

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/541

## Estudo de Caso de Aterro Experimental de Estéril de Mineração em Mariana/MG

Rodrigo Inocêncio Vasconcelos

Engenheiro, Faculdade Arnaldo, Belo Horizonte, Brasil, rodrigo\_inovas@yahoo.com.br

Marcio Fernandes Leão

Geólogo-Geotécnico, Tractebel/UFV, Belo Horizonte, Brasil, marciotriton@hotmail.com

**RESUMO:** A implantação de estruturas geotécnicas sobre depósitos de estéréis de mineração constitui uma prática corriqueira em empreendimentos de mineração, particularmente no caso de construção de uma pilha ou realizar um reforço em uma barragem. Neste sentido, torna-se mandatório o estudo do comportamento geotécnico dos estéréis como material de construção e de fundação de tais estruturas, com ênfase na magnitude dos parâmetros de resistência, deformabilidade e permeabilidade. O objetivo do artigo foi apresentar a metodologia e resultados de execução do aterro experimental considerando o material de estéril de mineração para servir de base para a construção de uma pilha de estéril ou reforço de uma barragem. A metodologia contemplou: a seleção de equipamentos e procedimentos operacionais, seleção dos materiais para compor o aterro experimental, definição da geometria, realizado o tratamento da fundação, o manejo do estéril, elencadas as variáveis envolvidas bem como o planejamento construtivo, executada a instrumentação, bem como a execução de ensaios de laboratório e in situ, além de critérios de controle. Os resultados indicaram que o material é predominantemente não plástico e que o grau de compactação das camadas lançadas de 30 cm, 40 cm, 50 cm e 60 cm realizadas por dois tipos de equipamentos como o pé de carneiro e trator de esteira ficaram na faixa de 90% a 95%. Desta forma foi possível avaliar sobre os principais requisitos necessários para a avaliação do aterro experimental que devem ser considerados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aterro experimental. Estéril. Implantação. Ensaios.

**ABSTRACT:** The implementation of geotechnical structures on mining waste deposits is a common practice in mining projects, particularly in the case of building a pile or reinforcing a dam. In this sense, it is mandatory to study the geotechnical behavior of waste rock as a construction and foundation material for such structures, with emphasis on the magnitude of the resistance, deformability and permeability parameters. The objective of the article was to present the methodology and results of carrying out the experimental landfill considering mining waste material to serve as a basis for the construction of a waste rock pile or reinforcement of a dam. The methodology included: selection of equipment and operational procedures, selection of materials to compose the experimental landfill, definition of the geometry, treatment of the foundation, waste management, listing the variables involved as well as construction planning, execution of instrumentation, as well as the execution of laboratory and in situ tests, in addition to control criteria. The results indicated that the material is predominantly non-plastic and that the degree of compaction of the layers laid at 30 cm, 40 cm, 50 cm and 60 cm carried out by two types of equipment such as the sheep's foot and the crawler tractor were in the range of 90% to 95%. In this way, it was possible to evaluate the main requirements necessary for the evaluation of the experimental landfill that must be considered.

**KEYWORDS:** Experimental landfill, Tests, Waste, Monitoring.

### 1 INTRODUÇÃO

A construção de pilhas de estéril, rejeito ou mistas (com ambos os materiais) cada dia desafiam mais os limites do conhecimento da Engenharia, frente às necessidades volumétricas para essas estruturas que juntamente com a restrição de áreas, faz com que alturas superem 100 m. Estas estruturas, além de garantir os objetivos econômicos essas estruturas devem ser estáveis. Dada a grande variabilidade dos materiais que podem ser dispostos, a compreensão prévia desses comportamentos é fundamental.

A exemplo dessas considerações podem ser mencionadas abordagens distintas visando a construtibilidade para distintos materiais. Solos saprolíticos e residuais jovens podem ser provenientes das frentes de lavras ou de outras origens devendo ser considerada a dificuldade em se trabalhar com este tipo de material desde a preparação de amostras até a realização de ensaios. Isso porque o material é destorroado e este procedimento faz com que ocorra a “descharacterização” do mesmo à condição de utilização na obra. Dessa forma, os resultados obtidos nos ensaios em laboratório podem não coincidir com as características do solo em campo. Outra dificuldade que ocorre durante os estudos de controle de laboratório é que geralmente o diâmetro de boa parte do material é superior ao previsto para os equipamentos convencionais de laboratório. Quando esses materiais são provenientes de outras pilhas de estéril (PDE) os solos são notoriamente heterogêneos, pois a aleatoriedade com que esses materiais foram e são dispostos acarretam na dispersão quantitativa dos valores de parâmetros geotécnicos. Definir de forma consistente esses parâmetros torna-se uma tarefa um tanto dispendiosa em todos os seus aspectos e de extremo desafio seu controle tecnológico. Por fim, existe a trabalhabilidade dos solos. Nos aterros experimentais a trabalhabilidade dos solos deve ser motivo de grande atenção e preocupação, principalmente quanto aos solos saprolíticos, tanto aqueles que são provenientes das frentes de lavra quanto àqueles oriundos das PDE's. Tempos e tipos de equipamentos utilizados nas operações de “homogeneização” podem ser elevados e bem solicitados, respectivamente.

Os aterros experimentais são de extrema importância para obras com áreas de empréstimos constituídas de solos heterogêneos visando a compreensão do seu comportamento geotécnico. São fundamentais, pois analisam até que ponto a modificação nos parâmetros envolvidos no problema (grau de compactação, teor de umidade, massa específica seca, por exemplo) têm certa influência nas características finais das estruturas geotécnicas. Da mesma maneira, definem quais os equipamentos devem ser utilizados durante a obra e quais seriam os parâmetros mais adequados para que a estrutura seja, geotecnicamente, segura e estável.

