



Quantificação do Volume de Minérios em Pilha a Partir da Integração e Comparação Topografia/ Fotogrametria
Volume Quantification of Ore Pile from the Integration and Comparison Topography /Photogrammetry

Marina de Oliveira Coelho; George Deroco Martins & Rodrigo de Araújo Bezerra Gallis

*Universidade Federal de Uberlândia,
Campus Monte Carmelo. Rod. LMG 746, km 01, s/n, bloco 1, Campus Monte Carmelo. 38500-000 Monte Carmelo, MG, Brasil
E-mails: marinaoliveiraec@yahoo.com.br; deroco@ufu.br; rodrigogallis@ufu.br
Recebido em: 20/09/2018 Aprovado em: 15/02/2019
DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_301_307*

Resumo

A mineração é constituída por processos, atividades e indústrias que possuem o objetivo de extrair substâncias minerais a partir de depósitos a céu aberto, minas subterrâneas, entre outros. Atualmente no Brasil, os minerais que se destacam pela extração são os metálicos, como o ferro, o manganês e a bauxita e em menor escala o ouro, o cobre e o nióbio. As extrações desses minerais são à base da indústria mineradora brasileira, sendo Minas Gerais o estado onde se encontra a maior parte delas. O cálculo do volume do minério é de grande importância para qualquer mineradora, pois a partir desse cálculo é possível decidir qual será o melhor emprego dos materiais produzidos. O minério, após o processo de extração, é depositado em pilhas para posterior beneficiamento. O objetivo deste artigo foi mensurar e comparar o cálculo do volume das pilhas a partir da integração entre técnicas topográficas e fotogramétricas, utilizando dados obtidos por medições planialtimétricas coletadas com uma estação total e por fotogrametria terrestre, onde imagens da pilha foram coletadas por câmera fotográfica não métrica de baixo custo. Em prossecução realizou-se o cálculo do erro relativo percentual, resultando em um erro de 0,184% do levantamento fotogramétrico em relação ao levantamento topográfico. **Palavras-chave:** Mineração; Topografia; Fotogrametria; câmara de baixo custo; volume mineral

Abstract

Mining is made up of processes, activities and industries that aim to extract mineral substances from open pit deposits, underground mines, among others. Currently in Brazil, the most extracted minerals are the metallic ones, like the iron, the manganese and the bauxite and in smaller scale the gold, the copper and the niobium. Extractions of these minerals are the basis of the Brazilian mining industry, with Minas Gerais being the state where most of them are located. The volume calculation of the ore is of great importance for any mining company, since from this calculation it is possible to decide what will be the best use of the produced materials. The ore, after the extraction process, is deposited in piles for further processing. The objective of this paper was to measure and compare the calculation of the volume of the ore piles from the integration between topographic and photogrammetric techniques, using data obtained by planialtimetric measurements collected with a total station and by terrestrial photogrammetry, where images of the pile were collected by low-cost non-metric camera. The percentage of relative error was calculated, resulting in an error of 0.184% of the photogrammetric survey in relation to the topographic survey.

Keywords: Mining; topography; photogrammetry; low-cost camera; volume calculation

1 Introdução

O aumento da população mundial e o desenvolvimento tecnológico acarretaram num maior volume de extração mineral devido à influência dos minerais no desenvolvimento tecnológico de um país, tornando necessária uma maior quantidade destes para atender as crescentes necessidades da sociedade (Reis, 2011).

A fase inicial da extração mineral é marcada por uma grande movimentação de produto, que são caracterizados em um estado bruto por pilhas compostas por solo e pelo minério, as quais podem ser removidas para compor um estoque de preparo, enriquecimento energético ou para atender diretamente o mercado (Zang *et al.*, 2016). A determinação do controle do volume das pilhas se faz necessária desde a fase de pesquisa, no dimensionamento e na cubagem de corpos mineralizados, passando pelas operações de mina, como nos desmontes e nas disposições de materiais, até a fase final de produção (Valcarenghi *et al.*, 2015).

