

Luis Ricardo Fernandes da Costa
(Organizador)

GEOCIÊNCIAS:

Desenvolvimento científico,
tecnológico e
econômico

2



Luis Ricardo Fernandes da Costa
(Organizador)

GEOCIÊNCIAS:

Desenvolvimento científico,
tecnológico e
econômico

2



Atena
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Geociências: desenvolvimento científico, tecnológico e econômico 2

Diagramação: Camila Alves de Cremona
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Luis Ricardo Fernandes da Costa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G342 Geociências: desenvolvimento científico, tecnológico e econômico 2 / Organizador Luis Ricardo Fernandes da Costa. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0743-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.430220411>

1. Geociências. I. Costa, Luis Ricardo Fernandes da (Organizador). II. Título.

CDD 550

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br



DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

É com muito prazer que apresentamos a obra “Geociências: Desenvolvimento científico, tecnológico e econômico 2”, que apresenta uma série de doze artigos com diferentes propostas de análise espacial, com ênfase em estudos aplicados ou de cunho metodológico.

A obra é composta por trabalhos voltados para as geociências e que abordam diferentes perspectivas, desde análises voltadas para a dinâmica das geociências, passando pela importância dos estudos de impacto ambiental em áreas urbanas, além de estudos em bacias de sedimentação, mineração e impactos de inundações em diferentes ambientes.

Como destaque, cabe ressaltar a aplicabilidade em diferentes contextos e realidades no país. Diante dos desafios e atual conjuntura da ciência brasileira, a presente obra é uma possibilidade e esforço de divulgação de trabalhos com diferentes abordagens e perspectivas de análise nas esferas das geociências.

Convidamos a todos os leitores a percorrer pelo sumário e conferir o novo volume para essa coleção, com possibilidades de expansão e disseminação nos próximos trabalhos da área.

Luis Ricardo Fernandes da Costa

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

A PERSPECTIVE FOR GEOSCIENCE EDUCATION TO IMPROVE THE FUTURE OF HUMANITY

Guilherme O. Estrella

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4302204111>

CAPÍTULO 2..... 12

ALTERAÇÕES GEOMÓRFICAS COSTEIRAS ENTRE ANCHIETA E GUARAPARI, NO ESPÍRITO SANTO, APÓS IMPLANTAÇÃO DO E UBUOS DA COSTA DE ANCHIETA A ABRANGE TRECHO QUE VAI DE ANCHIETA AT SITIVOS DESTESTERMINAL PORTUÁRIO DE UBÚ DA SAMARCO MINERAÇÃO

Roberto José Hezer Moreira Vervloet

Pablo Merlo Prata

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4302204112>

CAPÍTULO 3..... 40

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA FÍSICO-GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS DA FORMAÇÃO CABO PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE ENGENHARIA

Eduardo Jorge Nunes Cavalcanti

Anderson José da Silva

Cecília Maria Mota Silva Lins

Samuel França Amorim

Eduardo Antonio Maia Lins

Túlio Pedrosa de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4302204113>

CAPÍTULO 4..... 52

CARACTERIZAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA DO RIO MOXOTÓ, COMO INDICADOR DE AUMENTO NA EMISSÃO DE CO₂ NUM AMBIENTE DE SEMIÁRIDO

Sávio Barbosa dos Santos

Ailton Feitosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4302204114>

CAPÍTULO 5..... 67

CONJUNTURA DOS DEPÓSITOS SEDIMENTARES DO GRUPO BALSAS NA PROVÍNCIA PARNAÍBA

Cláudio José da Silva de Sousa

Laura Martins Mendes

Paula Fernanda Massetti de Lima

Maria Eduarda da Silva Martins

Karina Suzana Feitosa Pinheiro

Daniel de Lima Nascimento Sório

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4302204115>

CAPÍTULO 6..... 77

CURSO DE EXTENSÃO NA ÁREA DE MINERAÇÃO: O CASO DA COMUNIDADE QUILOMBOLA SUMIDOURO (QUEIMADA NOVA-PI)

