

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Estudo Paramétrico da Classificação de Depósitos de Estéril em Mineração

Gabriel Augusto Soares

Engenheiro, Tetra Tech, Belo Horizonte, Brasil, gabrielsoares51@hotmail.com

Evandro Moraes da Gama

Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, evandrodagama@gmail.com

RESUMO: À pedido do governo canadense, foi desenvolvido pela empresa de consultoria Piteau Associates Engineering Ltd. um método que classifica uma pilha de estéril baseado em diversas características que influenciam a estabilidade física da estrutura. O método foi compilado na obra “Mined Rock and Overburden Piles” (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991) e será chamado neste trabalho apenas por sistema de classificação. Baseado nisto, o objetivo geral deste artigo é realizar uma parametrização tanto do próprio sistema de classificação, quanto dos resultados da classificação de seis pilhas de estéril diferentes, sendo três realizadas pelo autor e três obtidas da bibliografia. Para a devida parametrização do sistema e resultados, serão executadas as seguintes etapas: classificação das estruturas estudadas, análise da ponderação dos fatores-chave utilizados no sistema de classificação, divisão dos fatores-chave utilizados no sistema de classificação em dois grupos denominados fatores variáveis e de projeto, análises e comparações das pontuações obtidas pelos fatores-chave dos grupos propostos e estruturas. O sistema se mostrou bastante equilibrado com o uso dos fatores que variam com o avanço da disposição de estéril na estrutura em relação aos fatores fixos. Entretanto, fatores variáveis parecem impactar mais na pontuação global da estrutura, representando cerca de 50% da pontuação total no menor caso e 81% no maior caso apresentado neste artigo.

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

1 Introdução

No Brasil, a norma ABNT NBR 13029 (2017) especifica os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projeto de pilha para a disposição de estéril gerado por lavra de mina a céu aberto ou subterrânea visando atender às condições de segurança, operacionalidade, economia e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente.

Sabendo dos riscos geotécnicos e ambientais associados à uma possível ruptura de uma pilha de estéril, é necessário que o projeto seja executado em conformidade com as normas ambientais, de segurança e também que haja sistemas que auxiliem as tomadas de decisões em relação à estabilidade física da estrutura.

De acordo com Aragão (2008), há uma certa carência por ferramentas que auxiliem os profissionais à avaliarem o nível adequado de detalhamento, tanto na etapa de investigação, quanto na etapa de projeto de uma pilha.

No Canadá, foi desenvolvido um sistema que classifica uma pilha de estéril baseado em diversas características que influenciam a estabilidade física da estrutura. Esse sistema foi desenvolvido à pedido do governo canadense por uma empresa de consultora (Piteau Associates Engineering Ltd.). O sistema foi apresentado pelo governo na obra “Mined Rock and Overburden Piles” (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991) e será chamado neste trabalho apenas por sistema de classificação.

2 Sistema de Classificação

O sistema de classificação de pilhas de estéril compreende três etapas principais, a saber:

- Avaliação de estabilidade da pilha;
- Classe de estabilidade da pilha;
- Verificação de enquadramento da classe;



Porém, neste artigo será estudado apenas a primeira etapa.

2.1 Avaliação da estabilidade da estrutura

A avaliação de estabilidade da pilha trata-se de uma metodologia para avaliar o potencial relativo em termos de estabilidade da estrutura. A avaliação das pilhas é feita de uma forma semi-quantitativa ponderando-se vários fatores-chave, sendo eles:

- Configuração da pilha;
- Inclinação do talude de fundação;
- Grau de confinamento;
- Tipo de fundação;
- Qualidade do material da pilha;
- Método de construção;
- Condições piezométricas e climáticas;
- Taxa de disposição;
- Sismicidade.

Assim, para cada fator-chave é dada uma pontuação e uma avaliação global da estabilidade da pilha realizada com a soma das pontuações individuais para cada um dos vários fatores-chave analisados. A pontuação máxima possível de ser obtida é de 1800, sendo que quanto maior o total de pontos, maior o potencial de instabilidade da pilha. A tabela de pontuação de estabilidade é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Tabela de Pontuação de Estabilidade de Pilhas de Disposição de Estéril.

Fonte: modificado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991.