Para que se possa quantificar o volume de material que se desloca, é fundamental que seja feito o levantamento preciso dessas pilhas. Sendo assim, torna-se importante a utilização de ferramentas tecnológicas para mensurar e cubar materiais sólidos nas minerações, assim como pilhas de minério, de rejeito e estéreis (Valcarenghi *et al.*, 2015).

Todo o material, que constitui as pilhas de produto, é pesado antes de ser estocado e quando é carregado para ser entregue aos clientes. Porém, devido a diversos fatores como umidade, erros de pesagem das balanças, compactação, arraste de material, entre outros, muitas vezes não corresponde ao estoque físico existente nos pátios de produto (Reis, 2011).

A fim de controlar a massa real de material estocado, visando uma correta contabilização dos seus ativos e a busca constante por métodos mais eficientes que facilitem a quantificação de volumes dos mais diversos materiais, e principalmente eliminem o trânsito constante de pessoas em áreas de risco, muitas empresas vêm inovando e utilizando levantamentos que necessitam de pouco tempo para a realização (Topalov *et al.*, 2016)

Antes eram utilizados levantamentos topográficos, cujas técnicas têm evoluído constantemente,

proporcionando, também, resultados cada vez mais precisos, e com maior exigência com o passar do tempo. Apesar da evolução dos aparelhos topográficos, existem métodos de levantamento que estão ganhando espaço na área de mineração, como o levantamento por LIDAR (Light Detection And Ranging) e por Fotogrametria (ARP - Aeronave Remotamente Pilotada ou VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado) (Park *et al.*, 2016).

Portanto, destaca-se como principal vantagem a utilização do método de levantamento por LIDAR, devido à possibilidade de se realizar levantamentos à distância, especialmente em áreas onde o acesso é difícil ou perigoso e a possibilidade de se trabalhar e consultar a posteriori os dados estruturais. Outro ponto positivo importante está associado à grande quantidade de dados estruturais que podem ser adquiridos e processados simultaneamente, aumentando o grau de confiabilidade das interpretações (Nagalli, 2010).

Em contrapartida, a utilização de ARP reduz os riscos de operação, uma vez que dispensam a necessidade de operadores dentro da área de mineração, além de oferecer mais agilidade na coleta de dados, sendo possível realizar um maior número de observações e acompanhar diariamente a movimentação e extração de minérios e a partir de uma densa nuvem de pontos. Este processo é possível através do processamento das imagens, o qual possibilita o cálculo rápido e eficiente de volumes de pilhas irregulares de estoque de minério com relativa precisão (Park *et al.*, 2016).

Em suma, a integração dessas tecnologias é de fundamental importância para o desenvolvimento e o planejamento do empreendimento, pois é possível manter atualizados os dados de campo, áreas de exploração e pátio de estocagem, facilitando o gerenciamento da produção mineral (Lopes *et al.*, 2012).

Dado o exposto, o objetivo geral deste trabalho foi realizar o cálculo do volume de uma pilha de argila utilizando a integração e a comparação entre as técnicas da Topografia e Fotogrametria. O intuito foi validar um produto fotogramétrico gerado com sensor de baixo custo, buscando facilitar e reduzir custos para as indústrias mineradoras, devido ao controle das constantes alterações que as pilhas de minério sofrem.

2 Métodos

Com o objetivo de obter o volume do depósito mineral, a execução deste trabalho foi dividida em levantamento por Topografia convencional e por Fotogrametria terrestre e ao final a comparação dos resultados alcançados. A Figura 1 mostra o fluxograma de execução das etapas.

2.1 Área de Estudos

A área de estudo utilizada para o levantamento pertence à Cerâmica Carmelo, tendo sua sede localizada na Rua Terezina, 390, bairro Lagoinha (Figura 2-C), na cidade Monte Carmelo (Figura 2-B) – MG (Figura 2-A). Como mostra a Figura 2 abaixo, o local onde são depositadas as pilhas de argila é na rodovia paralela com os fundos da cerâmica.

