

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE MINAS E MATERIAIS



MICHAEL JOSÉ BATISTA DOS SANTOS
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE MINAS E MATERIAIS



MICHAEL JOSÉ BATISTA DOS SANTOS
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2021 Os autores

Copyright da edição © 2021 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-NãoDerivativos 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 Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

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 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
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

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Amanda Kelly da Costa Veiga
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Michael José Batista dos Santos

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia de minas e materiais / Organizador Michael José Batista dos Santos. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-641-3

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.413211211>

1. Engenharia de minas. 2. Engenharia de materiais. I. Santos, Michael José Batista dos (Organizador). II. Título.

CDD 622

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

A obra “Coleção desafios das engenharias: Engenharia de minas e materiais” versa sobre áreas interdisciplinares inerentes a extração e concentração mineral, além do aproveitamento dos recursos naturais alternativos, de biopolímeros, e avaliação de microestruturas em ligas metálicas.

A coleção reúne trabalhos, estudos de caso, pesquisas e análises desenvolvidas em laboratório, capazes de contribuir com o desenvolvimento científico e tecnológico na mineração, através de metodologias passíveis de implementação de melhorias de processos produtivos nas etapas de lavra e beneficiamento mineral. Da mesma forma, a obra traz compreensão da engenharia de materiais referente ao comportamento de materiais metálicos e o desenvolvimento de novos materiais provenientes de recursos renováveis e ambientalmente amigáveis.

Estes são trabalhos que tem como foco principal oferecer soluções de engenharia pertencentes da indústria mineral e de materiais, as quais são discutidos cientificamente de forma objetiva e eficiente nos capítulos desta coleção.

Em suma, parabênizo os autores dos capítulos não unicamente pelo conhecimento científico compartilhado, como também pela abordagem concisa e didática nesta publicação.

Ademais, desejo que esta seja uma leitura técnica e reflexiva, que sirvam de pilar e provocação pela busca de melhoria contínua de processos e do desenvolvimento científico-tecnológico nas engenharias, e que contribua na construção de novas soluções para os grandes desafios, sobretudo das área de mineração e de materiais.


Michael José Batista dos Santos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DA MAIOR PILHA DE ESTÉRIL DO COMPLEXO MINERADOR DE FERRO CARAJÁS


Michael José Batista dos Santos
Glauce Wivyanne Oliveira Costa
Denilson Andrade Torres
Irineu Antônio Schadach de Brum

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4132112111>

CAPÍTULO 2..... 14

AVALIAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS EM UM DEPÓSITO MINERAL DE CALCÁRIO CALCÍTICO


Nayara Augustino Amorim
Júlio César de Souza
Jorge Luiz Valença Mariz
Suelen Silva Rocha
Gabriel Filinkoski

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4132112112>

CAPÍTULO 3..... 27

DESIGN OF A SELECTIVE FLOTATION SYSTEM FOR A CU-ZN ORE, ASSOCIATED TO HIGH PYRITE-PYRRHOTITE CONTENTS (>25%)


Prieto-Díaz Ma. de J.
Hernández-Salazar Ma. M.
Corona-Arroyo M.A.
Elorza-Rodríguez E.

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4132112113>

CAPÍTULO 4..... 35

COMPARAÇÃO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DE LIGAS DE AL-SI FUNDIDAS SOB GRAVIDADE, ALTA E BAIXA PRESSÃO

Margarete Sabino de Moura
Josiel Bruno de Oliveira
Debora Silva Costa
Roger Hoel Bello
Adalberto Gomes de Miranda
José Costa de Macêdo Neto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4132112114>

CAPÍTULO 5..... 43

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA, QUÍMICA E MORFOLÓGICA DAS FIBRAS DE CIPÓ TITICA (*Heteropsisriedeliana Schott*) E POLIPROPILENO RECICLADO, VISANDO A APLICAÇÃO EM COMPOSITOS POLIMÉRICOS

Talisson Sousa Oliveira
Josiel Bruno de Oliveira

Roger Hoel Bello
Adalberto Gomes de Miranda
José Costa de Macêdo Neto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4132112115>

SOBRE O ORGANIZADOR	55
ÍNDICE REMISSIVO.....	56

AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DA MAIOR PILHA DE ESTÉRIL DO COMPLEXO MINERADOR DE FERRO CARAJÁS

Data de aceite: 01/11/2021

Data de submissão: 14/10/2021

Michael José Batista dos Santos

Universidade Federal do Oeste do Pará
(UFOPA), Campus Regional de Juruti
Juruti – Pará
<https://orcid.org/0000-0002-9958-9868>
<http://lattes.cnpq.br/5889866630676008>