Messias José Ramos Neto
Naedja Vasconcelos Pontes
Flávia Bastos Freitas
Wladmir José Gomes Florêncio
Francielson Da Silva Barbosa
Ijan de Carvalho Silva
James Elemieverson Carvalho Oliveira
Alexandre Souza Rodrigues
Vinicius Igor Albuquerque Batista de Araújo
João Paulo Araújo Pitombeira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4302204116>

CAPÍTULO 7..... 87

ESTUDO DE LIQUEFAÇÃO EM PILHAS DE REJEITO: ELABORAÇÃO DE UM MODELO FÍSICO REDUZIDO PARA ILUSTRAÇÃO DO FENÔMENO

Luísa de Andrade Araújo
Rafael Mendonça Carvalhais
Renata Pereira Gomes
Rodrigo Augusto Rodrigues Alves
Sofia Martins Torres

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4302204117>

CAPÍTULO 8..... 99

USO DAS FERRAMENTAS DO QGIS NA COMPILAÇÃO E VISUALIZAÇÃO ESPACIAL DE DADOS DO MERCADO IMOBILIÁRIO

Bruno Pereira Correia
Daniella Rodrigues Tavares

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4302204118>

CAPÍTULO 9..... 111

EXPLOSÃO E FRAGMENTAÇÃO DA ROCHA DURANTE IMPACTO EM EVENTO DE QUEDA DE BLOCOS – O CASO BANQUETE / RJ

Paulo Pinheiro Castanheira Neto
Armando Prestes de Menezes Filho
Rogério Luiz Feijó

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4302204119>

CAPÍTULO 10..... 122

INFLUÊNCIA DE ONDAS SÍSMICAS GERADAS POR DESMONTES DE ROCHA EM BARRAGEM DE MINERAÇÃO

Sebastião Longino. Silva
Márcio Fernandes Leão

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.43022041110>

CAPÍTULO 11	131
UM BREVE HISTÓRICO DE EPISÓDIOS DE INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS NA ÁREA CENTRAL DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO E AS POLÍTICAS PÚBLICAS DE DRENAGEM URBANA	
Fernanda Figueiredo Braga	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.43022041111	
SOBRE O ORGANIZADOR.....	144
ÍNDICE REMISSIVO.....	145

ESTUDO DE LIQUEFAÇÃO EM PILHAS DE REJEITO: ELABORAÇÃO DE UM MODELO FÍSICO REDUZIDO PARA ILUSTRAÇÃO DO FENÔMENO

Data de aceite: 01/11/2022

Luísa de Andrade Araújo

PUC Minas; Belo Horizonte –MG, Brasil

Rafael Mendonça Carvalhais

PUC Minas; Belo Horizonte –MG, Brasil

Renata Pereira Gomes

PUC Minas; Belo Horizonte –MG, Brasil

Rodrigo Augusto Rodrigues Alves

PUC Minas; Belo Horizonte –MG, Brasil

Sofia Martins Torres

PUC Minas; Belo Horizonte –MG, Brasil

RESUMO: A liquefação foi a causa de dois rompimentos de barragens no Brasil no início do século XXI. As pilhas de rejeito vêm sendo implementadas como alternativa a barragens, mas também são susceptíveis a este fenômeno. A liquefação estática por fluxo sub horizontal foi analisada em um modelo reduzido de pilha e calculado seu gradiente hidráulico crítico. Foram elaborados modelos de areia, com e sem tapete drenante para verificação das linhas de fluxo, e modelos semelhantes de rejeito para induzir a liquefação. A partir da identificação das redes de fluxo nos modelos, comparou-as ao resultado obtido pelo software SEEP/W 2012 da GeoStudio. Através da análise computacional encontrou-se o gradiente hidráulico crítico de saída de 0,92, que provocou a liquefação do rejeito no pé da pilha. Ao final de toda a análise foi possível entender a importância de um sistema de drenagem para a

estabilidade da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito, estabilidade de maciços e liquefação.