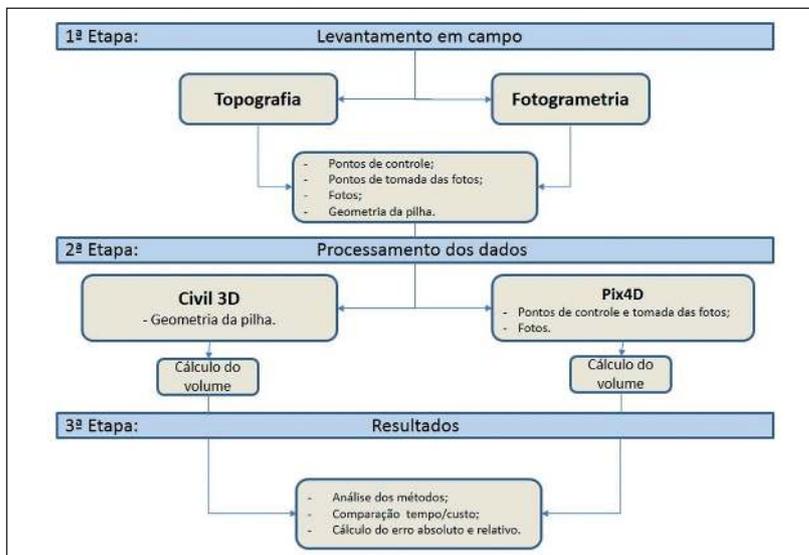


Figura 1
Fluxograma de Trabalho

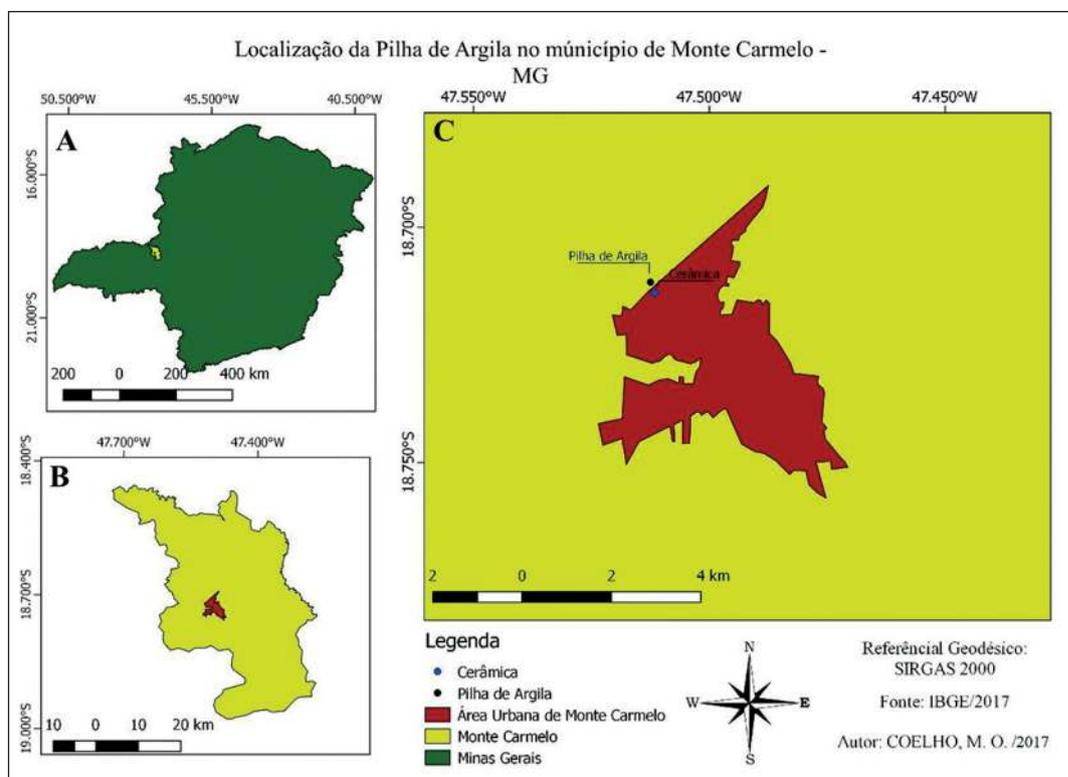


Figura 2 A. Limite político Minas Gerais; B. Limite político do município de Monte Carmelo; C. Limite político urbano de Monte Carmelo (marcador em azul, posição da pilha de argila)

2.2 Aquisição de Dados

Dado a condição de que os mesmos pontos de apoio foram utilizados no processo topográfico (poligonização) e fotogramétrico (fototriangulação), o levantamento em campo foi realizado de forma simultânea ao fotogramétrico. No início do processo foi feito o reconhecimento da aérea e elaborado um melhor trajeto para o levantamento da pilha de argila. Para tanto, foram materializados, por piquetes, 10 pontos que proporcionavam melhor visualização do alvo.