Glauce Wivyanne Oliveira Costa

Vale
Parauapebas – Pará
<http://lattes.cnpq.br/3317427303694985>

Denilson Andrade Torres

Vale
Parauapebas – Pará
<http://lattes.cnpq.br/2085750042808441>

Irineu Antônio Schadach de Brum

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Escola de Engenharias,
Departamento de Metalurgia
Porto Alegre – Rio Grande do Sul
<https://orcid.org/0000-0003-4852-8325>
<http://lattes.cnpq.br/3390199353240612>

RESUMO: Carajás detém a maior mina de minério de ferro a céu aberto, gera uma quantidade considerável de estéril, que é responsável pela formação de enormes pilhas de estéril. A engenharia geotécnica busca o melhor custo benefício para manter a estabilidade física das estruturas geotécnicas, como barragens de

rejeitos, taludes e depósitos de minas (pilhas de estéril). Devido aos desastres socioambientais de barragens de rejeitos no Brasil, as construções geotécnicas estão no centro das atenções políticas. Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação de segurança, incluindo a classificação de um dos depósitos de mina mais antigos do complexo de mineração de Carajás – a pilha de disposição de estéril (PDE) Oeste – a estrutura artificial mais elevada (maior cota) do estado do estado do Pará. Essa investigação é adequada para comprovar a confiabilidade do investimento e a responsabilidade socioambiental dos empreendimentos de mineração. Por meio de métodos de avaliação, foi possível definir a classificação da pila de estéril Oeste de acordo com o nível de estabilidade. Os resultados da avaliação mostram um baixo potencial de ruptura ainda que sejam avaliadas suas seções críticas.

PALAVRAS-CHAVE: Pilha de disposição de estéril; avaliação de estabilidade, classificação de estabilidade.

SAFETY CLASSIFICATION AND ASSESSMENT OF THE LARGEST MINE WASTE DUMP IN THE CARAJAS IRON-MINING COMPLEX

ABSTRACT: Carajás holds the largest iron ore surface mine; it produces a considerable quantity of waste, which is responsible for build huge waste piles. Geotechnical engineering searches for the best cost-benefit to maintain the physical stability of geotechnical structures, such as tailings dams, mine slope and mine dumps (waste piles). Geotechnical constructions are at the centre of political attention because of socio-

environmental disasters of tailing dams in Brazil. This paper aims to accomplish a security assessment, including classification one of the oldest mine dump of the Carajás mining complex – the mine waste dump West – the tallest (elevation) man-made structures in Pará state. This investigation is suitable to prove the investment reliability and socio-environmental responsibility of mining ventures. Using evaluation methods, it was possible to define the classification of the mine dump West according to stability level. The evaluation results show a low failure potential.

KEYWORDS: Mine waste dump; stability assessment; stability classification.

1 | INTRODUÇÃO

Proceedings of the First Southern African Geotechnical Conference Mining Engineering Handbook (2011) argumenta que os termos pilhas e depósitos de estéril de mina significam pilhas de disposição de estéril, material rochoso que carregam pouco ou nenhum valor econômico no momento em que são transportados, uma vez que estéril não possui conceitos fixos, eles podem mudar de um para outro ao longo do Tempo. O planejamento, a localização adequada e o monitoramento de uma pilha de disposição de estéril (PDE) de uma mina têm o dever de minimizar os custos de lavra e evitar o risco de acidentes destas estruturas geotécnicas. Assim, muitos aspectos são levados em consideração neste estudo, como a taxa de remoção da mina, a estabilidade natural do terreno sob o despejo, sua localização deve ser estrategicamente definida a partir das distâncias de transporte de resíduos entre muitos outros aspectos. Os custos associados a este tipo de estrutura geralmente representam um parte significativa dos investimentos de uma mina (Couzens, 1985).

A disposição dos rejeitos da mina deve ocorrer na forma de camadas e monitoramentos frequentes, que avaliam a estabilidade da estrutura em relação à presença de água, lençol freático, infiltração e percolação, utilizando medidas de mitigação como, por exemplo, drenagem de bermas, de forma a minimizar a erosão, evitando o escorregamento do material. Outro ponto importante é a drenagem superficial, a qual, idealmente, tem que passar pelos canais periféricos para desviar o curso de água natural da chuva. A vegetação é uma forma de amenizar os efeitos pluviométricos, permitindo melhor proteção superficial. Dique de contenção são dispositivos que evitam o assoreamento na ponta a jusante de uma pilha de disposição de estéril (PDE), o que é ecologicamente correto, pois protege rios, lagos e outros cursos d'água. De acordo com o livro *Mining Engineering Handbook* (2011), existem outros parâmetros indispensáveis que influenciam a estabilidade de uma pilha de estéril, são eles: topografia do local, geometria do depósito, taxa de disposição e de adensamento do material depositado, propriedades geotécnicas intrínsecas ao material disposto, método de construção, cargas de equipamentos, superfície freática, e forças sísmicas.