Desta forma, o objetivo deste artigo é apresentar a metodologia construtiva envolvida nessas estruturas bem como o resumo dos ensaios de controle tecnológico de estudos utilizados para compreensão do comportamento dos estéreis que foram estudados, visando a sua utilização como material de construção para a construção de pilhas e reforço de barragens. Além disso, o artigo buscou contribuir com a definição operacional dos equipamentos de terraplenagem e sua produtividade, a avaliação dos parâmetros geotécnicos que governam a estabilidade da estrutura e a trabalhabilidade dos materiais estudados de forma a definir o “*modus operandi*” dos serviços de terraplenagem.

## 2 METODOLOGIA

Os aterros experimentais foram confeccionados com solos provenientes de várias áreas de empréstimo, lançados, espalhados e compactados mecanicamente, utilizando equipamentos convencionais de terraplenagem, na região de Mariana (MG). Para cada camada do aterro foram verificados: teor de umidade (h%) conforme a faixa de umidade especificada, por meio do ensaio “*Speedy*” ou balança higroscópica e, grau de compactação (G.C.) pela verificação da massa específica aparente seca com o ensaio de frasco de areia ou cilindro biselado. Foi indicado que os parâmetros de compactação do solo (GC e h%) fossem verificados pelo método de *Hilf*, buscando ajustar as curvas de compactação obtidas pelo ensaio de compactação de *Proctor* Normal para realizar a verificação desses parâmetros.

### 2.1 Preparação do Aterro Experimental

O aterro experimental foi realizado em duas pistas adjacentes construídas com o estéril na umidade ótima. Cada pista possuía cerca de 4,5 m de largura, sendo testado respectivamente em cada pista equipamentos esteirados e pneumáticos. O aterro contou com 4 camadas de estéril aparente (solto), sendo elas com espessuras de 30, 40, 50 e 60 cm, que foram compactadas com  $\pm 2\%$  do teor de umidade ótimo. Foi avaliada a performance de dois equipamentos, ou seja, o rolo pé-de-carneiro (CA-250) e o Trator de esteira (D6X TL). Essa avaliação baseou-se na determinação: do número de passadas, velocidade e a espessura ideal para se atingir os índices físicos requeridos para na premissa. Foi prática usual e recomendada a realização de um aterro experimental, composto por no mínimo duas pistas (uma para equipamentos pneumáticos e outra para equipamentos esteirados) de modo a permitir a avaliação do comportamento das diversas camadas do

aterro sob a ação de diferentes níveis de energia de compactação.

Cada camada de aterro apresentou no topo a largura de 10 m, comprimento de 40 m, taludes laterais com inclinações de 1V:2H e duas rampas de acesso com inclinação de 10%, de maneira que foi possível a entrada e saída de caminhões e equipamentos, sem a necessidade de manobra (Figura 1). As dimensões finais propostas para ele, tendo como referência as camadas lançadas (Figura 1). Ressalta-se que a espessura final foi estimada em no mínimo 1,50 metros (após compactação das camadas), podendo ter alterações de acordo com as características do estéril.

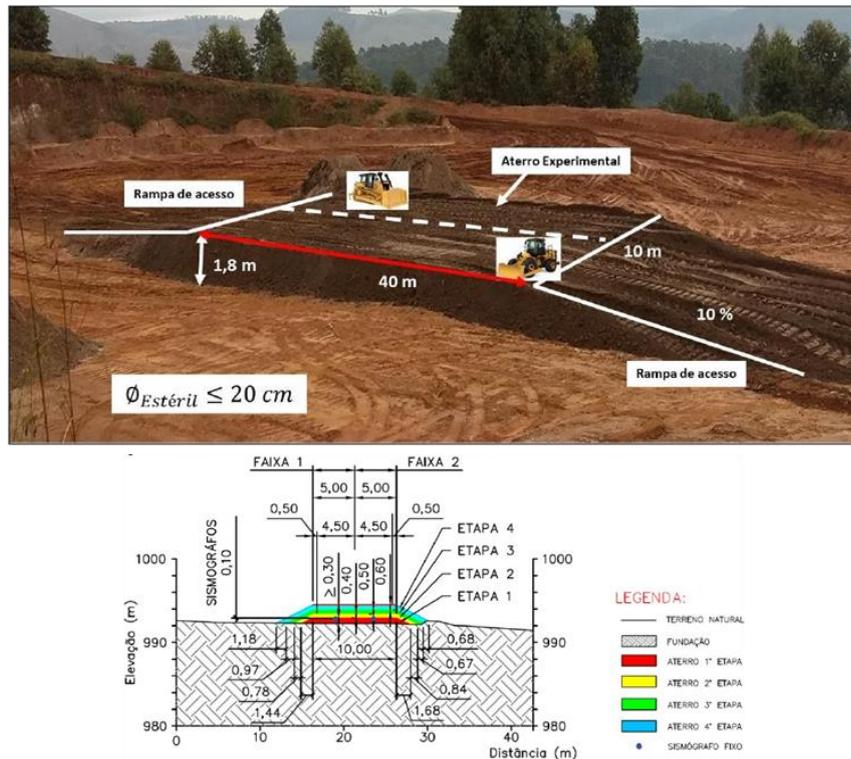


Figura 1. Arranjo esquemático do Aterro Experimental e seção transversal típica.

Antes da construção foi realizada a preparação da fundação. Em toda a área onde o aterro experimental foi executado foi necessária a remoção da vegetação existente (raízes), solos inconsolidados, matacões etc., juntamente com a regularização da superfície. Nas operações de destocamento (remoção de raízes), raspagem da vegetação rasteira e limpeza do terreno, foi empregado trator de esteiras com lâmina. O destocamento incluiu a remoção, transporte e “enleiramento” de todos os tocos e raízes abaixo do nível do solo.