Fatores-Chave que Afetam a Estabilidade		Faixa de Condições ou Descrições		Pontuação
Configuração da Pilha	Altura da pilha	< 50 m		0
		50 m - 100 m		50
		100 m - 200 m		100
		> 200 m		200
	Volume da Pilha	Pequeno	< 1 x 10 ⁶ m³/banco	0
		Médio	1 - 50 x 10 ⁶ m³/banco	50
		Grande	> 50 x 10 ⁶ m³/banco	100
	Inclinação do Talude	Suave	< 26°	0
		Moderado	26° - 35°	50
		Íngreme	> 35°	100
Inclinação do Talude de Fundação	Suave	10°	0	
	Moderada	10° - 25°	50	
	Íngreme	25° - 32°	100	
	Extrema	> 32°	200	
Grau de Confinamento	Confinado	- Talude côncavo em planta ou seção;	0	
		- Aterros em vale ou transversais a um vale, pé de talude em contato com a parede oposta do vale;		
		- Ravinas em forma de dente de serra que podem ser usadas para limitar a inclinação de fundação.		
	Moderadamente Confinado	- Bancos ou terraços naturais nos taludes;	50	
		- Taludes com inclinação uniforme, limitados por topografia natural diversificada;		
	- Empilhamento de estêreis em encostas, em vales abertos, ou transversais a vales.			
		- talude convexo em planta ou seção;	100	



Fatores-Chave que Afetam a Estabilidade	Faixa de Condições ou Descrições		Pontuação
Tipo de Fundação	Sem Confinamento	- Aterros de encosta ou aterros de crista sem confinamento na base;	
		- Sem ravinas ou bancos para auxiliar a construção.	
	Competente	- Materiais de fundação tão ou mais resistentes que os da pilha;	0
		- Não sujeita a efeitos adversos da poropressão;	
		- Sem estruturas geológicas desfavoráveis.	
	Intermediária	- Intermediária entre competente e fraca;	100
		- Ganho de resistência do solo com adensamento;	
		- Dissipação do excesso de poropressões com o controle da taxa de carregamento.	
	Fraca	- Capacidade de suporte limitada, solos moles;	200
		- Sujeita a excesso de poropressão devido ao carregamento;	
		- Condições adversas de água subterrânea, surgências ou infiltrações;	
		- Baixa resistência ao cisalhamento, com alto potencial de liquefação.	
Qualidade do Material da Pilha	Alta	- Resistente, durável;	0
		- Menos que 10% de finos.	
	Moderada	- Moderadamente resistente, durabilidade variável;	100
		- 10% a 25% de finos.	
	Pobre	- Predominância de rochas fracas de baixa durabilidade;	200
		- Mais que 25% de finos, material de cobertura (capeamento).	
Método de Construção	Favorável	- Bancos ou camadas não muito espessos (< 25 m de espessura), plataformas largas;	0
		- Disposição ao longo das curvas de nível;	
		- Construção ascendente;	
		- "Wrap-arounds" ou terraços.	
	Misto	- Bancos ou bancadas moderadamente espessas (25 m - 50 m);	100
		- Métodos mistos de construção.	
	Desfavorável	- Bancos ou camadas muito espessas (> 50 m), plataforma estreita (aterro na forma de pontões);	200
		- Disposição abaixo da linha de queda do talude;	
		- Construção descendente.	
Condições Piezométricas e Climáticas	Favorável	- Baixas pressões piezométricas, nenhuma surgência na fundação;	0
		- Improvável desenvolvimento de superfície freática no interior da pilha;	
		- Precipitação limitada;	
		- Infiltração mínima na pilha.	
	Intermediária	- Pressões piezométricas moderadas, algumas infiltrações na fundação;	100
		- Desenvolvimento limitado da superfície freática na pilha;	
		- Precipitação moderada;	



Fatores-Chave que Afetam a Estabilidade	Faixa de Condições ou Descrições		Pontuação
		- Alta infiltração no interior da pilha.	
	Desfavorável	- Altas pressões piezométricas, surgências na fundação;	200
		- Alta ou moderada precipitação;	
		- Significativo potencial de desenvolvimento de superfície freática ou lençol suspenso no interior da pilha.	
Taxa de Disposição	Baixa	- < 25 m ³ /banco por metro linear de crista por dia;	0
		- Taxa de avanço da crista < 0,1 m por dia.	
	Moderada	- < 25 - 200 m ³ /banco por metro linear de crista por dia;	100
		- Taxa de avanço da crista de 0,1 m - 1,0 m por dia.	
	Alta	- > 200 m ³ /banco por metro linear de crista por dia;	200
		- Taxa de avanço da crista > 1,0 m por dia.	
Sismicidade	Baixa	- Zona de risco sísmico 0 e 1 (Escala Richter).	0
	Moderada	- Zona de risco sísmico 2 e 3.	50
	Alta	- Zona de risco sísmico 4 ou maior.	100
Pontuação máxima possível de estabilidade da pilha: 1800 (quanto maior, maior o potencial de instabilidade)			