A partir de três dos pontos de apoio foram adotadas coordenadas arbitrárias para definição de um plano topográfico local. O plano topográfico local foi estabelecido por uma componente planimétrica definida por X e Y e por uma componente altimétrica definida pelo vetor da vertical H. As coordenadas dos demais pontos de apoio, foram definidas por uma poligonização fechada, a qual, segundo a NBR 13133, permite ajustar erros de fechamento angular e linear.

Por intermédio de uma estação total Leica MS50 instalada sobre os pontos de apoio, a pilha de argila foi georreferenciada através de um processo de irradiação. Para o cálculo do volume da pilha por topografia convencional mensurou-se, sem prisma, a forma geométrica da pilha, coletando medidas na base da pilha e em pontos de maiores elevações.

Para o processo fotogramétrico, foram utilizados pontos de controle fotoidentificáveis pré-sinalizados (alvos) (Figura 3 A), colocados (Figura 3 B) em lugares aleatórios na pilha, ainda assim sem a presença do prisma. Fazendo uso do prisma, foram realizadas medidas em locais onde foram tomadas as fotos. Esta etapa foi necessária para obtenção das coordenadas dos centros perspectivos das imagens.

Ressalta-se que, as imagens foram tomadas de todas as faces da pilha de três em três metros garantindo uma sobreposição longitudinal de 60% entre as imagens e que as fotografias foram tiradas em modo paisagem (câmara na posição horizontal) usando um celular Samsung modelo J5.

2.3 Processamento dos Dados

Para a obtenção dos valores de volume da pilha através das metodologias escolhidas (Topografia e Fotogrametria), os dados foram preparados e processados em softwares distintos.

Nos dados coletados topograficamente, utilizou-se o software AutoCad Civil 3D, onde foram inseridos os pontos irradiados da geometria da pilha, mensurando os pontos do topo e base da pilha que formavam a geometria da mesma. Após a inserção dos dados, criou-se uma superfície, resultando no formato da pilha levantada, o espaçamento utilizado para a criação da superfície foi de 5m, o menor possível encontrado no software.

As coordenadas planialtimétricas (X, Y e H) foram determinadas a partir das Equações 1,2 e 3.

$$X_i = X_{i-1} + D_{i,i-1} * \text{sen}Az_{i,i-1} \quad (1)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + D_{i,i-1} * \text{cos}Az_{i,i-1} \quad (2)$$

$$H_i = H_{i-1} + h_p + D_{i,i-1} / \text{tang}Az_{i,i-1} \quad (3)$$

Onde, i varia de zero a (n-1), sendo n é o número de estações da poligonal, Az representando o azimute e D a distância horizontal parcial entre duas estações.

