

Determinação da densidade natural em pilhas de estéril em operação

Fernando Portugal Maia Saliba

Tec3, Belo Horizonte, Brasil, fsaliba@tec3engenharia.com.br

Aloysio Portugal Maia Saliba

Dep. de Eng. Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, asaliba@ehr.ufmg.br

Rodrigo Cristiano Barbosa

Tec3, Belo Horizonte, Brasil, rcristiano@tec3engenharia.com.br

Enicarlos Pereira Gonçalves

Vale S.A, Itabira, Brasil, enicarlos.goncalves@vale.com

Bruno Silveira Conceição

Anglo American, Barro Alto, Brasil, bruno.conceicao@angloamerican.com

José Mateus de Vasconcelos Araujo

Anglo American, Barro Alto, Brasil, jose.araujo@angloamerican.com

Wilson Gandini Lugão

AAMFB, Conceição do Mato Dentro, Brasil, wilson.lugao@angloamerican.com

João Paulo dos Santos

AAMFB, Conceição do Mato Dentro, Brasil, joao.p.santos@angloamerican.com

RESUMO: Em um passado recente, as pilhas de disposição de estéril eram limitadas a uma altura de 200 metros. Na revisão da NBR 13.029 (ABNT, 2006) esta limitação deixou de existir e as pilhas passaram a apresentar alturas superiores a 300 metros, mesmo tendo incertezas quanto aos parâmetros hidráulicos e geotécnicos a serem adotados nos estudos de percolação e estabilidade. Assim, o conhecimento aprofundado das propriedades físicas desses materiais tornou-se cada vez mais importante. O intuito deste artigo é discutir sobre os valores de densidade natural obtidos durante a compilação de informações topográficas e de volumes de disposição ao longo da formação de algumas pilhas de estéril atualmente em operação no Brasil. Os dados obtidos são de pilhas formadas preferencialmente por material muito alterado (solo). Porém, nas pilhas analisadas encontram-se também, em pequena quantidade, blocos de rocha sã e materiais com massa específica completamente distintas. Além disso, os projetos de pilha de estéril são dimensionados para uma demanda de material a ser removido das cavas para liberação das frentes de minério. Variações significativas no valor da densidade, assumidas durante a fase de projeto, poderão requerer o estudo de áreas adicionais de disposição de estéril, aumentando ainda mais o custo de operação da mina, sem contar que grandes alterações poderão repercutir também na estabilidade geotécnica da pilha. A metodologia proposta é bem simples e poderá ser incluída nas rotinas operacionais das minas. Esse procedimento poderá ainda ajudar na avaliação da eficiência do grau de compactação médio da pilha, feito sem controle e restrito à passagem de equipamentos durante o processo de construção. Basicamente, a determinação da densidade natural do estéril das pilhas foi calculada a partir do

somatório do peso dos caminhões carregados de estéril, dividido pelos volumes calculados nas superfícies topográficas referentes a cada período de tempo de evolução da pilha. Os resultados obtidos mostram um aumento significativo da densidade com a profundidade devido principalmente à redução do índice de vazios dos materiais em função do aumento do carregamento. Ao final do trabalho são discutidas também as principais fontes de erro na metodologia aplicada, bem como a importância do conhecimento desse parâmetro na avaliação da segurança da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Pilha de Estéril, Densidade Natural, Estabilidade.

1 INTRODUÇÃO

As pilhas de estéril são dimensionadas volumetricamente, a partir da base topográfica da área a ser implantada. Este estéril virá da escavação das frentes de lavra na condição de material fragmentado. Porém, antes da escavação, tal material apresenta uma condição *in situ* de suas propriedades físicas variável em função do tipo de formação geológica a saber: densidade, teor de umidade, granulometria, coesão etc. E a partir deste contexto, as equipes de planejamento da mina realizam os planos de lavra do estéril de acordo com a necessidade de evolução da lavra do minério.

Para cada litologia de estéril existente nas frentes de lavra são conduzidos ensaios para reconhecimento dos parâmetros físicos, inclusive, a densidade que, multiplicada pelo volume previsto no plano de lavra é possível obter, com elevado grau de precisão, a massa de estéril a ser movimentada.