3 Objetivos e Métodos

Este artigo apresentará a classificação de 3 pilhas de disposição de estéril (PDE) por meio de dados cedidos pela empresa de engenharia e consultoria Geogama, além das 3 classificações executadas por Aragão (2008). Então, a partir das 6 classificações, será realizado um estudo paramétrico do próprio sistema de classificação assim como das classificações apresentadas.

Para o alcance dos objetivos propostos, serão executadas as seguintes etapas:

- Proposição de divisão dos fatores-chave utilizados no sistema de classificação em dois grupos: fatores variáveis e fatores de projeto;
- Análise do sistema de classificação em virtude da ponderação das pontuações dos fatores-chave pela divisão em grupos proposta;
- Análise das pontuações obtidas nas classificações em termos de fatores-chave, grupo proposto e estrutura em estudo.

4 Classificações

Na Tabela 2 são apresentadas as 3 classificações cedidas pela empresa de consultoria Geogama (PDE Miguel Burnier, PDE C e PDE B), além das 3 classificações executadas por Aragão (2008), (PDE Grota Fria, PDE Capão da Serra e PDE Grota 0). Todas as pilhas encontram-se em Minas Gerais e são formadas de estéril de minério de ferro.



Tabela 2: Pontuação obtida por cada PDE analisada neste artigo.

Fatores-chave que Afetam a Estabilidade	Pontuações Possíveis	PDE Miguel Burnier	PDE B	PDE C	PDE Grotta Fria	PDE Capão da Serra	PDE Grotta 0
Altura da Pilha	0-50-100-200	0	50	50	50	200	200
Volume da Pilha	0-50-100	100	50	0	0	50	50
Inclinação do Talude	0-50-100	50	0	100	0	0	0
Inclinação do Talude de Fundação	0-50-100-200	0	0	50	0	0	0
Grau de Confinamento	0-50-100	100	50	100	50	50	50
Tipo de Fundação	0-100-200	100	100	100	100	100	100
Qualidade do Material da Pilha	0-100-200	100	100	100	100	100	200
Método de Construção	0-100-200	0	0	0	0	0	0
Piezometria e Clima	0-100-200	100	0	0	100	100	200
Taxa de Disposição	0-100-200	0	0	0	0	0	0
Sismicidade	0-50-100	0	0	0	0	0	0
Pontuação total:		550	350	500	400	600	800
Classificação:		II (potencial de ruptura baixo)	II (potencial de ruptura baixo)	II (potencial de ruptura baixo)	II (potencial de ruptura baixo)	III (potencial de ruptura moderado)	III (potencial de ruptura moderado)

5 Parametrização do Sistema de Classificação e Resultados

5.1 Fatores variáveis e de projeto

Percebe-se que o sistema de classificação engloba dois grupos de fatores-chave, os que podem variar com o avanço da disposição do estéril na pilha (fatores variáveis) e os de projeto (fatores de projeto), que não variam com o tempo.

Fatores variáveis são os fatores que podem variar com o avanço da disposição de estéril. Nesses fatores é possível realizar o monitoramento e acompanhamento de suas grandezas, além da possibilidade de uma intervenção caso as pontuações destes e da pilha como um todo apresente resultados não satisfatórios, gerando uma pontuação de estabilidade alta. Neste grupo se encaixam os seguintes fatores: volume, altura, qualidade do material da pilha, condições piezométricas, taxa de disposição e inclinação do talude. Ressalta-se que como premissa deste trabalho, fatores-chaves relativos à configuração da pilha como o volume, altura e inclinação da pilha são considerados variáveis já que podem ser modificados com a suspensão a qualquer momento da disposição de estéril (diminuindo a altura e volume de projeto) ou com o aumento da largura das próximas bermas a serem construídas (diminuindo assim a inclinação da estrutura), caso seja essa a intenção do administrador da estrutura.