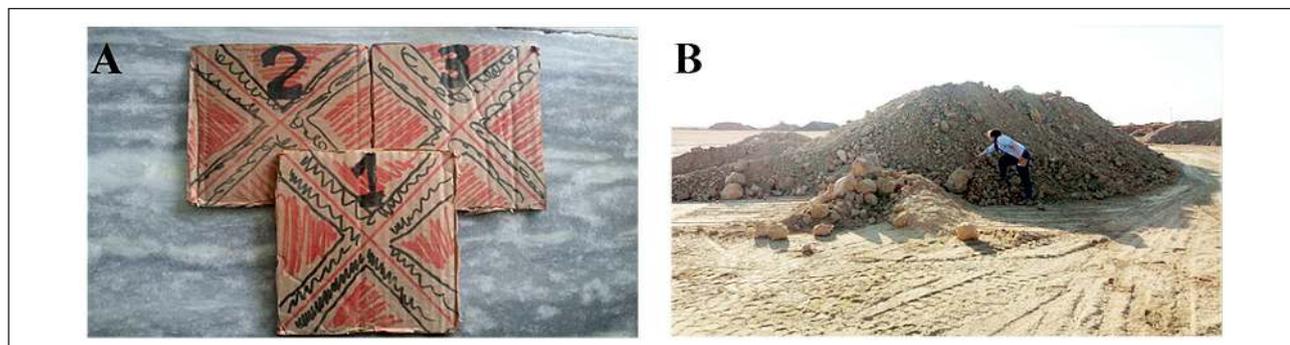


Figura 3 A. Modelo dos Alvos confeccionados sob papelão; B. Colocação dos alvos sobre a pilha de argila.

O cálculo do volume da pilha obtida através das medições topográficas foi realizada no software Autocad Civil 3D através da comparação das superfícies de todas as curvas de nível com a superfície de curva de nível de menor valor, conhecido como método das superfícies equidistantes, obtendo em m³ o volume da pilha de argila.

O cálculo do volume da pilha a partir das imagens foi realizado a partir do processamento da nuvem de pontos gerada no software Pixel4D. Ao todo foram tiradas 59 fotos na posição horizontal e processo fotogramétrico foi realizado no Pixel4D.

A relação entre as coordenadas de imagem e espaço objeto de pontos homólogos (irradiação sobre alvos da pilha) é descrita a partir do modelo de colinearidade, conforme as Equações 4 e 5.

$$x_p = -f \frac{m_{11}(X_p - X_{CP}) + m_{12}(Y_p - Y_{CP}) + m_{13}(Z_p - Z_{CP})}{m_{31}(X_p - X_{CP}) + m_{32}(Y_p - Y_{CP}) + m_{33}(Z_p - Z_{CP})} \quad (4)$$

$$y_p = -f \frac{m_{21}(X_p - X_{CP}) + m_{22}(Y_p - Y_{CP}) + m_{23}(Z_p - Z_{CP})}{m_{31}(X_p - X_{CP}) + m_{32}(Y_p - Y_{CP}) + m_{33}(Z_p - Z_{CP})} \quad (5)$$

Onde, f é distância focal da câmera; x_p, y_p são as coordenadas fotogramétricas; X_p, Y_p, Z_p são as coordenadas do ponto no espaço objeto, X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP} são as coordenadas do centro perspectivo no terreno $m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{31}, m_{32}, m_{33}$ são os elementos da matriz de rotação. Os ângulos ω (omega), ϕ (phi) e κ (kapa) permitem que os siste-

mas de referência no terreno e na fotografia se tornem paralelos (Galo, 1993).

Feito os cálculos do volume, gerou-se uma análise da variação dos dados obtidos, de acordo com o tipo de levantamentos e calculou-se o erro absoluto, que é, em modulo, o valor real menos o valor aproximado, e também o erro relativo percentual, de acordo com a Equação 6, utilizando o volume obtido pela topografia convencional como referência.

$$Er = (|Ve - Va|) / Va * 100 \quad (6)$$

Onde: Er é o erro relativo em porcentual; Ve é o valor exato (topográfico); Va é o valor aproximado (fotogramétrico).

A Figura 4 apresenta uma ilustração da posição dos centros perspectivos das tomadas de fotos em relação à pilha de argila.

3 Resultados e Discussões

Após o processamento dos dados, as pilhas apresentaram os seguintes formatos, exibidos nas Figuras 4A e 4B. Na Tabela 1 são apresentados os valores do volume da pilha de argila obtidos a partir dos processos topográfico e fotogramétrico.

Levantamento	Software	Volume (m ³)
Topográfico	Civil 3D	1592.34
Fotogramétrico	Pix4D	1589.41

Tabela 1 Resultado do volume calculado. Coluna 1- técnica de levantamento, coluna 2- software utilizado para processamento, 3- volume calculado