A pilha de estéril deve manter um fator de segurança de, no mínimo, 1,5 quando esta

estrutura estiver seca de acordo com a legislação brasileira. Porém, se for selecionada uma área específica de instabilidade mais provável dessa estrutura geotécnica, que se refere a condições transversais críticas em direção ao lençol freático, o fator de segurança mínimo exigido passa a ser considerado 1,3 como valor mínimo aceito. A avaliação de segurança é adequada para comprovar a avaliar a confiabilidade do investimento e a responsabilidade socioambiental dos empreendimentos de mineração. Por meio de métodos de avaliação, foi possível definir a classificação do depósito de mina Oeste de acordo com o risco geotécnico de ruptura ou colapso (BC Mine Waste rock Pile Research Committee, 1991).

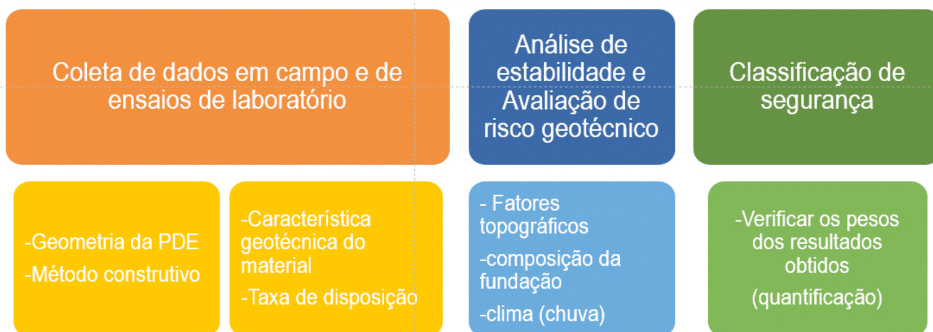


Figura 1- Pilha de estéril Oeste. Fonte: Vale S.A.

2 | METODOLOGIA

É possível subdividir o sistema de classificação da pilha de disposição de estéril (PDE) proposto neste trabalho em três etapas principais, são elas: coleta de dados de campo e de ensaios de laboratório; análise e avaliação de risco geotécnico e, por fim, classificação da pilha de disposição de estéril, como pode ser observado no Quadro 1.

Classificação da PDE Oeste



Quadro 1- Etapas de classificação da DPE Oeste

O equilíbrio limite é a teoria capaz de analisar a estabilidade de taludes, seccionando ao longo de superfícies de deslizamento do talude da pilha de estéril, que são em formas lamelas ou cortes. O número de fatias varia e depende volume de material rochoso que é limitada pela ruptura de acordo com a geometria da massa de deslizamento e seus tipos de materiais. O processo iterativo numérico que satisfaz todas as condições de equilíbrio é o método para calcular o fator de segurança de uma falha de declive específica. A teoria do equilíbrio limite utilizou o método de Spencer para determinar o fator de segurança (FoS) dessa PDE, uma vez que o método de Spencer não considera apenas o equilíbrio limite em relação ao momento, mas também os pontos de tensão e resistência entre as fatias ou lamelas (JACOBSZ, 2016).

O coeficiente R_u avalia a saturação, que é a rocha retém água, que modela a pressão dos poros como um fator de pressão vertical da terra para cada fatia do balanço limite; cada fatia contém 10% de massa que mostra o fenômeno de pressão dos poros (coeficiente de R_u de 10%). Por outro lado, a saturação de sua fundação considera o coeficiente H_u igual a 1. A equação 1 rege este coeficiente, ou seja, considera que a fundação retém água inteiramente.

$$\mu = H_u y^u h$$

Equação 1 – Coeficiente H_u

A pressão dos poros é calculada por meio de um coeficiente H_u variando de 0-1. Onde $H_u = 0$ significa solo seco, enquanto $H_u = 1$ representa condições hidrostáticas. Slide® analisa as seções críticas da pilha de estéril Oeste. Este software estima automaticamente a pressão dos poros usando a Equação 2.

$$H_u = \cos^2 \alpha$$

Equação 2 – estimativa da poropressão

Onde α representa a inclinação da superfície da água em relação à horizontal. A análise de estabilidade utiliza os critérios de Mohr-Coulomb para determinar o comportamento da rocha e do solo presentes na PDE Oeste. A equação generalizada é apresentada como Equação 3, que consiste no critério de ruptura, Mohr-Coulomb, que depende do atrito e da coesão simultaneamente.

$$\tau_f = c + \tan\Phi$$

Equação 3 – cálculo da resistência do material rochoso

Para definir a localização exata das seções críticas, Civil3D-Autocad® permite uma boa avaliação das seções a partir da topografia atualizada, conforme mostra a Figura 2, foram selecionadas a seções com as geometrias menos favoráveis à estabilidade da PDE Oeste.