Após o início da disposição de estéril, diferentemente dos fatores variáveis, os fatores de projeto são fatores invariáveis ou de difícil mudança. Neste grupo se encaixam os seguintes fatores-chave: inclinação da fundação, tipo de fundação, método de construção, grau de confinamento e sismicidade.

O grupo dos fatores variáveis engloba 6 dos 11 fatores-chave totais relativos ao sistema de classificação, ou seja, cerca de 55% do total, já o grupo dos fatores de projeto ocupa os 45% restantes. A Figura 1 mostra que o sistema de classificação assegura um balanceamento em relação ao peso dado a cada agrupamento de fatores proposto no artigo já que 55% dos fatores geram pontuações relativas à 56% da pontuação total e os 45% restantes geram pontuações relativas à 44% da pontuação total.

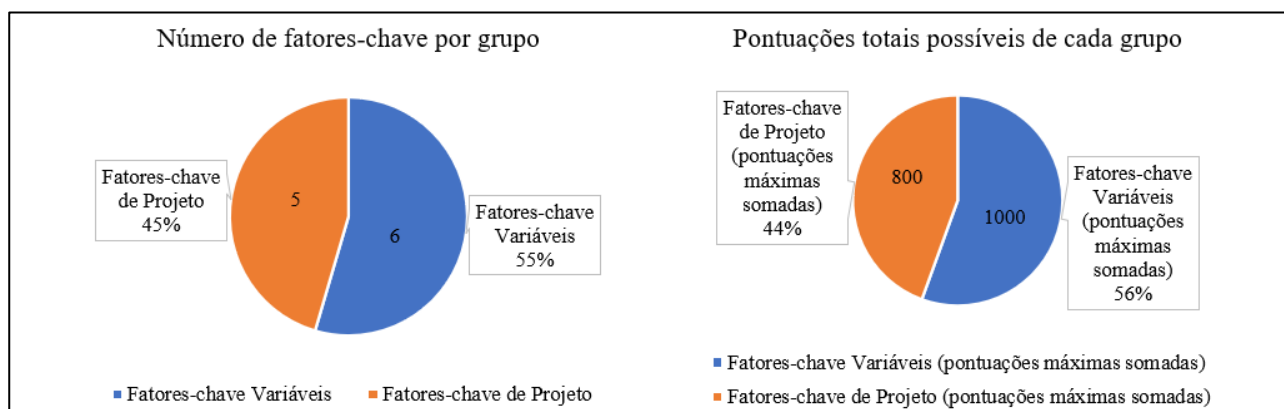


Figura 1. Número de fatores-chaves por grupo e suas respectivas pontuações totais possíveis.

5.2 Variação dos fatores-chave em cada PDE

A Figura 2 exibe um compilado de gráficos relativos às classificações apresentadas na Tabela 2. Cada gráfico de pizza contempla um fator-chave e exibe as porcentagens relativas à cada quantidade de pontuação obtida em relação às 6 estruturas em estudo. Percebe-se que os fatores com predominância das cores cinza e amarelo (pontuações obtidas de 100 e 200) pesaram mais dentro da pontuação global de estabilidade das estruturas analisadas, sendo eles: qualidade do material da pilha, tipo de fundação, altura da pilha e piezometria e clima. Destes fatores-chave, três pertencem ao grupo dos Fatores Variáveis e um ao grupo dos Fatores de Projeto. A Figura 3 exibe as pontuações totais separadas por fatores-chave e também por ambos os grupos.