Os principais recursos utilizados à execução e acompanhamento do aterro experimental de material de estéril foram: caminhão pipa (capacidade  $\geq 10.000$  litros); motonivelador tipo CAT12H (ou similar), rolo compactador CA250 (Dynapac) sem vibração, liso para solos com finos inferior a 35% (granulares) e rolo compactador, sem vibração, pé-de-carneiro para solos com finos acima de 35% (solos silto-argilosos); trator de esteira com lâmina frontal tipo CAT D6N (ou similar); trator de pneus com lâmina frontal tipo: CAT 814 ou trator agrícola valmet 1780 ou pá carregadeira de pneus; caminhão basculante trucado ou traçado com capacidade mínima de 25 ton; área de estocagem; laboratório de campo: para ensaios de Proctor Normal, Densidade/Umidade, Granulometria completa, Limites de Consistência (Atterberg), Densidade dos Grãos, índice de vazios máximo e mínimo e umidade de estufa; e equipe técnica.

## 2.2 Manejo do Estéril

O estéril utilizado está nas imediações do aterro experimental e foi transportado por caminhão até o local. Logo que o material foi descarregado na área prevista, foi realizada a coleta de cerca de ~70 kg para ensaios de caracterização em laboratório. Considerou-se 2.600 m<sup>3</sup> de estéril empolado para a execução de cada aterro. Destaca-se que os diâmetros máximos permitidos para o aterro foram da ordem de 20 cm, cerca de 2/3 da espessura da camada esperada. Para a construção do aterro experimental, o estéril foi utilizado na

umidade ótima com variação máxima aceitável de 2% da própria umidade ótima. Caso o estéril estivesse com umidade distinta da prevista para execução da pista, esse foi trabalhado e secado/umedecido até atingir a umidade referente à da pista em execução, antes de sua compactação. Preferencialmente, os materiais tiveram suas umidades de lançamento corrigidas na própria região de empréstimo.

### 2.3 Planejamento da Execução

O aterro experimental foi construído em um espaço nivelado com área mínima aproximada de 1.260 m<sup>2</sup> adequada para a implantação. Para o local de espera e estocagem dos materiais foi prevista uma área de aproximadamente 40 m x 60 m. A região de implantação escolhida foi de fácil acesso aos equipamentos e a segurança do tráfego de equipamentos e pessoal.

### 2.4 Variáveis Analisadas

O aterro experimental foi executado a fim de estabelecer a viabilidade, os métodos e os equipamentos mais convenientes, para organizar as operações e garantir a melhor trabalhabilidade dos materiais, de acordo com suas características. As principais variáveis que foram analisadas e controladas na execução do aterro foram:

- Umidade do solo ( $\omega\%$ ): conhecido o teor de umidade ótima do estéril em referência, obtido dos ensaios de Compactação Proctor Normal;
- G.C.: o método de Hilf foi usado para avaliar o controle de compactação por meio dos parâmetros G.C. e  $\omega\%$ ;
- Tipos de equipamento de compactação: Feita as eficiências dos equipamentos compactadores, de forma a compatibilizá-los com o projeto da pilha de estéril a ser implantada ou obra de reforço de barragem;
- Espessura das camadas soltas: foram testadas as seguintes espessuras de camadas soltas: 30, 40, 50 e 60 cm;
- Número de passadas: esta foi uma variável importante a ser determinada, posto que está relacionada com os prazos da compactação e o tipo de equipamento a ser utilizado na construção da pilha ou reforço de uma barragem. Para o aterro experimental foram avaliados os graus de compactação do estéril, para 4, 6 e 8 passadas. Eventualmente foram testadas passadas superiores a 8.;
- Velocidades dos equipamentos: buscou-se avaliar o comportamento das vibrações, em profundidade e superfície, através dos equipamentos compactadores durante a execução. Para o trator de esteira tipo D6T foram avaliadas as velocidades de 3,8, 6,6 e 11,4 km/h. Para o rolo CA250, podem ser testadas as velocidades de 3,5, 5,0 e 7,0 km/h.;
- Comportamento geotécnico dos materiais: foram executados ensaios de caracterização completa, Limites de Atterberg, grau de compactação e permeabilidade para os materiais lançados.
- G.C. resultante: a determinação do G.C. resultante de 4, 6 e 8 passadas dos equipamentos compactadores visou estabelecer as premissas de projeto, com atenção ao eventual gradiente de compactação ao longo de cada camada compactada; e
- Vibrações no maciço: Foram registradas as vibrações geradas no aterro experimental decorrentes do tráfego de veículos de terraplenagem e eventual abalo sísmico natural regional por meio de geofones.

### 2.5 Instrumentação

Os estudos de vibrações consistiram na medida do movimento, descritos em termos da Aceleração/Velocidade/Deslocamento de Pico da Partícula (respectivamente PGA, PGV, PGD, ou soma vetorial PVS), observadas em um dado ponto do espaço num certo intervalo de tempo. Para o referido estudo foi monitorado apenas a PGA, através de sismógrafos de engenharia.

No geral, as vibrações sísmicas, caracterizadas como fontes móveis/não estacionárias, foram monitoradas para controle das atividades de construção de pilhas de estêreis ou reforço de uma barragem. Esse monitoramento buscou garantir o diagnóstico e indicar as ações para contenção e/ou correção das condições e/ou efeitos gerados pelas vibrações induzidas, que estavam relacionadas com as atividades de

compactação, bem como com a estabilidade do solo, e podendo impulsionar os efeitos dessas vibrações na construção da pilha ou reforço de barragem.