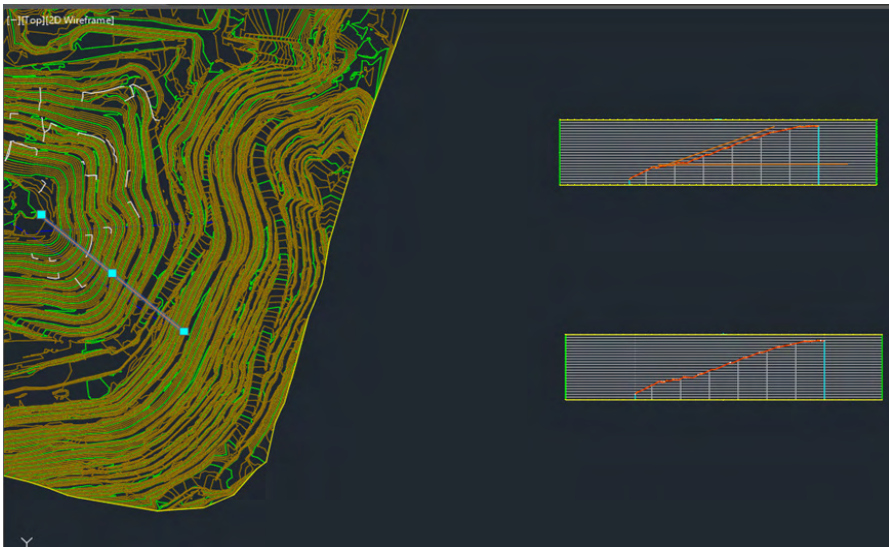


Figura 2 – Seleção de seções críticas da PDE Oeste (Civil3D-Autocad®)

A Figura 3 expõe a aplicação do Slide® para encontrar o fator de segurança de um de geometria crítica, considerando todos os lados da PDE Oeste. É ressaltado o método de Spencer de interação das lamelas ou fatias do equilíbrio limite.

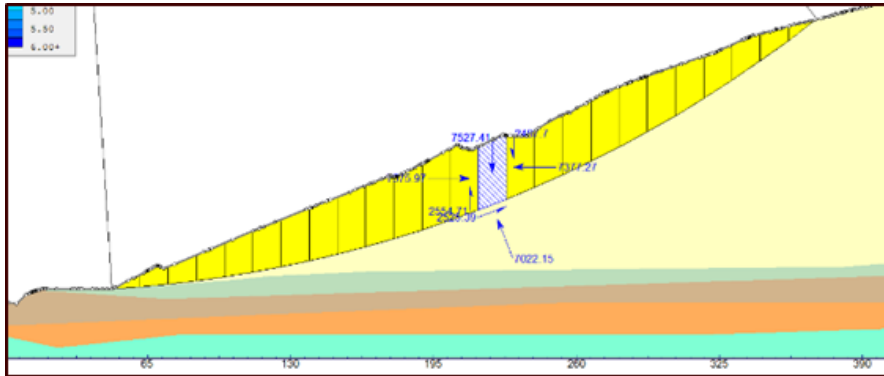


Figura 3- Método de Spencer e o Equilíbrio Limite

O método de classificação consiste em uma soma de pontuações, o risco de ruptura aumenta conforme a pontuação também aumenta, possuem relação direta. As pilhas de estéril são classificadas em quatro categorias diferentes de acordo com o risco de falha, eles são insignificante, baixo, moderado ou alto. As quatro categorias ou classes de estabilidade da PDE são determinadas com base na análise das seções críticas de estabilidade, geometria, taxa de disposição de estéril entre outros fatores já apresentados no Quadro 1. O método de classificação ajuda a definir o nível de esforço ou trabalho exigido para manter a estrutura geotécnica estável. Propõe-se um método conveniente para avaliar o nível apropriado de esforço refletido pela classificação de estabilidade de uma PDE. Portanto, este método permite definir premissas, determinar o nível provável de restrição operacional e indicar uma classificação ou classe de estabilidade da PDE. Podem refletir os requisitos de monitoramento frequente, por exemplo. Quando uma pilha de estéril reflete uma pontuação inferior a 300, o mínimo aceitável, ela representa um risco de ruptura insignificante. Por outro lado, a pontuação máxima possível é de 1800. Uma PDE com a pontuação máxima é classificada como classe IV, o que significa alto risco de ruptura ou colapso, seria necessária uma investigação profunda e um alto nível de esforço de projeto para um pilha de disposição de estéril com essa classificação. Características geométricas são levadas em consideração, as alturas, por exemplo, são divididas em quatro intervalos: menos de 50 metros, entre 50 e 100 metros, de 100 a 200 metros e superiores a 200 metros. Em termos de volume, o depósito de resíduos pode ser pequeno (menos de 1 milhão de metros cúbicos de banco), médio (de 1 a 50 milhões de metros cúbicos por banco) e grande (mais de 50 metros cúbicos por banco). A inclinação do despejo em declive que é classificada como plana (menos de 26 graus), moderada (de 36 a 35 graus) e íngreme (mais de 35 graus). O método também classifica intervalos de inclinação da fundação variando de suave (<10 graus) a extremamente inclinada (> 32 graus) e se define como plana, moderada, íngreme e extrema, que corresponde de zero a duzentos de pontuação.