ABSTRACT: Liquefaction was the cause of two dam breaks in Brazil at the beginning of the 21st century. Tailings cells have been implemented as an alternative to dams, but are also susceptible to this phenomenon. Static liquefaction by sub horizontal flow was analyzed in a reduced cell model and calculated its critical hydraulic gradient. Sand models were elaborated, with and without blanket drain to check the flow lines, and similar models of tailings to induce liquefaction. From the identification of flow networks in the models, compared them to the result obtained by GeoStudio's SEEP/W 2012 software. Through computational analysis, the critical hydraulic output gradient of 0.92 was found, which caused the liquefaction of the tailings at the foot of the cell. At the end of all the analysis it was possible to understand the importance of a drainage system for the stability of the structure.

KEY-WORDS: Tailings, soil stability and liquefaction.

1 | INTRODUÇÃO:

Em 2015 e 2018, o Brasil sofreu dois rompimentos, da barragem de Fundão, em Mariana e da Mina do Feijão, em Brumadinho. Estes desastres causaram um dano ambiental e humano irreparável e o primeiro é considerado o maior desastre em barragem do mundo (O GLOBO, 2019). A mineração representa quase 5% de todo o PIB nacional e em 2017 foi

responsável por 13% de toda a exportação do país (IBRAM, 2018). Essa atividade também contribui para o desenvolvimento da cidade onde é aplicada. Em Itabira-MG, a mineração corresponde a 305 da receita da cidade e a 70% da economia local (BBC, 2019). Entretanto ela gera um resíduo que não possui valor econômico, composto por minérios pobres, areia e água, o rejeito (G1, 2019). Este material normalmente é armazenado em barragens de terra.

Segundo a Agência Nacional de águas – ANA, em seu relatório de 2017, ocorrem cerca de três acidentes em barragem por ano no Brasil. Das quase 700 barragens em Minas Gerais, 22 não possuem estabilidade garantida (FEAM, 2018).

O empilhamento a seco surgiu como alternativa às barragens. Apresenta custo superior, mas maiores benefícios ambientais e de segurança, sendo uma opção vantajosa. Nesse método, o rejeito é filtrado e compactado, e a água é reutilizada no beneficiamento. (Instituto Minere, 2019). Elas também são susceptíveis a liquefação.

A liquefação é um fenômeno em que ocorre a mudança de fase do rejeito, que passa a se comportar como um líquido ao invés de polpa, devido ao aumento da poropressão e redução das tensões (NETO, 2009). Ela é a causa de rompimento de barragens mais crítico e recorrente, representando quase 50% das ocorrências (CASTRO, 2008).

A liquefação pode ocorrer devido a carregamentos estáticos ou dinâmicos. O primeiro ocorre devido à sobrecarga, ao aumento repentino da superfície freática, a infiltração por chuvas, entre outros. Já o carregamento dinâmico é causado por um carregamento cíclico, originado por eventos sísmicos, detonações ou tráfego de veículos (CASTILHO, 2017).

Um maciço de terra em contato com água possui uma rede de fluxo, que é a representação gráfica da trajetória do líquido pela estrutura, composto pelas linhas de fluxo e equipotenciais. Através da rede de fluxo é possível determinar a vazão, a pressão causada pela água na base da barragem e verificar o potencial de liquefação do solo em regiões de fluxo ascendente (TAYLOR, 1948, apud SANTOS, 2014).

O objetivo desse artigo é analisar o potencial de liquefação estática por fluxo sub-horizontal de uma pilha de rejeito, comparar a rede de fluxo do modelo físico com métodos de cálculo computadorizados e calcular o gradiente hidráulico que provoca a liquefação da pilha.

2 | METODOLOGIA

2.1 Materiais

Para a realização do modelo reduzido foi utilizado um recipiente de 120x20x50cm³, com paredes de vidro e metal, e entradas de água, conforme Figura 1. O rejeito utilizado foi coletado em Agosto/2019 no reservatório da barragem B2 Auxiliar, no Complexo de Fernandinho, Figura 2. Foi necessário também areia grossa, grades metálicas envolvidas

em tela mosquiteiro, cano PVC, mangueira, solução de fenolftaleína e hidróxido de sódio, bolsas de soro com os respectivos tubos e agulhas, compactadores de madeira, cabos de vassoura e conchas para pegar o material.



