

## DIAGNÓSTICO E CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE AGREGADOS DA PEDREIRA SUPERBRITAS COM USO DE VANT

Kaique Campos Motta, Pedreira Britagem Universo LTDA, e-mail: [kaiquecm@hotmail.com](mailto:kaiquecm@hotmail.com)  
Erisvaldo Bitencourt de Jesus, Universidade Federal da Bahia

### RESUMO

No atual cenário mineral onde empresas de pequeno, médio e grande porte buscam métodos de aumento de produtividade e redução de custos, o acompanhamento de etapas da operação possibilita análises mais detalhadas do empreendimento. Neste contexto, o levantamento de dados espaciais com voos realizados com VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) torna-se uma importante ferramenta. No presente estudo experimentos que comprovam a eficiência dos resultados do cálculo volumétrico de pilhas de agregados de uma Pedreira com uso de VANT foram realizados. Uma equação de regressão foi obtida para relacionar a granulometria com a densidade aparente dos diferentes produtos e, com isso, viabilizar a elaboração de inventários de produção da empresa de forma rápida e com baixo custo, respeitando as singularidades dos produtos.

**Palavras-chaves:** VANT; Granulometria; Inventário de produção.

### ABSTRACT

In the current mineral scenario where small, medium and large companies are looking for methods to increase productivity and reduce costs, monitoring the stages of the operation allows for more detailed analyzes of the project. In this context, the survey of spatial data with flights performed with UAV (unmanned aerial vehicle) becomes an important tool. In the present study, experiments that prove the efficiency of the results of the volumetric calculation of aggregate piles in a Quarry using UAVs were carried out. A regression equation was obtained to relate the granulometry to the apparent density of the different products and, thus, make it possible to prepare the company's production inventories quickly and at low cost, respecting the singularities of the products.

**Keywords:** UAV; Granulometry; Production inventory

## INTRODUÇÃO

A produção de agregados como fonte de matéria-prima para construção civil tem importância significativa no setor mineral, sendo produzido em pequenos, médios e grandes empreendimentos. A constante busca pelo aumento da produtividade nas operações unitárias e redução dos custos de produção propicia e estimula o desenvolvimento e aperfeiçoamento de ferramentas e métodos que auxiliem a tomada de decisão nas rotinas de trabalho dos diversos setores do processo produtivo da indústria mineral [1].

A crescente preocupação com o controle de estoque para um adequado planejamento das operações mineiras e do funcionamento eficiente dos equipamentos do circuito de britagem e peneiramento, favorece um aumento na produtividade. Adicionalmente à expectativa do aumento de demanda por agregados, motivada pelo reaquecimento do setor da construção civil e, principalmente, em virtude da retomada e previsão de início de obras de infraestrutura na capital e região metropolitana de Salvador, amplifica a importância de estudos de otimização das etapas de produção de agregados e controle dos estoques dos empreendimentos mineiros dessa região.

A determinação de volumes na mineração se faz necessária desde a fase de pesquisa, no dimensionamento de corpos mineralizados, passando pelas operações de mina, como nos desmontes e disposições de materiais, até a fase final de produção com a medição dos produtos gerados. Para isso, utilizar-se-á um conjunto de técnicas fotogramétricas por meio de dados obtidos com VANT e geodésicas (posicionamento por Global Navigation Satellite System - GNSS) a fim de obter uma base de dados que permita a realização dos cálculos volumétricos, com precisão adequada aos projetos técnicos de engenharia, através da aerofotogrametria [2].

O VANT é uma tecnologia de uso real e cada vez mais presente no cotidiano de pedreiras e minerações de um modo geral. Este equipamento é composto por uma Estação de Controle Remoto e uma plataforma aérea embarcada com sensores calibrados para mapeamento. Possuem inteligência artificial o que possibilita melhor aeronavegabilidade, seguindo os padrões de segurança da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Seu uso no setor mineral vem revolucionando e inovando com as mais diversas possibilidades que este equipamento disponibiliza, quando usado da maneira correta, como, por exemplo, em levantamento topográfico, desenvolvimento de cava, planejamento de mina, dentre outras aplicações.