Entretanto, esse material ao ser escavado e carregado pelos caminhões sofre um aumento do índice de vazios e consequentemente de seu volume. Esse processo de expansão volumétrica é chamado de empolamento.

Ao ser depositado na pilha, geralmente na condição de umidade natural de onde foi removido, o estéril é compactado (vazios reduzidos) apenas pela ação do tráfego de equipamentos sobre as camadas dispostas. Segundo Nunes (2014), a ação destes equipamentos sobre a camada de estéril provoca um incremento na densidade próxima apenas da superfície do material lançado.

Considerando os valores de empolamento encontrados na bibliografia, é possível estimar uma expectativa de valores mínimos e máximos em que a densidade do estéril poderá atingir nas

pilhas de estéril caso seja conhecido a densidade *in situ* dos materiais removidos nas frentes de lavra.

Alternativamente, ensaios de campo e laboratório são também aplicados para determinação dos valores de densidade da própria pilha de estéril, a exemplo da extração de blocos indeformados para determinação das densidades aparentes em laboratório; da realização de ensaios de frasco de areia; de medições empregando densímetro nuclear ou até mesmo a escavação de pequenos poços *in loco* para preenchimento com água conforme normatizado pela ASTM D 5030-04.

Entretanto, os métodos aqui citados limitam-se às pilhas formadas por solos homogêneos. Qualquer alteração nas massas específicas dos materiais lançados implicará em resultados dispersos e pouco representativos.

Além disso, o próprio tamanho das amostras coletadas para realização de ensaios de laboratório, ou nos próprios testes de campo, associado aos locais e profundidades de coleta, tornam ainda mais questionáveis os valores obtidos da densidade do estéril.

O próprio método de disposição também pode afetar no valor da densidade conforme observado por Phelps (1983). Segundo esse autor, em algumas pilhas de material rochoso há uma redução generalizada da densidade do material estéril em razão do aumento da profundidade decorrente da deposição de blocos maiores na base (lançamento por ponta de aterro), formando grandes lacunas e vazios entre os blocos.

Diante de todas essas dificuldades e restrições citadas nos métodos de campo e laboratório mais conhecidos, este artigo propõe uma alternativa simples e eficiente para determinação da densidade do estéril disposto

em pilhas conforme descrito a seguir.

2 METODOLOGIA E RESULTADOS OBTIDOS

A partir da relação entre a massa e seu volume é possível determinar diretamente o valor da massa específica natural do material disposto nas pilhas de estéril.

Os métodos convencionais utilizados para medição da massa específica natural nos aterros artificiais tem sido também aplicados nas pilhas de estéril. Mesmo sendo normatizados, a aplicação destes testes no ambiente de uma pilha formada por materiais heterogêneos e com grau de compactação distintos e sem nenhum controle, torna-se questionável e, na maioria das vezes, pouco representativa.

A alternativa sugerida neste artigo é aplicada em quatro pilhas localizadas nos estados de Minas Gerais e Goiás visando à determinação da densidade natural do estéril calculada a partir da razão entre o somatório da massa dos caminhões carregados de estéril e a diferença entre os volumes obtidos nas superfícies topográficas referentes a cada período de tempo de evolução da pilha.

Esse método, além de muito simples, é facilmente aplicável para grande parte das mineradoras que controlam as massas de estéril removidas nas frentes de lavra e o avanço dos volumes de ocupação das pilhas.

Para fins de identificação, nesse artigo as pilhas foram chamadas de PDE 01, 02, 03 e PDE 04, respectivamente.

O primeiro cálculo do valor da massa específica natural foi feito para uma pilha de estéril iniciada no ano de 1980 e ainda em operação, aqui denominada PDE 01. Apenas para fins de referência neste artigo, o termo massa específica natural será representado pelo termo densidade.

