais do projetista que do projeto em si, superestimando-se os valores dos parâmetros referentes aos agentes desestabilizadores atuantes e subestimando-se aqueles referentes ao conjunto dos fatores resistentes. Obtém-se assim a desejada maquiagem nos valores dos fatores de segurança, os quais servirão, então, como base para o projeto de estabilização. No entanto, e essa é uma opinião puramente pessoal baseada em experiência profissional e na intuição dela proveniente, acreditamos que em boa parte dos projetos os verdadeiros fatores de segurança obtidos após a execução dos tratamentos então recomendados são bem maiores que os teoricamente pretendidos (normalmente em torno de 1,5), não nos surpreendendo se um dia algum método de análise mais preciso pudesse situá-los em 7, 8 ou mais unidades.

Jambu, em seu trabalho *Slope Stability Computations*, chama a atenção: *“O valor calculado para o fator de segurança reflete consequentemente as incorreções tanto das medidas de resistência como da análise dos esforços. Atualmente as incertezas associadas às medidas de resistência são propensas a introduzir maiores erros do que a computação da tensão de cisalhamento”*.

Como consequência direta das questões colocadas, advém um grande problema adicional, o enorme e progressivo encarecimento das obras de contenção.

Ilustrando esta tendência, reproduzimos em seguida algumas exigências que Hoek estabelece em seu interessantíssimo trabalho “Estimando a Estabilidade de Taludes Escavados em Minas a Céu Aberto” (tradução APGA) onde apresenta uma série de ábacos para a estimativa da estabilidade de taludes:

- “- adoção da resistência residual em lugar da de pico;*
- estimativa conservadora para o ângulo de rugosidade;*
- adoção da pior condição hidrológica;*
- existência no talude de um nível d'água horizontal sempre que haja suspeitas de condições excepcionais de fluxo descendente ou dúvidas sobre a drenagem;*
- na dificuldade de se desenvolver um estudo tri-dimensional para a análise da junção de dois sistemas de fratura, adotar para definição do fator de segurança um plano de ruptura único mergulhando com o mesmo ângulo da linha de intersecção das duas superfícies.”*

#### 4. AINDA SOBRE AS CAUSAS

Na introdução deste trabalho mencionamos como causa mais remota da supervalorização dos resultados de ensaios e instrumentações tecnológicas, o gradativo afastamento do homem das coisas da natureza. Outras causas há, e que nos dizem respeito mais diretamente. Sobre elas é um tanto difícil e delicado escrever, porém, penso que ao se pretender uma análise mais séria do problema, não se pode evitá-lo.

##### 4.1 O monopólio dos conhecimentos ou a mística da complicação

A geologia e a geotecnia não poderiam ser exceção no quadro geral da cultura tecnológica brasileira, onde, senão os conhecimentos, mas pelo menos o poder decisório, está concentrado em pouquíssimas pessoas, formando clubes bem avessos à entrada de novos sócios. Esta situação, é claro, tem causas históricas e sociológicas bem definidas, a análise das quais, no entanto, se bem que apaixonantes, não cabe no escopo deste trabalho. O fato é que, provavelmente, em nosso campo, não

chegaríamos a necessitar de todos os nossos dedos se quiséssemos enumerar as pessoas que devido ao seu nome e ascendência conseguem dar crédito a um projeto e com isso tranquilizar seus clientes.

Sustentando este quadro existe disseminada em nosso meio a mística da complicação, ou seja, somos levados a duvidar, pelas coisas que vemos ou nos são ditas, que algum dia possamos vir a manipular, com a destreza necessária, todos os parâmetros, regras, todas as ponderações, etc., no trato de determinadas questões técnicas.

Sem dúvida esse contexto inibe o desenvolvimento de técnicas e métodos de análise mais simples e práticas, que possam ser utilizados, sem constrangimentos, por um maior número de técnicos.

#### 4.2 Interesses econômicos

No entorno de qualquer atividade humana é natural que se estabeleça toda uma estrutura comercial surgida da necessidade em se suprir esta atividade de insumos materiais, assistência técnica e serviços especializados.