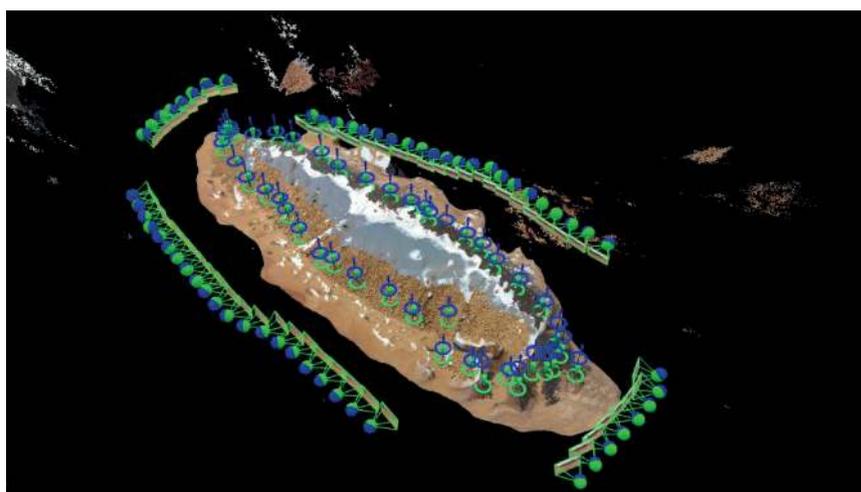


Figura 4 Ilustração do caminhamento das tomadas das fotos em torno da pilha.

Analisando a tabela 1, tendo como referencial o levantamento topográfico, observa-se uma diferença menor que três metros cúbicos no resultado do cálculo de volume da pilha de argila obtido pelo método fotogramétrico.

Comparando as técnicas utilizadas, o levantamento topográfico necessita de operadores com conhecimento técnicos e a mensuração da forma geométrica da pilha fica a critério do operador escolher quais pontos coletar. O levantamento fotogramétrico, nesse caso, por usar um sensor de baixo custo, pode ser operado por um operador sem experiência.

Em relação à coleta de dados utilizando o processo fotogramétrico com sensor de baixo custo, alguns detalhes merecem atenção, como, o não alinhamento do centro perspectivo e a impossibilidade de coleta de imagens do topo da pilha devido à altura. A necessidade de calibração da câmara também deve ser ressaltada para obtenção de resultados mais acurados.

A Tabela 2 representa o custo e tempo de cada metodologia empregada neste trabalho.

Método	Campo (horas)	Processamento (horas)	Custo Aparelho (R\$)	Custo Software (R\$)
Topográfico	4	3	400.000	livre
Fotogramétrico	4	8	500	livre

Tabela 2 Custo e tempo dos métodos. Coluna 1- método utilizado, coluna 2- horas de gastas no levantamento, coluna 3- horas gastas no processamento de dados, coluna 4- preço do equipamento, coluna 5- custo do software

Associando o tempo e custo da metodologia aplicada, o levantamento topográfico possui um tempo menor de processamento, devido ao aparelho já fornecer todas as coordenadas calculadas, não necessitando de outro software para processar os demais pontos a partir dos pontos de referência (ré e primeiro ponto da poligonal), a desvantagem é que o equipamento utilizado, a estação total Leica MS50, possui um alto custo, o que dificulta aquisição por parte de algumas empresas e profissionais autônomos.

Os dados coletados através do levantamento fotogramétrico necessitaram de um tempo maior

para de processamento apesar do baixo custo do aparelho, que nesse caso, utilizou-se a câmara de um celular popular (Samsung J5).

Comparando as duas técnicas de levantamento e as metodologias empregadas, o levantamento fotogramétrico se mostrou mais viável em relação às variáveis tempo e custo. Para a averiguação do método foi feita a comparação do cálculo do volume obtido, tendo como o valor de referência o valor do volume calculado a partir do levantamento topográfico. Assim, realizou-se o cálculo do erro absoluto e do erro relativo percentual, como mostra a Tabela 3 a seguir:

Erro Absoluto	Erro Relativo Percentual
2,93 m ³	0,184%

Tabela 3 Erros (coluna 1- Absoluto e coluna 2- Relativo)

Baseado nos valores dos erros obtidos, os resultados obtidos com os dados produzidos através do levantamento fotogramétrico realizado com a câmara do celular foram satisfatórios devido à proximidade dos valores do volume calculado pelo levantamento topográfico, resultando em um erro absoluto de 2,93 m³, considerado pequeno em relação a dimensão da pilha de argila. O erro relativo percentual representa o valor em porcentagem da medida observada comparada com a medida apontada como real, que neste projeto resultou em 0,184 por cento o que a caracteriza como uma boa precisão.