Os dados utilizados abrangem os anos de 2012 a 2015, nos quais se formou um depósito com 180 metros de altura. Esta pilha foi formada sobre um vale e ombreiras bem definidas. Cerca de 82% do estéril da pilha avaliada é composta por xisto decomposto com densidade *in situ* de 1,97 t/m³, sendo também

lançados quartzitos (8,0%), itabiritos (5,4%), xisto compacto (4,4%) e outros materiais pouco representativos. Os volumes lançados e as massas de estéril movimentadas ao longo do período de apuração foram de 40,81 Mm³ e 90,57 Mt, respectivamente. Dividindo-se a massa pelo volume total obteve-se uma densidade média de 2,22 t/m³.

Embora esse valor seja bem mais alto do que se esperaria para uma pilha de estéril formada com predominância de material alterado (82%), o efeito das compactações durante o tráfego de equipamentos e, principalmente, a altura da pilha podem ter contribuído com a redução do índice de vazios do estéril. Por outro lado, poderão ter havido erros de apropriação durante a indicação dos locais em que os caminhões deveriam lançar o estéril associado ainda, à precisão do levantamento topográfico.

A evolução das densidades calculadas para o estéril a partir da razão entre as massas e volumes acumulados no período de apuração são apresentados no gráfico da Figura 1.

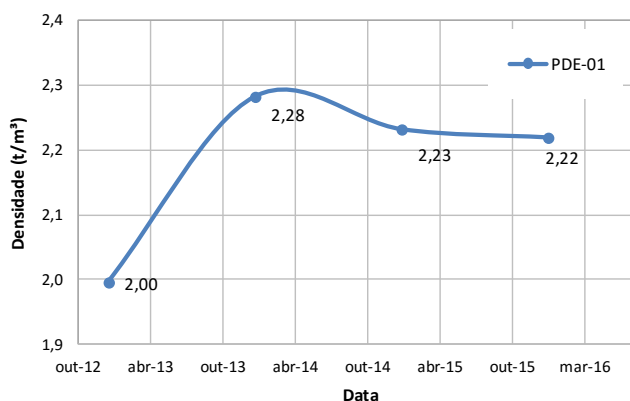


Figura 1. Evolução das densidades calculadas para o estéril da PDE 01 durante o período de apuração.

A variação da primeira leitura plotada no gráfico da figura 1 em relação às demais se deve, possivelmente, a influência dos eventuais erros gerados na etapa inicial de apuração, sendo diluídos posteriormente nas demais medições.

As PDE 02 e PDE 03 são duas pilhas de estéril com predominância de 90% de blocos de calcedônia que são formados pela alteração intempérica de dunitos com alta concentração de quartzo. O restante do material lançado nessas pilhas, constituem solos residuais gabbro e lateríticos.

A calcedônia do local é porosa e portanto possui uma densidade seca de 1,8 t/m³. Esse valor é muito baixo se comparado às densidades de outras rochas que possuem grande porcentagem de quartzo em sua matriz.

O período de apuração para estimativa das densidades compreendeu o período de 2012 e 2015.

A PDE 02 está sendo formada dentro do fundo de uma cava exaurida apresentando uma altura máxima de 40 metros.

A PDE 03 está sendo formada em uma topografia pouco acidentada, que permite subir os bancos da pilha em uma configuração similar a um “bolo de noiva”. A altura máxima dessa pilha é de 45 metros.

Os volumes e massas acumulados foram de 2,43 Mm³ e 4,23 Mt e 4,61 Mm³ e 8,87 Mt, para as pilhas PDE 02 e PDE 03, respectivamente. E a partir desses valores, calcularam-se os valores das densidades médias de 1,74 t/m³(PDE 02) e 1,92 t/m³ (PDE 03 – Figura 2).

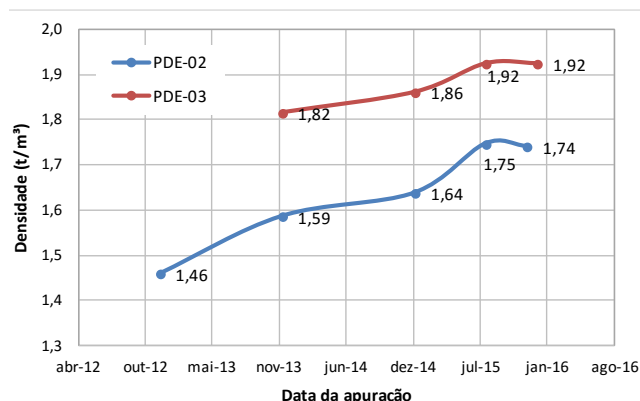


Figura 2. Evolução das densidades calculadas para o estéril das pilhas PDE 02 e PDE 03 durante o período de apuração.