No campo de geotecnia não poderia ser diferente. Surgiu assim a produção industrial de aparelhagem para ensaios e instrumentações e os laboratórios especializados para sua execução, que cumpriram e cumprem um papel bastante importante no próprio desenvolvimento técnico do setor.

Porém hoje, talvez já se faça necessário um questionamento crítico dessa situação, pois do contrário podemos incorrer em alguns riscos, comuns em vários outros tipos de atividade, e que resultam da inversão de papéis entre a atividade técnica e a atividade comercial a ela correspondente. Ou seja, uma situação onde a atividade comercial assume o papel determinante neste relacionamento, esforçando-se para induzir o desenvolvimento técnico e a prática técnica que melhor atendam as demandas de seu desenvolvimento econômico.

#### 5. PROPOSIÇÃO DE UMA ALTERNATIVA: MODELOS FENOMENOLÓGICOS

Como subsídio à discussão das questões até aqui levantadas, desenvolvemos a seguir, resumi-

damente, algumas ideias que vêm sendo adotadas pelo Grupo de Estradas da DMGA/IPT no que diz respeito às análises de estabilidade de taludes.

A ideia básica é chegar-se à compreensão de um determinado fenômeno de instabilização não pela análise particular de qualquer tipo de ruptura ou de cada parâmetro particular envolvido, mas sim pelo entendimento deste fenômeno como um todo, ou seja, como resultado da interação de um quadro geológico definido pelo conjunto de todos os parâmetros geológicos e geotécnicos intrínsecos ao maciço em questão com o tipo de solicitação a que esteja sendo ou tenha sido submetido (características geométricas do corte, posição na encosta natural, eventuais vibrações provocadas, condições climáticas, etc.).

Dentro deste contexto, o fim desejado seria a definição de modelos fenomenológicos padrões que traduzissem, para um determinado contexto geológico, o provável comportamento das diferentes formações geológicas diante de solicitações que lhe sejam impostas pela obra.

### 5.1 Instrumento de análise

Na definição dos modelos fenomenológicos ressalta como instrumento básico de análise, a nosso ver não excludente, mas hierarquicamente superior a uma campanha intensiva de ensaios e instrumentações tecnológicas, uma rigorosa e detalhada observação, em regiões vizinhas ou em áreas com características geológicas e geomorfológicas naturais semelhantes, do comportamento no tempo e no espaço das respostas de caráter geológico-geotécnico decorrentes de condições impostas por solicitações de obras já executadas (no caso, cortes).

Ou seja, de um lado há que se compreender o estágio e o processo atual da evolução geomorfoló-

gica regional, de modo que o projeto a eles se adeque e não a eles seja agressivo como normalmente vem ocorrendo (vide Serra do Mar), e de outro, aproveitar as obras aí já instaladas como verdadeiros ensaios "in situ" e em verdadeira grandeza.

Neste sentido cremos que se apresenta como uma ferramenta auxiliar altamente promissora a alternativa da determinação dos parâmetros de resistência de um determinado maciço pela análise regressiva ("retro análise") de rupturas encontradas no campo. Reproduzimos em seguida um comentário de Hoek sobre a questão: *"a análise regressiva de rupturas, apesar das dificuldades práticas envolvidas, representa um dos mais promissores campos na pesquisa da estabilidade de taludes. Sugere-se que posteriores avanços em nosso conhecimento da estabilidade de taludes de rocha dependerão, numa considerável extensão, de nossa habilidade em explorar essa valiosa fonte de dados"*.

O próximo passo a ser dado após os estudos e análises acima sugeridos seria a definição de modelos fenomenológicos que relacionariam o tipo do terreno em causa (abrangendo todas suas características físicas naturais geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas, geotécnicas...) com o tipo de solicitação imposta, sugerindo qual o tipo de fenômeno mais provável e possível de ocorrer (colapso estrutural, ruptura plana, ruptura profunda, etc.).

O estudo deverá ser completado com a indicação, para cada caso, dos meios mais adequados para se contornar preventiva e corretivamente os problemas. Estes meios não deverão ser rígidos e únicos, mas poderão variar de local para local segundo fatores tais como: disponibilidade maior ou menor de materiais naturais de construção, importância estratégica da obra, riscos admissíveis, etc.