## 2.6 Sismógrafos

Os estudos de vibração consistiram na medida do movimento do solo, descritos em termos da Aceleração/Velocidade/Deslocamento de Pico da Partícula (respectivamente, PPA “*Peak Particle Acceleration*”, PPV “*Peak Particle Velocity*” e PPD “*Peak Particle Displacement*”) ou soma vetorial (PVS “*Peak Vector Sum*”), observadas em um dado ponto do espaço num certo intervalo de tempo.

A análise e as medidas de vibração são essenciais para o gerenciamento de problemas de vibração (SVINKIN, 2004). Diversas atividades geram vibrações, causadas pela passagem das ondas por aquele meio. Dentre as ondas que viajam por esse meio, as principais foram das ondas de corpo P e S e as ondas Rayleigh (AMICK e GENDREAU, 2000). Portanto, a fim de se obter um monitoramento eficiente das atividades operacionais, com o entendimento das vibrações que foram geradas por essas atividades e como essas ondas se propagam, tal qual suas respectivas amplitudes, se faz necessário o acompanhamento das vibrações.

Para o caso do aterro experimental, foi prevista a instalação de 3 sismógrafos móveis em superfície e 3 sismógrafos fixos, abaixo do aterro. Esses sensores ficaram dispostos alinhados entre si, entre as pistas de tráfego de equipamentos. Buscou-se avaliar não apenas o comportamento das ondas em superfície, mas também quais variações serão ocasionadas pela compactação do material e aumento da profundidade, uma vez que o aterro terá sua altura aumentada. De maneira geral, os estudos foram conduzidos com a instalação de geofones em superfície. No caso do aterro, o arranjo contou com sensores instalados em profundidade, o que permitiu o estudo do comportamento e efeito da profundidade na atenuação, tendo em vista que o meio é heterogêneo e anisotrópico.

Segundo Caixeta (2018), a proposição metodológica envolve o ajuste de curvas de atenuação de vibração superficial na direção do rejeito, com base nas leituras de todos os sensores e no controle de horário de atividades de execução da obra. Na mesma proposição, também foi a análise do comportamento das vibrações, em termos de amplitude e frequência, em função da variação de espessura do aterro, com base nas leituras dos sensores de profundidade e no avanço da construção do aterro.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de caracterização (Figura 2) do aterro experimental realizados nos materiais indicaram NP (Não Plásticos), heterogêneos, granulometria média de: 26% de pedregulho, baixa presença de argila, com média de 29% de Silte e 33,9% de areias. A massa específica mínima foi de 2,145 g/cm<sup>3</sup>, densidade real dos grãos média de 3,138 g/cm<sup>3</sup>, umidade ótima na média das 4 amostras de 13,6% e permeabilidade média de 1,21 x10<sup>-5</sup> cm/s.

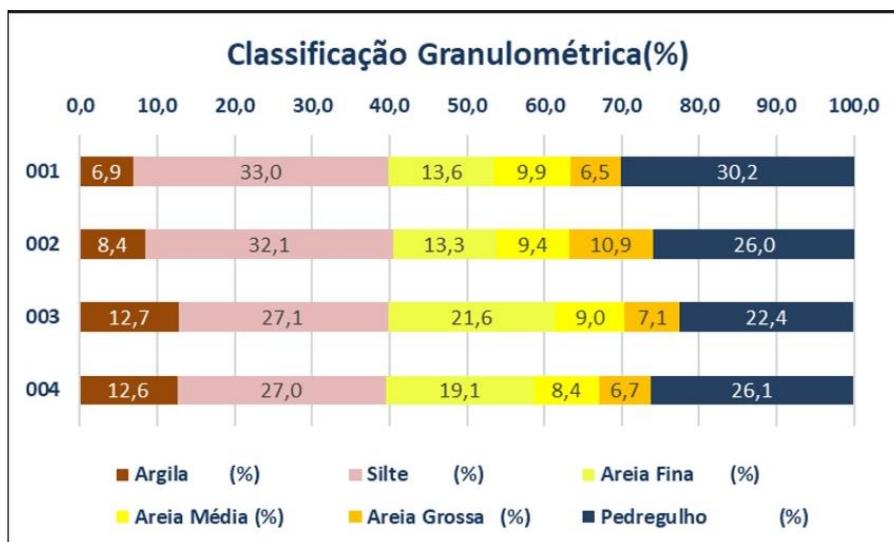


Figura 2. Classificação Granulométrica do Aterro Experimental.

Os Quadros 1 a 5 apresentam os resultados de G.C e massa específica seca para o equipamento Rolo CA 250, nas cinco camadas do aterro. Em vermelho, destaca-se o resultado que não atendeu a expectativa.

Quadro 1 – Estatística da camada por número de passadas – 1ª Camada 30 cm – G.C. resultante.

| Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | Grau de Compactação (%) |       |       |               | Número de Passadas | Quantidade de Ensaios | Massa Específica Seca (g/cm³) |      |       |               |       |      |
|-------------|-----------------------|-------------------------|-------|-------|---------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|------|-------|---------------|-------|------|
|             |                       | Máx.                    | Mín.  | Média | Desvio padrão |                    |                       | Máx.                          | Mín. | Média | Desvio padrão |       |      |
| 4           | Topo                  | 2                       | 98,1  | 97,8  | 98,0          | 0,21               | 4                     | Topo                          | 2    | 2,078 | 2,071         | 2,075 | 0,00 |
|             | Base                  | 2                       | 97,1  | 97,0  | 97,1          | 0,07               |                       | Base                          | 2    | 2,057 | 2,054         | 2,056 | 0,00 |
| 6           | Topo                  | 2                       | 98,9  | 98,0  | 98,5          | 0,64               | 6                     | Topo                          | 2    | 2,095 | 2,076         | 2,085 | 0,01 |
|             | Base                  | 2                       | 97,9  | 96,7  | 97,3          | 0,85               |                       | Base                          | 2    | 2,074 | 2,048         | 2,061 | 0,02 |
| 8           | Topo                  | 2                       | 100,7 | 99,7  | 100,2         | 0,71               | 8                     | Topo                          | 2    | 2,133 | 2,112         | 2,122 | 0,01 |
|             | Base                  | 2                       | 98,8  | 97,4  | 98,1          | 0,99               |                       | Base                          | 2    | 2,093 | 2,063         | 2,078 | 0,02 |