Nota-se no gráfico da figura 2 um aumento crescente dos valores de densidade. Esse aumento provavelmente está associado ao aumento da altura das pilhas (sobrecarga) e a diluição de eventuais erros no método de cálculo das densidades (por exemplo, a incorreta apropriação de caminhões e/ou do próprio levantamento topográfico).

Além disso, era de se esperar que os valores de densidade apurados fossem os mesmos ou bem próximos já que ambas pilhas recebem os mesmos tipos de material. Entretanto, os volumes depositados são bem distintos, sendo

que a PDE-03 recebeu praticamente o dobro de material em relação a PDE-02.

Os autores acreditam que, isoladamente, esse fato não justificaria tais diferenças, da ordem de 10%, nos valores de densidade calculados ao final do período de apuração. Possivelmente, há outros fatores em ação, mas que os autores não conseguiram definir em razão do acesso limitado aos dados topográficos e à quantificação da movimentação dos caminhões.

A PDE 04 é uma pilha de estéril recente e ainda em operação que recebe solos residuais de gnaiss e xisto e uma pequena quantidade de blocos de rocha sã, considerada desprezível no montante do volume depositado.

O período de apuração compreendeu todo o ano de 2015. O local de formação dessa pilha envolve o preenchimento de vários talwegues pouco encaixados, não sendo possível definir uma única altura média representativa para os taludes já formados pela pilha.

Atualmente, a disposição encontra-se dispersa e avançando, ora nas regiões mais próximas das frentes de lavra, ora sobre os talwegues em que os drenos de fundo já foram implantados.

O volume e a massa acumulados para a PDE-04 foi de 7,46 Mm³ e 14,76 Mt respectivamente, obtendo uma densidade média de 1,98 t/m³.

A figura 3 apresenta a evolução das densidades calculadas para o estéril da PDE 04 a partir da razão entre as massas e volumes acumulados durante o período de apuração.

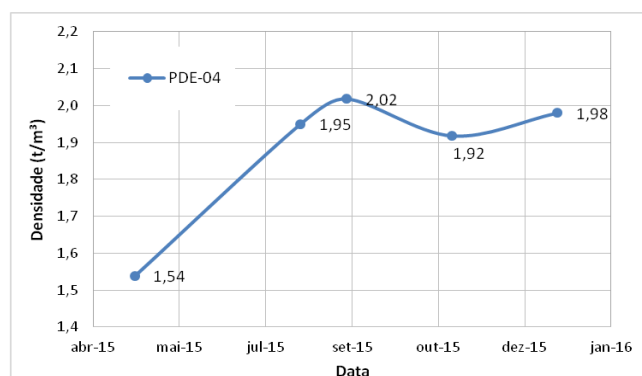


Figura 3. Evolução das densidades calculadas para o estéril da pilha PDE 04 durante o período de apuração.

Também se observa uma ascensão crescente dos valores de densidade calculados, atribuídos,

neste caso, à diluição do erro durante o período de medição de contagem de caminhões ou topográfica.

O valor médio obtido também ficou bem acima dos valores medidos em laboratório para os solos que deram origem ao estéril ($1,7 \text{ t/m}^3$).

Em todos os resultados apurados para as quatro pilhas de estéril, observou-se que o primeiro valor calculado apresentou-se muito abaixo dos demais. Acredita-se que tal ocorrência pode ser atribuída a algum erro durante o período de contagem de caminhões ou associado ao próprio levantamento topográfico.