Em seguida segue um exemplo resumido do que entendemos por um modelo fenomenológico:

Características geológicas	Tipo de solicitação	Fenômeno comum	Tratamento mais adequado
Argilitos e siltitos sedimentares rijos laminados típicos dos Grupos Passa Dois e Itararé na Bacia Sedimentar do Paraná	Exposição em taludes de corte	Desagregação superficial (empastilhamento) derivada de ciclagem natural seco/úmido. Efeitos: obstrução de sistemas de drenagem e rupturas por descalçamento progressivo de horizontes superiores	Proteção superficial contra variações intempéricas: cobertura vegetal quando a inclinação do talude permitir ou tela argamassada em taludes mais íngremes

Cabe acrescentar que para que estes modelos fenomenológicos possuam a desejada propriedade extrapolativa, isto é, para que se possa enquadrar determinado local ou caso dentro de um determinado modelo fenomenológico, há que se definir perfeitamente sua área ou condição de validade.

Uma primeira tentativa de estabelecimento destes modelos para formações sedimentares da Bacia do Paraná está sendo apresentada neste mesmo congresso em alguns trabalhos de técnicos da Seção de Estradas da Divisão de Minas e Geologia Aplicada do IPT.

A sistemática aqui rápida e resumidamente apresentada tem como grande vantagem adicional despertar no técnico, através do senso crítico exigido por uma forçada e constante observação fenomenológica, o bom senso e a intuição, atributos que reputamos fundamentais uma vez adquiridos no contexto de um espírito científico.

De forma alguma essa sistemática pretende prescindir do uso de ensaios e instrumentações nas análises de estabilidade de taludes, mas apenas dar um peso relativo menos absoluto para esse uso, entendendo-os, ensaios e instrumentações, como valiosos recursos complementares da análise fenomenológica.

## 5.2 O método dos modelos fenomenológicos firmando-se como uma tendência

Deere e Patton descrevem três métodos disponíveis para um projeto de taludes em solos residuais, mas cujos princípios se aplicam aos mais diferentes materiais. O primeiro método utilizar-se-ia basicamente de experiências precedentes, o segundo tanto delas como de estudos auxiliares adaptativos e o terceiro em cálculos de estabilidade.

O primeiro método, o “precedente”, aplicar-se-ia onde as condições meteorológicas e geológicas são similares aquelas do lugar onde o projeto foi feito com sucesso. Este método prevê, portanto, para determinadas condições, a repetição pura e simples de um projeto já realizado. Aplicar-se-ia fundamentalmente para casos de horizontes geológicos homogêneos.

O segundo método, o “precedente modificado”, prevê alterações no projeto inicial a serem promovidas por estudos adicionais sobre o perfil de alteração, estruturas residuais, o regime de águas subterrâneas, coluviões e demais dados sobre a estrutura do maciço e seus parâmetros de resistência. Aplicar-se-ia melhor em casos de estruturas geológicas mais complexas onde “a complexa distribuição (tipos de rocha e tipos de estrutura) pode ser não repetitiva de uma parte do corte para outra, de modo que uma exploração detalhada numa área do corte pode não ser válida para outra seção do mesmo corte”.

O terceiro método “cálculos de estabilidade” envolve grandes desprendimentos de tempo e dinheiro e sua aplicação só deverá ser feita quando isto pode ser justificável. Apesar disto os autores relembram seu valor histórico, pois que há alguns anos atrás era o único método disponível.

Apesar de algumas de suas idéias possuírem um desenvolvimento diferente do nosso, citamos a proposição de Deere e Patton no sentido de mostrar que este tipo de preocupação revela a existência de uma linha comum de raciocínio que quiçá possa se refletir em uma tendência mais consistente dentro de nosso meio técnico.