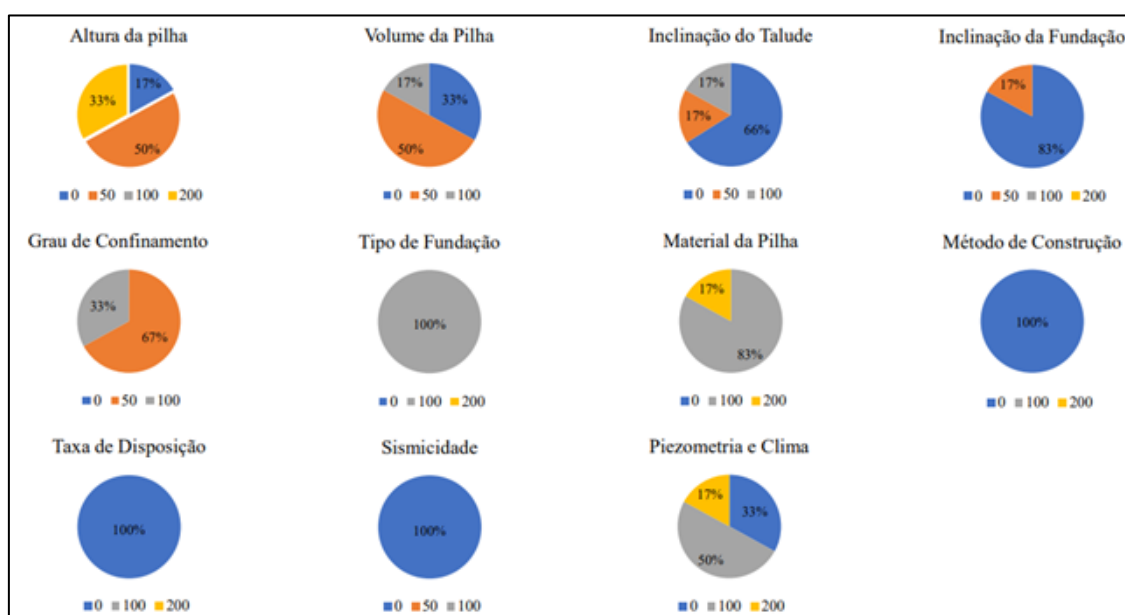


Figura 2. Compilados de gráficos relativos às classificações da Tabela 2.

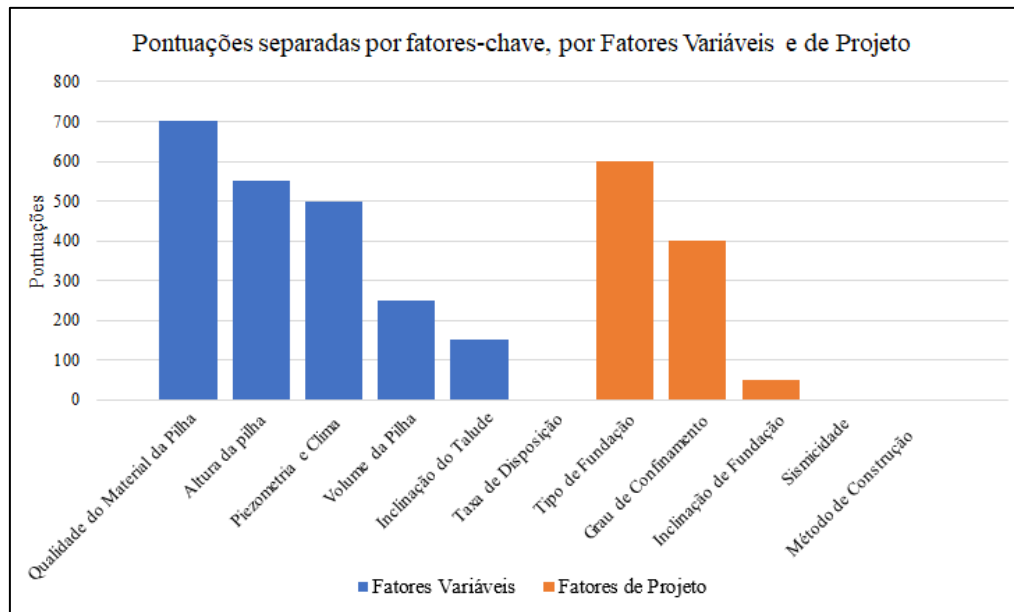


Figura 3. Pontuações separadas por fatores-chave, Fatores Variáveis e de Projeto.

Como apresentado no item 5.1, o sistema de classificação apresenta um equilíbrio entre os pesos de Fatores Variáveis e os de Fatores de projeto. Portanto, espera-se que o peso de cada um dos grupos de fatores seja equivalente a 50% da pontuação total de estabilidade das estruturas analisadas. Entretanto, a Figura 3 e Figura 4 mostram que em geral, a pontuação total dos fatores variáveis obteve uma certa prevalência.