Neste caso, a fonte de erro pode estar associada principalmente às alterações realizadas na própria superfície do terreno natural ou da própria pilha de estéril durante o período de apuração. Por exemplo, é comum haver escavações temporárias a fim de criar bacias para contenção de sedimentos, acessos, canais temporários *etc* dentro dos limites em que as superfícies topográficas estão sendo comparadas.

Além disso, as variações associadas à precisão dos equipamentos topográficos utilizados também corroboram a fonte de erros, porém em menor escala, já que em geral se utilizam equipamentos modernos e com precisão milimétrica para realizar este tipo de serviço.

Não há como deixar de mencionar eventuais erros de indicação dos locais em que os caminhões lançaram o material estéril, lembrando que esse tipo de problema somente é possível para minas com duas ou mais pilhas de estéril em operação simultânea. No caso de erros atribuídos à própria pesagem dos caminhões, é de se esperar que este problema ocorra eventualmente já que há um grande interesse por parte das equipes envolvidas (operação da mina e empresas subcontratadas para efetuar o transporte) em apurar os valores corretamente.

3 INFLUÊNCIA DA DENSIDADE NA ESTABILIDADE GEOTÉCNICA DAS PILHAS

Foram conduzidas análises de estabilidade

hipotéticas para avaliar a influência da variação dos valores dos pesos específicos nas pilhas de estéril.

Dois cenários típicos foram assumidos: (i) o primeiro cenário para uma pilha com talude de 50 metros de altura e ângulo global de 20° e (ii) o segundo cenário para uma pilha de 300 metros de altura com o mesmo ângulo global de 20° .

Em ambos cenários foi variada a condição de saturação: seca (ábaco 1) e parcialmente saturada (ábaco 2) conforme os modelos de saturação proposto por Duncan C. W. and Christopher (2004) para análises de rupturas circulares.

As análises de estabilidade foram calculadas utilizando o programa comercial Slide em sua versão 6.0 (Rocscience, 2001) para cálculo dos fatores de segurança (FS) para superfícies de ruptura circulares utilizando o método de Bishop Simplificado.

Nessas análises de estabilidade assumiu-se que a superfície de ruptura está restrita ao material estéril com parâmetros de resistência também estimados em 8 kPa de coesão e 28° de ângulo de atrito. A figura 4 apresenta a seção típica igual a 50 metros de altura para a condição de saturação referente ao ábaco 2.

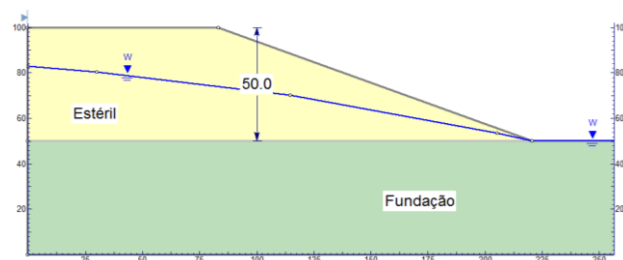


Figura 4. Seção típica utilizada para avaliação da influência da variação do valor do peso específico no valor do fator de segurança calculado nas análises de estabilidade (nível d'água referente ao ábaco 2 disponível em Duncan C. W. and Christopher, 2004).

Os resultados obtidos para as análises de estabilidade para as pilhas hipotéticas de 50 e 300 metros de altura quando os taludes encontram-se secos (nível freático sem atuação na superfície de ruptura crítica), mostraram que a variação do peso específico praticamente não influencia os fatores de segurança em ambos os casos (figura 5). Além disso, nota-se nos resultados obtidos que, quanto menor o

valor do peso específico mais alto serão os fatores de segurança obtidos.

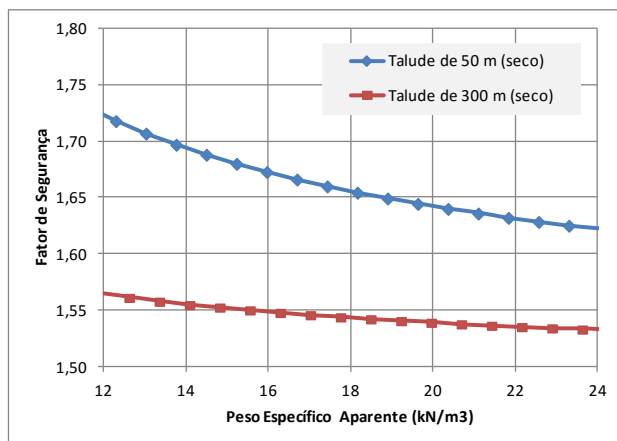


Figura 5. Gráfico dos valores dos fatores de segurança e pesos específicos aparentes obtidos nas análises de estabilidade para condição seca em taludes de 50 e 300 metros de altura.