Figura 1. Recipiente do modelo reduzido, composição dos autores.



Figura 2. Localização das barragens B2 e B2 Auxiliar, Google Earth Pro.

2.2 Chuva intensa

Uma chuva intensa será simulada através da junção do cano PVC à mangueira. O cano de PVC foi furado em duas linhas de frente, com furos distanciados em 6cm e alternados. Após demarcados dos furos, foram utilizados prego e martelo pra afundar os locais para, na sequência, utilizar uma furadeira, Figura 3.



Figura 3. Realização dos furos no cano de PVC, composição dos autores.

2.3 Teste de Permeabilidade

Foram comprados cerca de 50 kg de areia para o experimento. Era necessário saber se ela serviria para os propósitos do trabalho, então foi realizado um teste de permeabilidade.

O teste consistiu em preencher o recipiente com a areia, formando uma fundação rasa e uma barragem. A barragem foi contida pelas grades metálicas envolvidas em telas mosquiteiro e os cabos de vassoura travaram a estrutura.

O recipiente foi preenchido a montante com água e utilizada a solução de fenolftaleína e hidróxido de sódio. Assim, foi possível visualizar as linhas de fluxo, comprovando que a areia serviria para o objetivo do trabalho, Figura 4.



Figura 4. Visualização das linhas de fluxo, composição dos autores.

2.4 Testes de Percolação

Foram construídos dois modelos de pilha de areia, sem fundação, em camadas de 6cm, compactadas com um pouco de água e 25 golpes distribuídos ao longo da pilha, pelos compactadores de madeira. O talude possuía inclinação 1V:1H e foi contido pela grade envolvida em tela mosquiteiro e cabos de madeira para travá-lo, impossibilitando a ruptura precoce. O primeiro foi construído apenas com areia, enquanto no segundo foi colocado uma grade envolvida em tela mosquiteiro, apoiada sobre toquinhos de madeira, na base da pilha, para simular um tapete drenante (Figura 5). Esses modelos foram feitos para a visualização das linhas de fluxo nos dois casos, com e sem tapete drenante.



Figura 5. Montagem do modelo reduzido concluído, composição dos autores.

2.5 Testes de Rompimento por Liquefação

Para indução de rompimento foi utilizado o rejeito coletado. Foram construídos dois modelos, com e sem tapete drenante, com as mesmas proporções utilizadas nos modelos de areia. Para estes modelos, o recipiente foi preenchido de água e o rejeito foi depositado posteriormente, de forma a ficar 100% saturado, Figura 6. Após a sedimentação do material, drenou-se toda a água do recipiente para então simular a chuva intensa e induzir o rompimento.



Figura 6. Montagem do modelo reduzido de rejeito concluído, composição dos autores.

3 | RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Testes de Percolação

Após a construção do primeiro modelo de areia, sem tapete drenante, foi simulada a chuva intensa ao ligar a mangueira conectada ao cano de PVC furado. Foram posicionadas 3 bolsas de soro contendo a solução de fenolftaleína com hidróxido de sódio acima do modelo e as agulhas foram colocadas na pilha. Dessa forma foi possível a visualização das linhas de fluxo, Figura 7. Foi possível perceber que a água caminhava para o pé e face inferior do talude da pilha.



Figura 7. Linhas de fluxo sem sistema de drenagem, composição dos autores.

O segundo modelo foi construído com o tapete drenante. O procedimento realizado foi o mesmo do modelo anterior. Neste caso foi possível perceber que as linhas de fluxo se conduziam para o tapete drenante, como esperado, Figura 8.



Figura 8. Linhas de fluxo com tapete drenante de fundo, composição dos autores.

Apenas a critério de comparação, os dois modelos foram conduzidos a ruptura. Foram retirados os cabos de vassoura e a grade de contenção, e ligada a mangueira. O modelo sem tapete drenante se rompeu em cerca de 5 minutos, por meio de cunhas regressivas, Figura 9.



Figura 9. Ruptura do modelo de areia sem tapete drenante, composição dos autores.

Já o modelo com tapete drenante não se rompeu. Após 10 minutos de observação, sequer apresentou sinais de liquefação. O acompanhamento ocorreu por cerca de 30 minutos.