Quadro 2 – Estatística da camada por número de passadas – 2ª Camada 30 cm.

| Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | G.C. (%) |       |       |               | Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | Massa Específica Seca (g/cm³) |      |       |               |       |      |
|-------------|-----------------------|----------|-------|-------|---------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|------|-------|---------------|-------|------|
|             |                       | Máx.     | Mín.  | Média | Desvio padrão |             |                       | Máx.                          | Mín. | Média | Desvio padrão |       |      |
| 4           | Topo                  | 2        | 98,2  | 97,6  | 97,9          | 0,42        | 4                     | Topo                          | 2    | 2,221 | 2,208         | 2,214 | 0,01 |
|             | Base                  | 2        | 96,8  | 94,7  | 95,8          | 1,48        |                       | Base                          | 2    | 2,190 | 2,142         | 2,166 | 0,03 |
| 6           | Topo                  | 2        | 99,8  | 96,3  | 98,1          | 2,47        | 6                     | Topo                          | 2    | 2,257 | 2,178         | 2,218 | 0,06 |
|             | Base                  | 2        | 98,1  | 94,6  | 96,5          | 2,26        |                       | Base                          | 2    | 2,219 | 2,147         | 2,183 | 0,05 |
| 8           | Topo                  | 2        | 99,7  | 99,5  | 99,6          | 0,14        | 8                     | Topo                          | 2    | 2,255 | 2,251         | 2,253 | 0,00 |
|             | Base                  | 2        | 98,7  | 97,1  | 97,9          | 1,13        |                       | Base                          | 2    | 2,233 | 2,196         | 2,214 | 0,03 |
| 10          | Topo                  | 2        | 100,3 | 99,7  | 100,0         | 0,42        | 10                    | Topo                          | 2    | 2,269 | 2,255         | 2,262 | 0,01 |
|             | Base                  | 2        | 98,6  | 98,2  | 98,4          | 0,28        |                       | Base                          | 2    | 2,230 | 2,221         | 2,226 | 0,01 |
| 12          | Topo                  | 2        | 100,4 | 99,8  | 100,1         | 0,42        | 12                    | Topo                          | 2    | 2,271 | 2,257         | 2,264 | 0,01 |
|             | Base                  | 2        | 98,7  | 97,9  | 98,3          | 0,57        |                       | Base                          | 2    | 2,233 | 2,214         | 2,224 | 0,01 |

Quadro 3 – Estatística da camada por número de passadas – 3ª Camada 40 cm.

| Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | G.C. (%) |       |       |               | Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | Massa Específica Seca (g/cm³) |      |       |               |       |      |
|-------------|-----------------------|----------|-------|-------|---------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|------|-------|---------------|-------|------|
|             |                       | Máx.     | Mín.  | Média | Desvio padrão |             |                       | Máx.                          | Mín. | Média | Desvio padrão |       |      |
| 4           | Topo                  | 2        | 95,3  | 94,2  | 94,8          | 0,78        | 4                     | Topo                          | 2    | 2,192 | 2,167         | 2,179 | 0,02 |
|             | Base                  | 2        | 93,0  | 92,7  | 92,8          | 0,21        |                       | Base                          | 2    | 2,139 | 2,132         | 2,136 | 0,00 |
| 6           | Topo                  | 2        | 95,7  | 95,6  | 95,7          | 0,07        | 6                     | Topo                          | 2    | 2,201 | 2,199         | 2,200 | 0,00 |
|             | Base                  | 2        | 94,6  | 94,0  | 94,3          | 0,42        |                       | Base                          | 2    | 2,176 | 2,162         | 2,169 | 0,01 |
| 8           | Topo                  | 2        | 97,3  | 96,8  | 97,1          | 0,35        | 8                     | Topo                          | 2    | 2,238 | 2,226         | 2,232 | 0,01 |
|             | Base                  | 2        | 94,9  | 94,4  | 94,7          | 0,35        |                       | Base                          | 2    | 2,183 | 2,171         | 2,177 | 0,01 |
| 10          | Topo                  | 2        | 98,8  | 98,6  | 98,7          | 0,14        | 10                    | Topo                          | 2    | 2,272 | 2,268         | 2,270 | 0,00 |
|             | Base                  | 2        | 97,9  | 97,1  | 97,5          | 0,57        |                       | Base                          | 2    | 2,252 | 2,233         | 2,243 | 0,01 |
| 12          | Topo                  | 2        | 100,2 | 99,3  | 99,8          | 0,64        | 12                    | Topo                          | 2    | 2,305 | 2,284         | 2,294 | 0,01 |
|             | Base                  | 2        | 98,5  | 98,4  | 98,5          | 0,07        |                       | Base                          | 2    | 2,266 | 2,263         | 2,264 | 0,00 |

Quadro 4 – Estatística da camada por número de passadas – 4ª Camada 50 cm.

| Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | G.C. (%) |      |       |               | Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | Massa Específica Seca (g/cm³) |      |       |               |       |      |
|-------------|-----------------------|----------|------|-------|---------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|------|-------|---------------|-------|------|
|             |                       | Máx.     | Mín. | Média | Desvio padrão |             |                       | Máx.                          | Mín. | Média | Desvio padrão |       |      |
| 4           | Topo                  | 2        | 97,0 | 95,7  | 96,4          | 0,92        | 4                     | Topo                          | 2    | 2,104 | 2,076         | 2,090 | 0,02 |
|             | Base                  | 2        | 89,5 | 89,4  | 89,5          | 0,07        |                       | Base                          | 2    | 1,941 | 1,939         | 1,940 | 0,00 |
| 6           | Topo                  | 2        | 95,7 | 94,6  | 95,2          | 0,78        | 6                     | Topo                          | 2    | 2,076 | 2,052         | 2,064 | 0,02 |
|             | Base                  | 2        | 94,2 | 92,4  | 93,3          | 1,27        |                       | Base                          | 2    | 2,043 | 2,004         | 2,024 | 0,03 |
| 8           | Topo                  | 2        | 95,7 | 95,1  | 95,4          | 0,42        | 8                     | Topo                          | 2    | 2,076 | 2,063         | 2,069 | 0,01 |
|             | Base                  | 2        | 94,2 | 93,4  | 93,8          | 0,57        |                       | Base                          | 2    | 2,043 | 2,026         | 2,035 | 0,01 |
| 10          | Topo                  | 2        | 96,0 | 95,9  | 96,0          | 0,07        | 10                    | Topo                          | 2    | 2,082 | 2,080         | 2,081 | 0,00 |
|             | Base                  | 2        | 94,5 | 93,6  | 94,1          | 0,63        |                       | Base                          | 2    | 2,050 | 2,030         | 2,040 | 0,01 |

Quadro 5 – Estatística da camada por número de passadas – 5ª Camada 60 cm (Sem Energia).

| Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | G.C. (%) |      |       |               | Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | Massa Específica Seca (g/cm³) |      |       |               |       |      |
|-------------|-----------------------|----------|------|-------|---------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|------|-------|---------------|-------|------|
|             |                       | Máx.     | Mín. | Média | Desvio padrão |             |                       | Máx.                          | Mín. | Média | Desvio padrão |       |      |
| Sem Energia | Topo                  | 2        | 92,1 | 89,9  | 91,0          | 0,55        | Sem Energia           | Topo                          | 2    | 2,058 | 2,008         | 2,033 | 0,01 |
|             | Base                  | 2        | 85,6 | 82,9  | 84,2          | 0,67        |                       | Base                          | 2    | 1,912 | 1,852         | 1,882 | 0,01 |
| 4           | Topo                  | 2        | 93,8 | 92,6  | 93,2          | 0,30        | 4                     | Topo                          | 2    | 2,095 | 2,069         | 2,082 | 0,01 |
|             | Base                  | 2        | 86,0 | 84,0  | 85,0          | 0,50        |                       | Base                          | 2    | 1,921 | 1,877         | 1,899 | 0,01 |
| 6           | Topo                  | 2        | 90,0 | -     | -             | -           | 6                     | Topo                          | 2    | 2,011 | -             | -     | -    |
|             | Base                  | 2        | 87,1 | -     | -             | -           |                       | Base                          | 2    | 1,946 | -             | -     | -    |
| 8           | Topo                  | 2        | 92,1 | 91,7  | 91,9          | 0,10        | 8                     | Topo                          | 2    | 2,058 | 2,049         | 2,054 | 0,00 |
|             | Base                  | 2        | 84,8 | 84,0  | 84,4          | 0,20        |                       | Base                          | 2    | 1,894 | 1,877         | 1,886 | 0,00 |

Os resultados apresentados para a 1ª camada de 30 cm (Quadro) demonstram que G.C., topo e base atenderam ao mínimo de 95%. Já para a 2ª camada de 30 cm (Quadro 2) apenas dois resultados na base ficaram abaixo do previsto, os demais resultados atenderam ao mínimo de 95%. Para a 3ª camada (Quadro 3) ficou demonstrado que com 4 passadas não atingiu-se o grau mínimo previsto. Entretanto, já com 6 e 8 passadas não obteve-se o G.C. mínimo apenas na base. Desta forma, para a aplicação do material compactado de 40 cm de espessura foram necessárias 10 passadas. Para a 4ª camada (Quadro 4) de 50 cm percebe-se que todos os graus de compactação da base ficaram abaixo do previsto. Com isso, não foi recomendável o lançamento de camadas com essa espessura. Por fim, a 5ª camada de 60 cm apresentou todos os graus de compactação abaixo do previsto. Com isso, não foi recomendável o lançamento de camadas com essa espessura.

Os Quadros 6 a 10 apresentam os resultados de G.C e massa específica seca para o equipamento Trator de esteira D6, nas cinco camadas do aterro. Em vermelho, destaca-se o resultado que não atendeu a expectativa.

Quadro 6 – Estatística da camada por número de passadas – 1ª Camada 30 cm – G.C. resultante.

| Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | G.C. (%) |      |       |      | Desvio padrão | Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | Massa Específica Seca (g/cm³) |       |       |       | Desvio padrão |
|-------------|-----------------------|----------|------|-------|------|---------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|---------------|
|             |                       | Máx.     | Mín. | Média |      |               |             |                       | Máx.                          | Mín.  | Média |       |               |
| 4           | Topo                  | 2        | 97,3 | 95,3  | 96,3 | 1,41          | 4           | Topo                  | 2                             | 2,066 | 2,023 | 2,044 | 0,03          |
|             | Base                  | 2        | 93,2 | 92,4  | 92,8 | 0,57          |             | Base                  | 2                             | 1,979 | 1,962 | 1,970 | 0,01          |
| 6           | Topo                  | 2        | 97,8 | 97,1  | 97,5 | 0,49          | 6           | Topo                  | 2                             | 2,076 | 2,061 | 2,069 | 0,01          |
|             | Base                  | 2        | 96,2 | 93,9  | 95,1 | 1,63          |             | Base                  | 2                             | 2,042 | 1,993 | 2,018 | 0,03          |
| 8           | Topo                  | 2        | 98,0 | 97,9  | 98,0 | 0,07          | 8           | Topo                  | 2                             | 2,081 | 2,078 | 2,079 | 0,00          |
|             | Base                  | 2        | 96,8 | 95,2  | 96,0 | 1,13          |             | Base                  | 2                             | 2,055 | 2,021 | 2,038 | 0,002         |