Além da configuração geométrica, o método classifica o grau de confinamento do material rochoso depositado pode variar entre confinado, moderadamente confinado e não confinado, seguem algumas características e marcam mais pontos possíveis para a classificação. As inclinações da fundação também influenciam na classificação. É confinado, intermediário ou não confinado, considerando fatores de observação de sua forma da Pilha, como de fundo de vale ou ainda do tipo pilha propriamente dito, empilhamento ou também chamado informalmente de “bolo de noiva” tal como é o caso da PDE em estudo. Enquanto a qualidade do material despejado é alta, moderada e ruim. Por sua vez, o método de construção é favorável, misto ou desfavorável. As condições Piezométricas e climáticas apresentam juntas uma importante variável na classificação da PDE, que pode ser intermediária favorável e desfavorável. Enquanto a taxa de disposição de estéril é definida como lenta, moderada ou alta. A última variável é a sismicidade que é baixa moderada ou alta após os estudos da zona de risco.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados necessários para a classificação da PDE Oeste do complexo ferrífero de Carajás foram elencados neste trabalho conforme Quadro 2. Esta estrutura geotécnica tem sua classe definida de acordo com o método apresentado, que descreve e pontua cada uma das características que regem a estabilidade de uma pilha de estéril segundo metodologia apresentada.

NOME	PILHA DE DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL (PDE) OESTE
<i>Ciclo de vida</i>	<i>Desativada ou descomissionada</i>
<i>Localização</i>	<i>Ao Oeste da mina N4E (-9330793 e 591022) SAD69</i>
<i>Altura</i>	<i>155,35 metros</i>
<i>Elevação (cota)</i>	<i>863,35 metros</i>
<i>Área</i>	<i>957.295,32 metros quadrados</i>
<i>Volume</i>	<i>62.300,00 metros cúbicos</i>
<i>Massa</i>	<i>124.600,00 toneladas</i>
<i>Inclinação global dos taludes</i>	<i>23 graus</i>
<i>Inclinação de talude (entre bancos)</i>	<i>27 graus (variando de 16 a 27 graus)</i>
<i>Inclinação da fundação</i>	<i>Até 3%</i>
<i>Tipo da PDE</i>	<i>Empilhamento, pilha central ou “bolo de noiva”</i>
<i>Volume/banco</i>	<i>7,8 metros cúbicos</i>
<i>Inclinação do talude entre bancos (altura/banco)</i>	<i>Varia de 17 a 27 graus</i>
<i>Altura por banco</i>	<i>20 metros (varia de 18 a 23,6)</i>

<i>Largura de berma</i>	<i>Varia entre 4,5 a 25 metros, a largura de berma diminui à medida que a altura aumenta.</i>
<i>Drenagem superficial</i>	<i>Complementam a vazão através de estruturas civis como canaletas, e valetas.</i>
<i>Método Construtivo</i>	<i>Misto: método ascendente nas últimas décadas, e método ascendente desde 1984 em diante.</i>
<i>Material da fundação</i>	<i>Fundação resistente com rochas máficas competentes.</i>
<i>Material disposto</i>	<i>Estéril com granulometria fina</i>
<i>Grau de confinamento</i>	<i>Solo confinado</i>
<i>Taxa de disposição</i>	<i>Sem disposição por mais de 3 anos</i>
<i>Condições climáticas</i>	<i>Taxa de precipitação total Anual de 2.088 milímetros</i>
<i>Condições piezométricas</i>	<i>Sem evidências de pressão piezométrica significativa, considerada baixa, portanto.</i>
<i>Sismicidade</i>	<i>Zone 0 de risco sísmico de acordo com ABNT/NBR 15421/2017</i>

Quadro 2 – Dados coletados em trabalhos de campo e estudos prévios da PDE Oeste

Seguindo ao seu resultado, o guia de classificação ainda é capaz de sugerir um determinado nível de esforço que deve ser feito para a estrutura. De acordo com o método, a PDE Oeste atingiu 550 pontos de pontuação, o sistema de classificação define a pilha como classe de estabilidade II (faixa de pontuação entre 600 a 1200 pontos) o que indica um baixo risco potencial de ruptura, colapso ou desestabilização significativa.