## 6. A INSTRUMENTAÇÃO TECNOLÓGICA

Também no campo da instrumentação de cortes e aterros para o controle de comportamentos geotécnicos, observa-se hoje uma tendência em se adotar aparelhagem cada vez mais cara e sofisticada, fatores que na maioria das vezes não estão sendo justificados frente aos resultados obtidos. Sobre este assunto Costa Nunes, em seu relato para o Tema 3 do V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, salienta: “No momento está se atravessando uma fase de proliferação de instrumentos e métodos objetivando muito mais medir o que se pode e o que se sabe do que se precisa para progredir”.

Por fim, chamamos a atenção de nossos colegas para a quantidade de sistemas de observação que dispomos, simples e baratos, e que estão sendo relegados a um segundo plano. Selos de argamassa ou lâminas de vidro, referências topográficas, evidências no terreno, trincas, árvores,

embarrigamentos do terreno, espécies vegetais predominantes, medidores simples de NA, acompanhamento fotográfico, informações e testemunhos de pessoal ligado à obra ou à região (mestres ou moradores), estágio de trabalho de pequenos cursos d'água perenes ou transitórios, cravação de tubos simples de gesso em diferentes profundidades, etc.

Há que se considerar ainda um fator importantíssimo, qual seja a inibição à pesquisa e ao desenvolvimento próprio de novos sistemas de observação provocada pelo fluxo acrítico de uma tecnologia externa alheia às nossas realidades.

## 7. INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS, A IMPORTÂNCIA DE UM ACERVO DE DADOS

Como já deixamos claro anteriormente, não somos avessos aos ensaios geotécnicos. Apenas cremos que a atual manipulação dos seus resultados está transformando-os de peças auxiliares em elementos dominantes na análise dos processos geotécnicos. E com isso não concordamos.

Um outro aspecto da mesma questão, e que reputamos extremamente grave, refere-se à dispersão dos resultados obtidos através de milhares de investigações, sondagens e ensaios já executados em nosso país nas suas mais diferentes condições geológicas. Em que pesem algumas iniciativas inglórias, não podemos falar hoje em um acervo tecnológico nacional publicamente disponibilizado, pois os dados que o constituiriam estão dispersos nas mais variadas empresas que um dia os produziram, quando não totalmente perdidos.

Houvesse organizado este acervo (e acreditamos que isso ainda possa ser realizado através de órgãos como o IPT) e poderíamos dizer, sem medo de errar, que para uso viário não precisaríamos mais executar ensaios tecnológicos triviais a não ser em raras situações muito especiais.

## REFERÊNCIAS

COSTA NUNES, A.J. (1974) Estabilidade de taludes Rocha e Solo, Relato V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, São Paulo, V.III. Anais.

CRUZ, P. (1973) Estabilidade de taludes, DLP/ USP.

DEERE, D.V. e PATTON, F.D. (1970) Slope stability in Residual Soils, Panamerican Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, San Juan, VI Anais.

FECKER, E. e RANGERS, N. (1971) Measurement of large scale roughnesses of rock planes by means of profilograph and geological compass, Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Nancy, Anais.

GUIDICINI, G. e NIEBLE, C.M. (1975) Estabilidade de taludes naturais. Instituto de Pesquisas Tecnológicas Divisão de Minas e Geologia Aplicada - Grupo de Documentação.

HOEK, E. (1972) - Estimando a estabilidade de taludes escavados em minas a céu aberto São Paulo, tradução no 4 APGA.

HOEK, E. e LONDE, P. (1974) Travaux de Surface en Rocher Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas, Denver VI Anais.

HSU, S.J.C. (1974) Estabilidade de taludes V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, São Paulo, VI Anais.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Divisão de Minas e Geologia Aplicada (1974-75) Relatórios emitidos pela Seção de Estradas.

JAMBU, N. (1973) Slope Stability Computations - Embankment Engineering, Casagrande Volume.

RUIZ, M.D. (1974) Estudo e Projeto de Estabilização de taludes em rocha (curso de Pós-Graduação; EPUSP).

SANTOS, A.R. dos (1974) A geologia nos projetos de estabilização de taludes, V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. São Paulo VI Anais.

TERZAGHI, K. (1962) Stability of steep slopes on hard unweathered rock - Revista Geotechnique, V.XII, n. 4.