3.2 Testes de Rompimento por Liquefação

O primeiro modelo a ser testado foi o sem tapete drenante. Foi drenada toda a água do recipiente até a pilha ficar seca. Foram tirados os cabos de vassoura e a grade de contenção. Iniciou-se a chuva intensa. Em aproximadamente 10 minutos, a pilha começou a dar indícios de liquefação no pé e após 27 minutos se rompeu totalmente. A Figura 10 apresenta 3 etapas da ruptura.



Figura 10. Etapas da ruptura do modelo reduzido de rejeito, composição dos autores.

O rejeito perde resistência, instabilizando a pilha e iniciando o processo de liquefação no pé dela. Pôde-se perceber que a ruptura ocorreu de forma análoga à do modelo de areia, por meio de cunhas regressivas.

O mesmo procedimento foi realizado no modelo de rejeito com tapete drenante. Após a retirada dos materiais de contenção, iniciou-se a percolação por fluxo descendente. Durante 15 minutos de observação não foi detectado nenhum indício de liquefação ou outra forma de rompimento. Após 30 minutos de observação, nada aconteceu, assim como no modelo de areia com tapete drenante. A Figura 11 apresenta o modelo após a indução de ruptura.



Figura 11. Modelo de rejeito em perfeito funcionamento com tapete drenante na fundação, composição dos autores.

Tanto o modelo de areia quanto o modelo de rejeito com tapete drenante não se romperam, mostrando a importância da utilização de um sistema de drenagem para a estabilidade do maciço.

3.3 Análise Computacional

Foi utilizado o software SEEP/W 2012 da GeoStudio para a análise computacional de percolação, e assim, comparara o resultado do programa com o resultado obtido nos testes realizados. As dimensões utilizadas no software foram as mesmas utilizadas no experimento, com a diferença de que nos testes foi em centímetro e no programa em metros.

Todos os dados de entrada solicitados pelo programa foram estimados pelos autores. As condições padrão do software foram utilizadas, sendo a Potencial Seepage Face para uma área permeável, passível de infiltração - parte superior da pilha, que recebe a chuva intensa, e a Zero Pressure definida para a área de escoamento – pé da pilha e tapete drenante. Para a relação ky'/kx' solicitada pelo programa foi considerada 0,8, por apresentar maior semelhança como os modelos físicos. A constante de permeabilidade do material foi definida em 10^{-6} m/s, casa decimal comum em rejeitos (RIBEIRO, 2017). Os resultados obtidos pelo software a partir dos dados de entrada apresentados acima estão apresentados nas figuras 12 a 15 abaixo, assim como os respectivos modelos físicos para comparação.

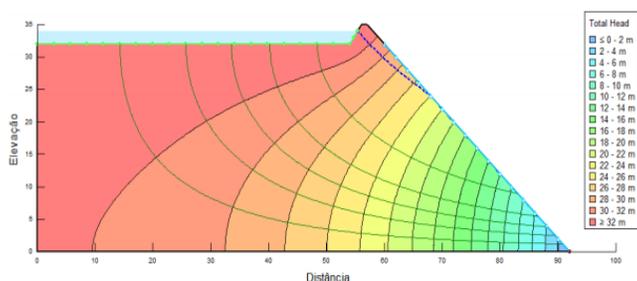


Figura 12. Análise de percolação no SEEP/W sem tapete drenante, composição dos autores.

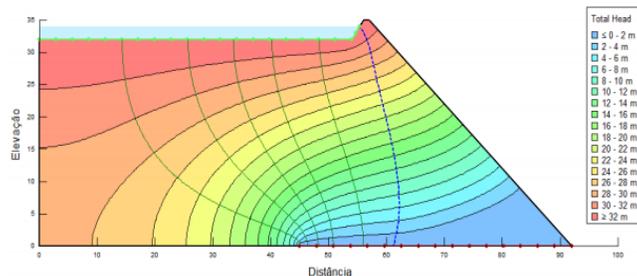


Figura 13. Análise de percolação no SEEP/W com tapete drenante, composição dos autores.