Fatores-chave da estabilidade	Descrição	Intervalos das condições		Pontuação	
Geometria da PDE	Altura	Regular	155,34m	De 100 a 200 m	100
	Volume	Moderado	7.800 m ³ /bancos	Entre 1 a 50.000 m ³ /banco	50
	Inclinação global	Flat	23°	Menos de 26°	0
	Inclinação da fundação	Flat	3°	Menos de 10%	0
Grau de confinamento	Confinado	Talude côncavo em uma seção plana	Talude côncavo em uma seção plana –bom suporte em sua fundação		0
Tipo de fundação	Competente	Material da fundação tão competente ou mais competente que o material disposto na PDE, Sem estrutura geológica adversa.			0

Qualidade do material disposto	Baixa	Poucas rochas e muito solo bem intemperizados –com granulometria fina em mais de 25% do material.		200
Método construtivo	Misto	Espessura vertical da camada disposta por banco moderada (de 25 a 50), método construtivo misto.		100
Condições climáticas e piezométricas	Intermediária	Desfavorável	Alta pressão piezométrica, surgências, alta precipitação, alto potencial para surgimento de superfície freática ou para elevar o nível de saturação consideravelmente.	100
Taxa de disposição	Baixa	Sem disposição nos últimos 3 anos	Menos de 25m ³ em bancada por metros lineares da crista do talude por dia (menor taxa).	0
Sismicidade	Baixa	Zona de risco 0 (zero)	Risco sísmico mínimo	0
PONTOS DE ESTABILIDADE				550
CLASSE DE ESTABILIDADE DA PDE				II

Quadro 3 -Avaliação de Segurança PDE Oeste

O Quadro 3 reúne todos os dados correspondentes às etapas de classificação das estacas apresentadas na metodologia, expondo a pontuação de cada etapa de avaliação do método. Ao final do Quadro 3, é possível observar a pontuação total referente à soma das sucessivas etapas de classificação da pilha de descarte Oeste. Por meio da pontuação final quantificada para esta pilha, será possível discutir a classificação obtida e quais atividades são recomendadas para a estrutura geotécnica que se encontra nesta faixa de classificação.

A classe de estabilidade definida através da avaliação é de nível II, o que significa que os esforços recomendados estão entre outros: Investigação completa do local, poços de teste, amostragem podem ser necessários, vários ensaios de laboratório, análise de estabilidade simples necessária, algumas restrições na construção, motoramente de rotina e instrumentação simples como INA (indicador de nível d'água) e Avaliação da poropressão.

Os fatores mais expressivos que merecem maior atenção e contribuem para a desestabilização da estrutura geotécnica, os quais foram abordados neste trabalho são:

altura da estaca; qualidade do material predominante de rochas de baixa competência no empilhamento; método de construção misto de elevação de margem; condições piezométricas e climáticas moderadamente desfavoráveis. A altura do depósito de estéril Oeste é de 155,34 metros e, portanto, é classificado com a segunda maior faixa de pontuação nesta categoria, pontuando 100 para esta característica da estrutura geotécnica, em termos de altura. É importante destacar que quanto maior a soma das pontuações das categorias, menor é a estabilidade.

A qualidade do material predominante é de baixa competência, compondo a pilha de estéril com rochas de baixa competência e muito intemperizada e solo, que é o material da escavação que não tem aproveitamento econômico no momento da lavra, e sua retirada é fundamental para a exploração do minério localizado nas camadas abaixo desta e, portanto, não permite a substituição do material. O método construtivo é misto, pois apresenta as duas formas, em sequência ascendente e descendente, depende da década, já que a PDE Oeste data desde a década de 1980 e deixa de receber estéril há pouco mais de 3 anos. Os fatores que combinados determinaram o método construtivo foram: minimização da distância média de transporte, capacidade e estabilidade da estrutura geotécnica.