Entretanto, para as simulações em que foi introduzida a condição parcial de saturação, os resultados mostraram-se opostos: com um decréscimo de FS e com a diminuição do valor do peso específico (figura 6).

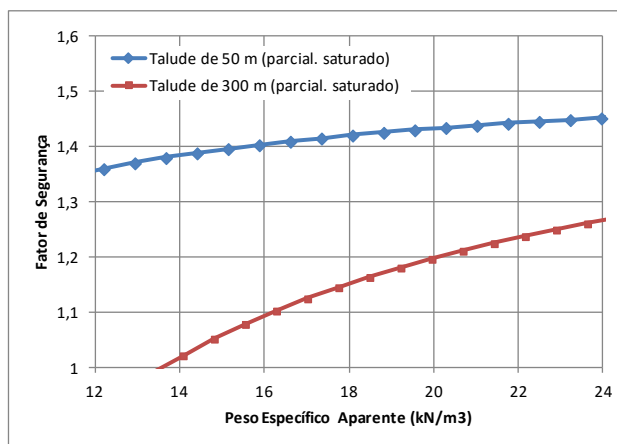


Figura 6. Gráfico dos valores dos fatores de segurança e pesos específicos aparentes obtidos nas análises de estabilidade para condição parcialmente saturada (ábaco 2) em taludes de 50 e 300 metros de altura.

Neste caso, a influência da água foi preponderante na redução valor da tensão normal efetiva. As superfícies críticas de ruptura apresentavam menor abrangência (mais rasas) para os valores de peso específico aparente maiores e consequentemente maiores FS. E na medida em que o peso específico foi sendo reduzido, a superfície de ruptura aumentava em profundidade, diminuindo assim,

os valores de FS.

A figura 7 apresenta o resultado de duas análises de estabilidade para condição parcialmente saturada, em um talude de 50 metros de altura para o peso específico de 14 kN/m³ (figura 7a) e peso específico de 22 kN/m³ (figura 7b), respectivamente.

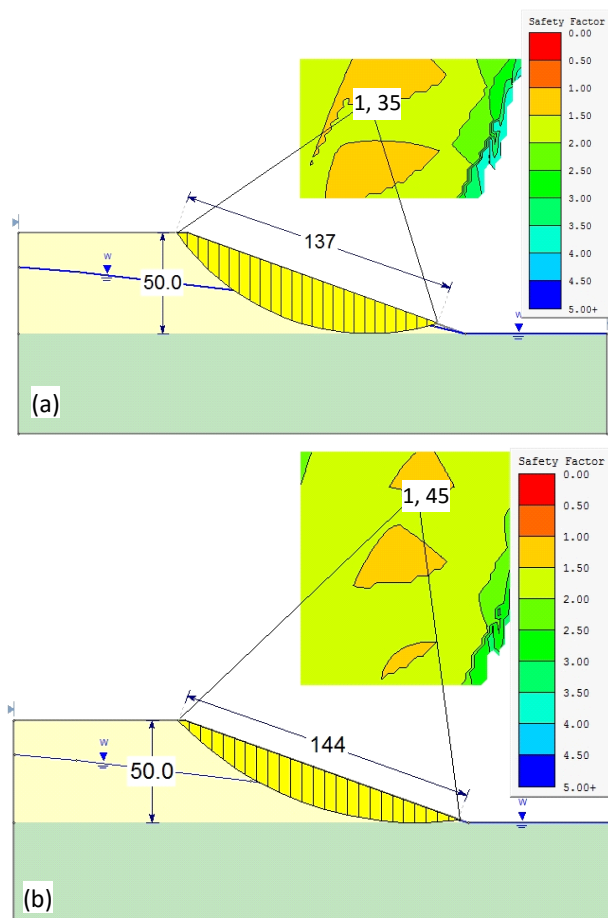


Figura 7. Resultado das análises de estabilidade para condição parcialmente saturada em talude de 50 metros de altura. (a) Peso específico de 14 kN/m³; (b) Peso específico de 22 kN/m³.