Figura 14. Modelo reduzido com linhas de fluxo sem tapete drenante, composição dos autores.



Figura 15. Modelo reduzido com linhas de fluxo com tapete drenante, composição dos autores.

A semelhança entre a rede de fluxo calculada pelo software e a visualizada nos modelos é percebida nas imagens acima. Assim, foi calculado o gradiente hidráulico crítico baseando-se nos dados de perda de carga informados pelo programa.

3.3.1 Cálculo do Gradiente Hidráulico Crítico:

Nos modelos reduzidos sem tapete drenante foi observado o início da liquefação no pé da pilha, causada pelo fluxo sub-horizontal na região de afloramento da freática na pilha. Neste ponto, as pressões de percolação se igualam às resistentes, tornando a pressão efetiva nula e apresenta o gradiente hidráulico crítico.

Considerou-se as últimas 3 linhas equipotenciais como a área liquefeita e assim foi calculado o gradiente hidráulico crítico ali, conforme apresentado abaixo. Os valores de h e L foram obtidos no software.

Em equações de várias linhas, a sua numeração deve ser feita na última linha. As fórmulas e o texto devem ser separados por uma linha. As equações devem ser feitas na mesma fonte do texto, com os índices subscritos, como o exemplo seguinte:

$$i = \frac{h}{L} = \frac{6}{92-85,5} = \frac{6}{6,5} = 0,92 \quad (1)$$

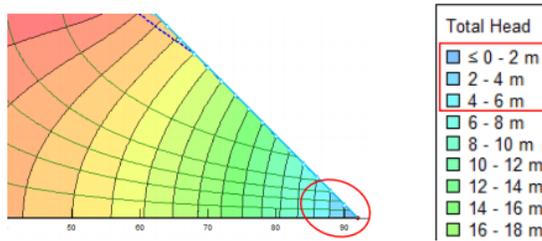


Figura 16. Representação do cálculo do gradiente hidráulico crítico $SEEP/W$, composição dos autores.

O gradiente hidráulico crítico obtido de 0,92 está em conformidade com valores conhecidos para a maioria dos solos, entorno de 1.

4 | COMENTÁRIOS FINAIS

O experimento realizado mostrou a semelhança entre os dados apresentados na análise computacional e o resultado dos modelos reduzidos. O valor obtido para o gradiente hidráulico de saída que causa a liquefação estática por fluxo sub-horizontal do rejeito está de acordo com o esperado, próximo de 1.

O experimento também evidenciou a importância da utilização de um sistema de drenagem efetivo e como ele influencia na estabilidade da estrutura, já que não houve ruptura quando o tapete drenante de fundo foi utilizado. Vale lembrar que o tapete drenante utilizado possuía passagem livre para a água, o que não ocorre na realidade. Portanto, deve-se implementar outros meios de drenagem complementar.

Nos modelos com tapete drenante foi observado que os gradientes hidráulicos elevados se apresentam no início do tapete drenante e não no pé da pilha, conforme apresentado pela análise computacional. Dessa forma não provocam a instabilidade do maciço.

A forma de ruptura, tanto do modelo de areia quanto o modelo de rejeito foram a mesma, se deu por meio de cunhas regressivas.

AGRADECIMENTOS

À Deus. Ao Me. Paulo Cesar Parra, que foi essencial para que este trabalho fosse executado. À DAM Projetos, que colocou à nossa disposição toda a infraestrutura da empresa para elaboração do modelo físico reduzido, objeto de estudo. À Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, pela recepção na Mina de Fernandinho na cidade de Itabirito - MG, e por nos possibilitarem coletar as amostras de rejeito para execução do trabalho. Por fim aos familiares e amigos pela torcida.

REFERÊNCIAS

Ação Civil Pública movida pelo Ministério Público Federal em face da FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/eventos/Seminarios/Zani1ACPBarragens.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2019.