A influência do carga sísmica também foi investigada neste trabalho. Em suma, o fator de segurança sofre redução insignificante devido à sismicidade. O carregamento sísmico adicionado à situação crítica das águas subterrâneas não é capaz de deixar o fator de segurança global da PDE Oeste abaixo de 1,3. É um excelente indicador de boa segurança da estrutura, pois atende aos requisitos normativos mesmo que seja considerada a atividade sísmica da região. Os fatores de segurança das seções analisadas apresentam bons resultados. O fator de segurança (FS) global do trecho, parte leste da PDE Oeste que apresenta piores resultados, é normalmente 1,76 e se for considerado também o nível freático crítico, durante a estação chuvosa Amazônica, o fator de segurança cai para 1,48. Analisando taludes individualmente (em apenas alguns taludes isolados, não é o FS global) quando a análise considera a poropressão, o lençol freático crítico e a sismicidade ao mesmo tempo O resultado é o menor fator de segurança deste trabalho, FS de 1,35 como é perceptível na Figura 4.

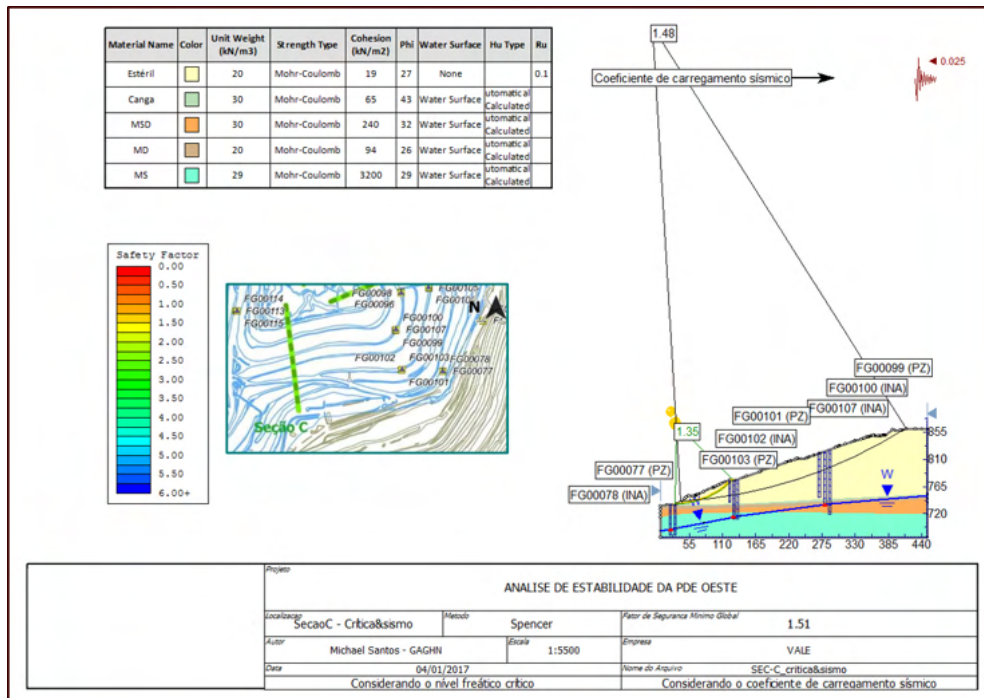


Figura 4- Análise de estabilidade da seção mais crítica

Os fatores de segurança também fornecem uma boa avaliação, que mostra um bom nível de estabilidade mesmo que ocorresse uma atividade sísmica na parte chuvosa do ano, nível freático crítico, a PDE Oeste manteria sua estabilidade física.

4 | CONCLUSÃO

O sistema de classificação de Pilhas de disposição de estéril apresentado é uma ferramenta muito útil na avaliação de PDE de mineração de ferro em fase de desativação, atingindo um nível razoável entre aplicabilidade e facilidade no estudo do caso avaliado. O sistema de classificação utilizado consiste em uma forma de primeira avaliação, que deve indicar o nível de esforço que deve ser aplicado e quanta pesquisa e planejamento de atividades se recomenda para cada situação. A pontuação da avaliação de segurança da PDE estudado totalizou 550 pontos, o que corresponde à classe de estabilidade II, indicando baixo potencial de ruptura. O menor fator de segurança é de 1,35 (em um talude na seção mais crítica, não se refere ao fator de segurança global) quando a análise considera a sismicidade, o nível freático crítico e poropressão ao mesmo tempo, que ainda é capaz de manter estável o depósito de estéril Oeste.

O guia de classificação de pilha de estéril recomenda uma inspeção local, incluindo monitoramento frequente de poços, amostragem obrigatória, análise de estabilidade

obrigatória básica (que já é feita no monte estudado), algumas restrições na construção de conclusão, instrumentação visual e de rotina também podem ser necessárias. Portanto, este sistema de classificação serve de base para a tomada de decisão inicial no que diz respeito às pesquisas geotécnicas e, conseqüentemente, dá uma boa ideia do nível de investimento necessário para a implantação da estabilidade da PDE Oeste.