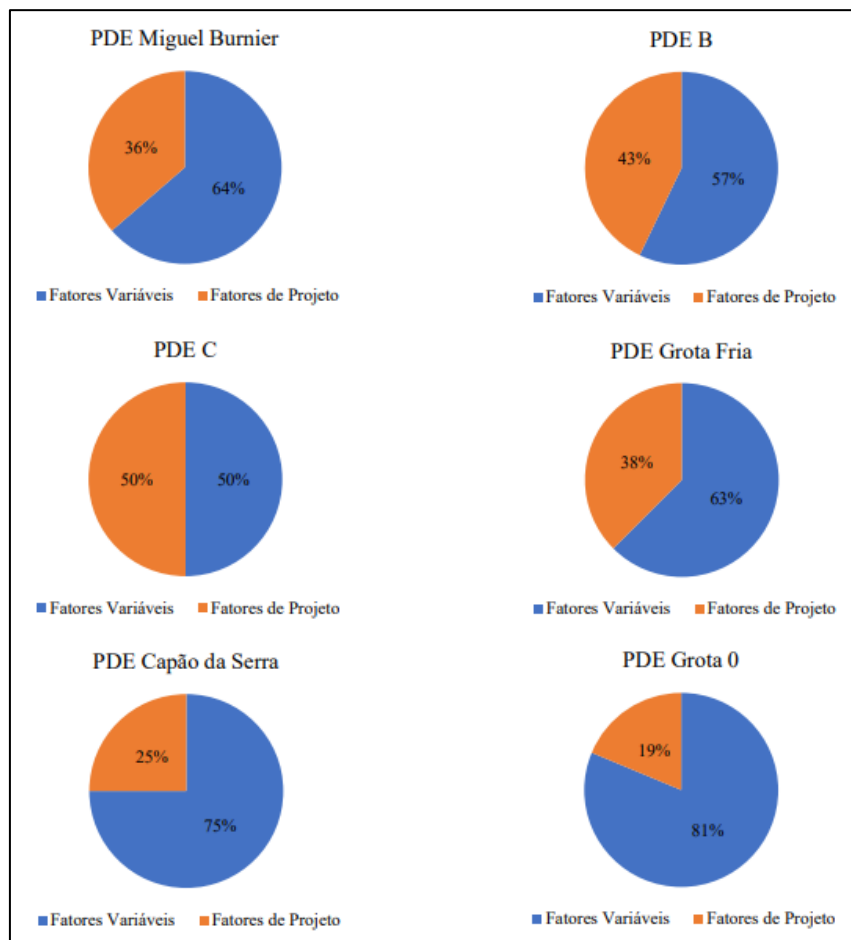


Figura 4. Peso de cada grupo de fatores dentro da pontuação de estabilidade da estrutura.



5 Conclusões

A partir das classificações apresentadas no item 4 e estudo paramétrico executado no item 5, chegou-se às conclusões apresentadas abaixo:

- O sistema de classificação exibe uma equivalência entre sua aplicabilidade e facilidade de utilização. Além disso, para a sua aplicação não são necessários tantos dados quanto os necessários para a execução de um método 100% quantitativo, o que é benéfico já que a falta de dados é um problema recorrente na análise das pilhas de estéril de nosso país, visto que estas em boa parte dos casos não possuem uma campanha de sondagens e ensaios laboratoriais completos;
- O sistema de classificação não substitui a análise quantitativa clássica e sim à complementa;
- O sistema de classificação é bastante equilibrado em relação aos fatores que variam com o avanço da disposição do estéril na estrutura em relação aos fatores fixos, de projeto. Os fatores variáveis representam 55% da quantidade de fatores totais, já a pontuação máxima total deste grupo representa cerca de 56% da pontuação total de todo o sistema, mostrando um evidente equilíbrio. Entretanto, constatou-se que mesmo no menor caso os fatores variáveis representaram cerca de 50% da pontuação total da estrutura variando até cerca de 81% no maior caso. Portanto, pelas pontuações gerais serem majoritariamente governadas por fatores-chave variáveis, em pilhas ainda ativas, há a possibilidade de promover ações que podem vir a gerar uma diminuição da pontuação de estabilidade da estrutura;
- Os fatores que mais influenciaram na pontuação de estabilidade da estrutura são a qualidade do material depositado, o tipo de fundação, a altura da pilha de estéril e condições piezométricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aragão, G. A. S. (2008) *Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto / UFOP, 133 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 13029. *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha*. Rio de Janeiro.
- BC Mine Waste Rock Pile Research Committee (1991) *Mined rock and overburden piles. Investigation & Design Manual. Interim Guidelines*, British Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee, 177 p.
- Geogama Consultoria e Engenharia (2019). *Relatório Técnico das PDEs Miguel Burnier, B e C*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 70 p.