O GLOBO. (2019) *Infográfico: os maiores acidentes com barragens do mundo*. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/brasil/infografico-os-maiores-acidentes-com-barragens-no-mundo-23404340>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

O TEMPO. (2015) *Minas já sofreu com outros rompimentos de barragens*. Disponível em: <<https://www.otempo.com.br/cidades/minas-j%C3%A1-sofreu-com-outros-rompimentos-de-barragens-1.1159501>>. Acesso em: 5 jun. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO- IBRAM.(2018) *Relatório anual de atividades, Julho de 2017 a Junho de 2018*. Disponível em : <http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2018/07/Diagrama%C3%A7%C3%A3o_Relat%C3%B3rioAnual_vers%C3%A3oweb.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2019.

INSTITUTO MINERE (2019) *Empilhamento de rejeito a seco: alternativa a disposição em barragens*. Disponível em : <<https://institutominere.com.br/blog/empilhamento-de-rejeito-a-seco-alternativa-a-disposicao-em-barragens>>. Acesso em: 23 mar. 2019

BBC NEWS BRASIL. (2019) *Mineração: cidade onde Valenasceu vive cercada por 33 vezes o volume de rejeitos de barragem que se rompeu em Brumadinho*. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-47220855>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

G1. (2019) *Entenda o que é minério de ferro, rejeito e barragem.*. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/01/30/entenda-o-que-e-minerio-de-ferro-rejeito-e-barragem.ghtml>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

Neto, J. P. F. (2009) *Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade. 2009. 154f*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Castro L. V. P. (2008) *Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeitos alteada a montante*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Castilho B. M. (2017) *Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da barragem do Germano*. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

Ribeiro, A. B. (2017) *Avaliação do regime de fluxo e da poropressão de uma barragem alteada para montante: comparação das observações de campo e da modelagem numérica*. Disponível em: <https://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/arturribeiro-02-10-2017-11-15-23am.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2019.

Santos, R. B. (2014) *Estudo de influência da rede de fluxo na análise de estabilidade de talude em Nova Friburgo – RJ*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aprendizagem 77, 79, 82, 83, 85

Avaliação de imóveis 99, 100, 110

B

Bacia hidrográfica 52, 55, 56, 57

Banco de dados 56, 57, 68, 99, 101, 102, 105, 107

Barragem 87, 88, 90, 98, 122, 123

C

Capacitação 77, 81, 83, 84

D

Desmonte 122, 123, 124, 125, 129, 130, 134

DNOCS 56

Drenagem urbana 131, 134, 139, 140, 141

E

Economic 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11

EMBRAPA 54, 56, 65, 66

Emissão de CO₂ 52, 56, 58, 59, 60, 61, 63, 64

Ensino 77, 78, 79, 85, 121

Equilíbrio estático 12, 35, 36

Estabilidade de maciços 87

Estabilização Físico-Granulométrica 41

Explosão das rochas 111

F

Fibras de polipropileno 40, 41, 42, 43, 44, 46, 50, 51

Formação cabo 40, 42, 43

Fragmentação de rochas 111

G

Geology 1, 7, 8, 9, 10, 38, 39

Grupo balsas 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76

H

Human 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 65, 86, 122

I

Inundações 2, 131, 132, 134, 135, 137, 138, 139, 140, 141

L

Liquefação 87, 88, 91, 93, 94, 96, 97, 98

M

Mecânica das rochas 111

Melhoramento mecânico 41, 50

Morfodinâmica 12, 13, 14, 24, 33, 37, 38

N

Nature 2, 5, 122

P

Percolação de água 111, 114

Pó de pedra 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50

Potencial hidrogeológico 67, 68, 69

Província Parnaíba 67, 68, 69, 71, 72, 76

Q

Queda de blocos 111, 117

R

Rejeito 87, 88, 91, 92, 94, 97, 98

S

Semiárido 52, 55, 56, 64, 66

Sismografia 122

Sistema de informação geográfica 67, 99, 100

Social behavior 4

T

Teresina 86, 99, 101, 102, 110

Terminal portuário 12, 14, 22, 27, 33, 34, 35, 39

Transporte sedimentar 12, 27

U

Uso do solo 53, 68

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

GEOCIÊNCIAS:

Desenvolvimento científico,
tecnológico e
econômico

2



www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

GEOCIÊNCIAS:

Desenvolvimento científico,
tecnológico e
econômico

2