Quadro 7 – Estatística da camada por número de passadas – 2ª Camada 30 cm.

| Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | G.C. (%) |      |       |      | Desvio padrão | Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | Massa Específica Seca (g/cm³) |       |       |       | Desvio padrão |
|-------------|-----------------------|----------|------|-------|------|---------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|---------------|
|             |                       | Máx.     | Mín. | Média |      |               |             |                       | Máx.                          | Mín.  | Média |       |               |
| 4           | Topo                  | 2        | 96,8 | 92,4  | 94,6 | 3,11          | 4           | Topo                  | 2                             | 2,190 | 2,090 | 2,140 | 0,07          |
|             | Base                  | 2        | 90,0 | 89,4  | 89,6 | 0,57          |             | Base                  | 2                             | 2,036 | 2,018 | 2,207 | 0,01          |
| 6           | Topo                  | 2        | 98,9 | 97,3  | 98,1 | 1,13          | 6           | Topo                  | 2                             | 2,237 | 2,201 | 2,219 | 0,03          |
|             | Base                  | 2        | 98,3 | 95,0  | 96,7 | 2,33          |             | Base                  | 2                             | 2,224 | 2,149 | 2,186 | 0,05          |
| 8           | Topo                  | 2        | 98,2 | 97,8  | 98,0 | 0,28          | 8           | Topo                  | 2                             | 2,221 | 2,212 | 2,217 | 0,01          |
|             | Base                  | 2        | 97,4 | 96,5  | 97,0 | 0,64          |             | Base                  | 2                             | 2,203 | 2,183 | 2,193 | 0,01          |
| 10          | Topo                  | 2        | 98,8 | 98,8  | 98,8 | 0,00          | 10          | Topo                  | 2                             | 2,235 | 2,235 | 2,235 | 0,00          |
|             | Base                  | 2        | 98,2 | 97,6  | 97,9 | 0,42          |             | Base                  | 2                             | 2,221 | 2,208 | 2,214 | 0,01          |
| 12          | Topo                  | 2        | 99,0 | 98,6  | 98,8 | 0,28          | 12          | Topo                  | 2                             | 2,239 | 2,230 | 2,235 | 0,01          |
|             | Base                  | 2        | 98,4 | 98,0  | 98,2 | 0,28          |             | Base                  | 2                             | 2,226 | 2,217 | 2,221 | 0,01          |

Quadro 8 – Estatística da camada por número de passadas – 3ª Camada 40 cm.

| Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | G.C. (%) |      |       |      | Desvio padrão | Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | Massa Específica Seca (g/cm³) |       |       |       | Desvio padrão |
|-------------|-----------------------|----------|------|-------|------|---------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|---------------|
|             |                       | Máx.     | Mín. | Média |      |               |             |                       | Máx.                          | Mín.  | Média |       |               |
| 4           | Topo                  | 2        | 93,3 | 93,2  | 93,3 | 0,07          | 4           | Topo                  | 2                             | 2,146 | 2,144 | 2,145 | 0,00          |
|             | Base                  | 2        | 94,2 | 92,6  | 93,4 | 1,13          |             | Base                  | 2                             | 2,167 | 2,130 | 2,148 | 0,03          |
| 6           | Topo                  | 2        | 95,3 | 95,0  | 95,2 | 0,21          | 6           | Topo                  | 2                             | 2,192 | 2,185 | 2,188 | 0,00          |
|             | Base                  | 2        | 94,3 | 93,3  | 93,8 | 0,71          |             | Base                  | 2                             | 2,169 | 2,146 | 2,157 | 0,02          |
| 8           | Topo                  | 2        | 95,4 | 95,3  | 95,4 | 0,07          | 8           | Topo                  | 2                             | 2,194 | 2,192 | 2,193 | 0,00          |
|             | Base                  | 2        | 95,0 | 94,7  | 94,9 | 0,21          |             | Base                  | 2                             | 2,185 | 2,178 | 2,182 | 0,00          |
| 10          | Topo                  | 2        | 97,4 | 96,1  | 96,8 | 0,92          | 10          | Topo                  | 2                             | 2,240 | 2,210 | 2,225 | 0,02          |
|             | Base                  | 2        | 96,0 | 95,5  | 95,8 | 0,35          |             | Base                  | 2                             | 2,208 | 2,197 | 2,202 | 0,01          |
| 12          | Topo                  | 2        | 97,6 | 96,5  | 97,1 | 0,78          | 12          | Topo                  | 2                             | 2,245 | 2,220 | 2,232 | 0,02          |
|             | Base                  | 2        | 97,0 | 95,9  | 96,5 | 0,78          |             | Base                  | 2                             | 2,231 | 2,206 | 2,218 | 0,02          |

Quadro 9 – Estatística da camada por número de passadas – 4ª Camada 50 cm.

| Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | G.C. (%) |      |       |      | Desvio padrão | Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | Massa Específica Seca (g/cm³) |       |       |       | Desvio padrão |
|-------------|-----------------------|----------|------|-------|------|---------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|---------------|
|             |                       | Máx.     | Mín. | Média |      |               |             |                       | Máx.                          | Mín.  | Média |       |               |
| 4           | Topo                  | 2        | 95,0 | 94,2  | 94,6 | 0,57          | 4           | Topo                  | 2                             | 2,061 | 2,043 | 2,052 | 0,01          |
|             | Base                  | 2        | 90,4 | 89,3  | 89,9 | 0,78          |             | Base                  | 2                             | 1,961 | 1,937 | 1,949 | 0,02          |
| 6           | Topo                  | 2        | 95,8 | 95,6  | 95,7 | 0,14          | 6           | Topo                  | 2                             | 2,078 | 2,074 | 2,076 | 0,00          |
|             | Base                  | 2        | 94,2 | 93,2  | 93,7 | 0,71          |             | Base                  | 2                             | 2,043 | 2,022 | 2,032 | 0,02          |
| 8           | Topo                  | 2        | 95,6 | 94,6  | 95,1 | 0,71          | 8           | Topo                  | 2                             | 2,074 | 2,052 | 2,063 | 0,02          |
|             | Base                  | 2        | 93,9 | 93,6  | 93,8 | 0,21          |             | Base                  | 2                             | 2,037 | 2,030 | 2,033 | 0,00          |
| 10          | Topo                  | 2        | 97,8 | 97,1  | 97,5 | 0,49          | 10          | Topo                  | 2                             | 2,121 | 2,106 | 2,114 | 0,01          |
|             | Base                  | 2        | 93,9 | 92,8  | 93,4 | 0,78          |             | Base                  | 2                             | 2,037 | 2,013 | 2,025 | 0,02          |

Quadro 10 – Estatística da camada por número de passadas – 5ª Camada 60 cm.

|             |                       | G.C. (%) |      |       |               |             | Massa Específica Seca (g/cm³) |       |       |       |               |
|-------------|-----------------------|----------|------|-------|---------------|-------------|-------------------------------|-------|-------|-------|---------------|
| Nº Passadas | Quantidade de Ensaios | Máx.     | Mín. | Média | Desvio padrão | Nº Passadas | Quantidade de Ensaios         | Máx.  | Mín.  | Média | Desvio padrão |
| 4           | Topo                  | 92,4     | 91,6 | 92,0  | 0,20          | 4           | Topo                          | 2,064 | 2,046 | 2,055 | 0,00          |
|             | Base                  | 85,1     | 82,5 | 83,8  | 0,65          |             | Base                          | 2     | 1,901 | 1,843 | 1,872         |
| 6           | Topo                  | 92,8     | 92,0 | 92,4  | 0,20          | 6           | Topo                          | 2,073 | 2,055 | 2,064 | 0,00          |
|             | Base                  | 85       | 84,9 | 84,9  | 0,02          |             | Base                          | 2     | 1,899 | 1,897 | 1,898         |
| 8           | Topo                  | 92,5     | -    | -     | -             | 8           | Topo                          | 2,066 | -     | -     | -             |
|             | Base                  | 84,5     | -    | -     | -             |             | Base                          | 2     | 1,888 | -     | -             |

Para a 1º camada de 30 cm (Quadro 6) foi observada maior dispersão. Os ensaios realizados no topo atenderam ao grau de compactação previsto, porém com 4 e 6 passadas não atingiram o grau mínimo na base. Assim, para a aplicação do material com espessura de 30 cm compactadas, foi necessário o mínimo de 8 passadas. Para a 2ª camada de 30 cm (Quadro 7) também houve grande dispersão. Os resultados de ensaios de compactação realizados com 4 passadas não atenderam ao grau de compactação mínimo previsto, porém com 6, 8, 10 e 12 passadas os valores ficaram superiores ao esperado. Desta forma, para a aplicação do material compactado com espessura de 30 cm necessitou de no mínimo 6 passadas. Já para a 3ª camada de 40 cm (Quadro 8) observou-se que com 4 passadas não foi atingido o grau mínimo previsto; já com 6 e 8 passadas não foi atingido o G.C. mínimo apenas na base. Desta forma, para a aplicação do material compactado de espessura de 40 cm foi necessário no mínimo de 10 passadas. No caso da 4ª camada de 50 cm (Quadro 9) todos os G.C. da base ficaram abaixo do previsto, não sendo recomendado o lançamento de camadas com essa espessura. Por fim, para a 5ª camada de 60 cm (Quadro 10) todos os graus de compactação ficaram abaixo do previsto. Com isso, não foi recomendável o lançamento de camadas com essa espessura.

#### 4 CONCLUSÕES

Os aterros experimentais, geralmente, são recomendados em obras de grande porte. Os materiais provenientes da Mina e da PDE's, são considerados os locais de empréstimos e que por ventura podem apresentar natureza distinta do ponto de vista geológico e geotécnico. Consequentemente, heterogeneidade e anisotropia serão fatores relevantes e condicionantes no comportamento geotécnico da construção e reforço de uma estrutura. A metodologia aqui proposta permitiu avaliar a performance operacional para a construção dessas estruturas.

Espera-se que esse estudo possa vir a contribuir com projetos semelhantes, onde há a necessidade da avaliação do comportamento geotécnico de materiais dispostos em empilhamentos de estéril e/ou como elementos de reforço em barragens.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amick, H., Gendreau, M. (2000) *Construction vibrations and their impact on vibration-sensitive facilities*. In: Construction Congress VI: Building Together for a Better Tomorrow in an Increasingly Complex World. p. 758-767.
- Caixeta, A. P. C. (2018) *Estudo de Viabilidade da Utilização de Estéreis de Mina em Obras de Alçamento a Jusante – estudo de caso: barragem de rejeito Mirim*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Svinkin, M. R. (2004) *Minimizing construction vibration effects*. Practice periodical on structural design and construction, v. 9, n. 2, p. 108-115.