4 Considerações Finais

A determinação de volumes na mineração se faz necessária desde a fase de pesquisa, passando pelas operações de mina, até a fase final de produção com a medição dos produtos gerados. Porém, existem diversos fatores que influenciam na coleta e resultados dos dados obtidos, entre eles, a variedade e irregularidade de conformidade física das pilhas e a segurança dos operadores de campo.

Com isso, considerando os levantamentos realizados, as técnicas topográficas, que veem sendo utilizadas pelas empresas minerarias, possui um alto custo, devido a necessidade de aparelhos específicos, operadores com conhecimentos técnicos, e

tendo como dificuldade os levantamentos de áreas de risco para a segurança dos operadores de campo.

Comparado à metodologia utilizada na fotogrametria, onde o custo é baixo e não necessita de operadores com conhecimentos técnicos, tendo maior praticidade em levantamentos onde pode haver riscos para os operadores, por poder coletar dados a uma distância maior que a topografia.

O resultado do cálculo do volume obtido através do levantamento fotogramétrico foi satisfatório, apresentando diferença aceitável de 0,184%, quando comparado ao método topográfico, ou seja, o emprego de uma câmera de celular de baixo custo com o objetivo de se obter o volume de uma pilha pode gerar um resultado tão perto do obtido com uma estação total robótica.

A grande vantagem da utilização do celular para este fim, é a facilidade de realizar medições regularmente, otimizando o monitoramento de estoques de minério, movimentações de terra, entre outros.

Realizando um maior controle dos pontos de tomada da foto, utilizando uma câmera com melhor resolução geométrica e radiométrica, realizando a calibração da câmera periodicamente, mostra que este tipo de levantamento é uma ferramenta que pode ser utilizada para obtenção de dados com certa rapidez não só para gerenciamento e monitoramento na produção e no descarte, mas também em fiscalização de obras e outros empreendimentos.

5 Referências

- ABNT. 1994. NBR 13133: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro.
- Galo, M. 1993. *Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 163p.
- Lopes, F.C.; Lopes, G.A.; Procópio, R.S. & Silva, S.A. 2012. Contribuição da Integração dos dados de Levantamento a Laser, Aerofotogramétricos e Levantamentos Topográficos. *Belo Horizonte: Pós em Revista do Centro Universitário Newton Paiva, 6(1): 1 - 5.*
- Nagalli, A. 2010. *Estabilidade de Taludes em Rocha com aplicação de Escâner a Laser – Caso da Mina Saivá, Rio Branco do Sul, PR*. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 142 p.
- Park, H.J. 2016. Change detection analysis using airborne LiDAR: open-cut mine environment. **Study Of The Information Acquisition Technology For Damaged Land In Coal Mining Areas. In: INTERNATIONAL CONGRESS FOR MINE SURVEYING, 16, 2, Brisbane, Australia, p. 73-75.**
- Reis, F. S. 2011. *Propostas Metodológicas para quantificação mássica de pilhas de minério de ferro. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 51p.*
- Topalov, S.; Valkanov, N. & Boev, K. 2016. Deposit Parameter Modelling – Methods and Technologies in Bulgaria. **Study Of The Information Acquisition Technology For Damaged Land In Coal Mining Areas. In: INTERNATIONAL CONGRESS FOR MINE SURVEYING, 16, 2, Brisbane, Australia, p. 59 – 62.**
- Valcarengi, D. O., Souza, L. E., Abichequer, L. A., Neto, R. O., Gonçalves, I. G. 2015. Metodologia de análise quantitativa de volume de rocha desmontado utilizando software de mineração. *Santa Maria: Revista Monografias Ambientais, 14(1): 2-14.*
- Zhang, H.; Wang, X. & Wang, S. 2016. Study Of The Information Acquisition Technology For Damaged Land In Coal Mining Areas. **In: INTERNATIONAL CONGRESS FOR MINE SURVEYING, 16, 2, Brisbane, Australia, p. 281-286.**