4 CONCLUSÕES

O processo para a determinação da densidade natural do estéril em quatro pilhas de estéril (PDEs 01, 02, 03 e 04) em estágio de construção, mostrou-se adequado e possível de ser aplicado por qualquer mineradora que possua controle das massas de estéril removidas nas frentes de lavra e acompanhamento topográfico dos volumes de ocupação de estéril nas pilhas.

Embora alguns erros poderão inicialmente

resultar em valores destoantes, estes tendem a ser diluídos ao longo do tempo de construção, principalmente porque há uma movimentação de volumes e massas de material estéril em período de tempo relativamente pequenos.

No referido trabalho, citam-se erros associados com a contagem de caminhões, pesagem, indicação dos locais em que o material foi disposto (caso existam várias pilhas em operação), escavações realizadas dentro da área da pilha que eventualmente não são contabilizadas nas bases topográficas analisadas, bem como o próprio levantamento topográfico associado ao erro das interpolações. Tais erros poderão ser minimizados caso este processo seja incorporado nas rotinas operacionais da própria mina.

Os resultados obtidos mostraram um aumento da densidade ao longo das etapas de crescimento das pilhas. Infere-se que esse aumento está associado à redução do índice de vazios das pilhas gerado pelo aumento da tensão vertical promovida pelo acréscimo de estéril, ou até mesmo, pela diluição dos erros de levantamento de dados.

Para as PDE 01 e PDE 04, os valores estimados para as densidades são altos e acima dos valores esperados para pilhas de estéril com predominância de solo. Para o caso das PDE 02 e PDE 03, os valores são, em princípio, coerentes, apesar do trabalho ter sido feito utilizando a base de dados existente na mina.

Pode-se dizer que três fatores são predominantes e têm influência direta no valor da densidade natural do estéril disposto sem controle de compactação: o conhecimento das propriedades físicas do material de origem (por exemplo, massa específica dos grãos); a altura e a idade das pilhas. Em razão desses fatores, o valor da densidade do estéril será uma propriedade individual e específica de cada pilha, podendo eventualmente ser até utilizado como referência interna na própria mina, caso as propriedades dos materiais e formas de disposição sejam os mesmos.

Não há de fato como dizer que os valores de densidade apurados nas quatro pilhas de estéril sejam fidedignos já que a metodologia foi aplicada a partir da base de dados existentes nas mineradoras que ainda não realizam este

controle com esse objetivo. Entretanto, com a aplicação do processo proposto, associado a verificações contínuas, principalmente na contagem dos caminhões, massas e levantamentos topográficos, a segurança e a confiabilidade dos resultados ficará atribuída apenas ao erro da interpolação entre as superfícies topográficas.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2006). NBR 13029. Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASTM International. D 5030-04, Standard Test Methods for Density of Soil and Rock in Place by the Water Replacement Method in a Test Pit, West Conshohocken, PA.
- Duncan C. W. And Christopher W. M. (2004). *Rock slope engineering, civil and mining*. Based on the third edition by E. Hoek and J. Bray. 4th ed. London: Spon Press, Taylor & Francis Group.
- Nunes, D. R. (2014) - *Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia*. Tese de Mestrado em lavra de Minas. Escola de Minas de Ouro Preto – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Phelps, L.B. *Characterization of mine spoil properties as tool for premining planning*. (1983). Proceedings of the Symposium on Surface Mining Hydrology, Sedimentology and Reclamation, Lexington, KY, 1983, p. 47-51.
- Rocscience. (2010). Slide Version 6.0: 2D limit equilibrium slope stability analysis. Toronto: Rocscience, 2010. 85 p.