Os fatores que trazem instabilidade à PDE Oeste são a qualidade do material, por se tratar de decapeamento de baixa competência geomecânica, método construtivo misto, condições climáticas desfavoráveis. Além de ser uma pilha com dezenas de anos e, portanto, possui altura e volume consideráveis, os maiores, de fato, de todos os do complexo minerário de Carajás, no Pará, Brasil.

Por outro lado, os fatores que contribuíram para a manutenção da estabilidade geotécnica da PDE Oeste são a inclinação que permanece 23 graus no ângulo de inclinação global, a fundação que é praticamente plana e formada por material muito competente, a taxa de disposição que nos últimos anos foi zero. A sismicidade também foi um fator analisado, mas não teve influência significativa na estrutura geotécnica estudada dada sua zona sísmica.

5 | REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Coletânea de normas de mineração e meio ambiente - NBR 13029. Rio de Janeiro. 2006.

ABRAMSON, L.W. LEE, T.S., SHARMA, S., and BOYCE, G.M. *Slope Stability and Stabilization Methods*. John Wiley & Sons, Inc, New York. 2002.

AUGUSTO FILHO, Oswaldo; VIRGILI, José Carlos. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A, Ed(s). *Geologia de Engenharia*. São Paulos: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

BC Mine Waste rock Pile Research Committee. *Mined rock and overburden piles*. Investigation & Design Manual, Interim Guidelines, 1991.

COUZENS, T. R. *Planning Models: Operating and Environmental Implications*. McCarter, M. K. Design of Non-Impounding Mine Waste Dump, AIME, New York. 1985.

FRANCA, O., FRANCO, D., ÁVILA, J. P. & ROBERTSON, A. M. *Risk Management Assessment of dams and waste dumps on MBR mines*. Minas Gerais, Brazil. 2002.

JACOBSZ, S. *Proceedings of the first Southern African Geotechnical Conference*. London: Taylor & Francis Group, 2016.

LOTTERMOSER, B. *Mine Wastes*. Berlin: Springer Berlin, 2014.

MINING ENGINEERING HANDBOOK. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Peter Darling (editor). Third edition. Vol. 1 and 2, USA. 2011.

TALLARICO, F.H.B., MCNAUGHTON, N.J., GROVES, D.I., FLETCHER, I.R., FIGUEIREDO, B.R., CARVALHO, J.B., REGO, J.L., Nunes, A.R. Geological and Shrimp II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. *Mineralium Deposita*, 2006.

VASQUEZ, M.L.; SOUSA, C.S.; CARVALHO, J.M.A.. Mapa geológico do Estado do Pará– proposta e avanços. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 9, Belém. Resumos Expandidos, Belém, SBG. CD ROM 2006.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Análise microestrutural 38

Avaliação de estabilidade 1

B

Biopolímeros 53

C

Carajás 1, 2, 7, 12, 13

Cipó titica 43, 44, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52

E

Engenharia de Materiais 35, 42, 43, 53

Engenharia de Minas 14, 25, 55

Engenharia geotécnica 1

Engenharia Química 54

F

Fator de segurança 2, 3, 4, 5, 10, 11

Fibras Lignocelulósicas 43, 44, 51, 52

Fibras sintéticas 43

Fundição 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42

G

Geologia de engenharia 12

Geotecnia 55

H

Heteropsisriedeliana Schott 43, 46, 50

L

Lavra 2, 10, 14, 15, 18, 21, 25, 26, 55

Lignina 43, 47, 50, 51, 52

M

Magnetic susceptibility 27, 33

Materiais 4, 16, 35, 36, 38, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 53

Meio ambiente 12, 43, 44
Metalurgia extrativa 55
Mineração 1, 3, 11, 12, 15, 19, 55

N

NBR 13029 12
NBR 30284 35, 36

P

Pilha de disposição de estéril 1, 2, 3, 6, 7
Polímeros Verdes 53
Poropressão 5, 9, 10, 11
Prevenção da corrosão 42
Propriedades mecânicas 35, 37, 42, 45, 51
Pyrite-Pyrrhotite 27, 29, 31

R

Reaproveitamento de resíduos 45
Recursos naturais alternativos 45

S

Selective flotation 27, 33

T

Teoria do equilíbrio limite 4
Tratamento térmico de precipitação 36, 38

W

Waste dumps 12

COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE MINAS E MATERIAIS

- 
- 🌐 www.atenaeditora.com.br
 - ✉ contato@atenaeditora.com.br
 - 📷 @atenaeditora
 - 📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE MINAS E MATERIAIS

- 
-  www.atenaeditora.com.br
 -  contato@atenaeditora.com.br
 -  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 -  www.facebook.com/atenaeditora.com.br