O trabalho realizado com esses equipamentos tem como finalidade o levantamento aerofotogramétrico, que permite obter uma base de dados de maneira rápida, detalhada, precisa e atualizada de todas as áreas do empreendimento mineiro. O VANT fornece dados cartográficos, que permite gerar produtos como: Modelo Digital de Terreno e Modelo Digital de Superfície [3], além de Ortofoto, Nuvens de Pontos, Cálculo de Volumes de pilhas, Perfil de Terreno, Simulação 3D para Projeto de Recuperação Ambiental e Simulação de Avanço da Lavra [1].

O cálculo de volume de pilhas - foco do estudo de caso realizado na Pedreira Superbritas - pode ser determinado após o Geoprocessamento das imagens aéreas. Dessa forma pode ser calculado o volume das pilhas de material extraído, produzido e em estoque, como forma de acompanhamento da produtividade do empreendimento e levantamento de dados para análises de produção e eficiência de equipamentos.

O acompanhamento de produção através da volumetria das pilhas nos pátios do empreendimento permite um melhor entendimento da movimentação de massas dentro das áreas de estocagem, abrindo possibilidades de analisar diversas etapas da produção. Dentro de uma pedreira, por exemplo, um eficiente conhecimento da produção mássica pode apontar problemas em etapas da operação que posteriormente podem ser melhores analisadas separadamente, como, por exemplo, a eficiência da britagem, do peneiramento e até do tipo

de material que está sendo classificado como rejeito e direcionado para pilhas de estocagem e/ou bota-fora. O presente trabalho tem como finalidade apresentar a importância do serviço de levantamento e quantificação volumétrica das pilhas de minério/agregados nos pátios de usinas de beneficiamento, através de voos realizados com VANT. Trata-se de um estudo de caso realizado numa Pedreira da Região Metropolitana de Salvador – BA cliente da empresa Hammer Consultoria e Mineração.

## **ASPECTOS TEÓRICOS**

O geoprocessamento é um conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais voltadas para um objetivo específico [4]. Os produtos gerados do levantamento realizado com uso de VANT tem como base o geoprocessamento de imagens aéreas, onde usando como suporte ferramentas de softwares distintos, as imagens são carregadas e formam um mosaico de fotos com alta resolução, a partir do qual se obtém informações necessárias para o cálculo do volume das pilhas nos pátios do empreendimento.

No processamento das imagens capturadas basicamente são usados três softwares como suporte: *Google Earth*; *DroneDeploy*; *AgiSoftware PhotoScan*. O primeiro é usado basicamente como suporte para reconhecimento de área e definição prévia na demarcação dos polígonos do voo, no segundo é feito todo o planejamento do voo com todas as suas características desejadas, o terceiro é para o geoprocessamento das imagens que são carregadas formando um mosaico de alta resolução.

### **Aerofotogrametria**

A aerofotogrametria tem como conceito básico utilizar imagens digitais, com formato matricial (pixel), onde juntas essas imagens possibilitam a construção de uma imagem tridimensional. A fotogrametria digital tem como objetivo principal a reconstrução automática do espaço tridimensional (espaço-objeto), a partir de imagens bidimensionais (espaço-imagem) [5].

As imagens podem ser adquiridas através de equipamentos conhecidos como *scanner* ou de maneira direta através de uma câmera, no caso dos VANT's. Nos anos 90, esse ramo da fotogrametria realmente pôde ser usado de maneira extensiva, graças ao desenvolvimento de computadores com capacidade suficiente para o processamento interativo de imagens digitais, gerando elevados volumes de dados [5].

### **Modelo digital de terreno**

O tratamento das imagens obtidas através da câmera do VANT fornece um Modelo Digital de Terreno (MDT), que nada mais é do que um modelo matemático capaz de armazenar dados a respeito das características do terreno. Nesse modelo estão dados que representam a variação da superfície do terreno. Atualmente, dados de elevação podem ser obtidos por levantamentos topográficos/geodésicos realizados em campo, por métodos fotogramétricos aplicados sobre imagens provenientes de sensores terrestres, aerotransportados ou orbitais óticos e por dados de radar e/ou LIDAR (*Light Detection And Ranging*). No entanto, essas fontes apresentam alto custo na aquisição e/ou análise, pois envolvem equipes altamente especializadas, softwares específicos e hardwares de alto desempenho [3].

Com a modernização dos meios cartográficos e o grande consumo de recursos computacionais a coleta de informações terrestres ficou mais rápida e real. Ao utilizar variações de topografia por modelos digitais 3D, construídos em uma base de nuvens de

pontos coletados de forma direta, com uso de GNSS Geodésico, e de forma indireta através de fotogrametria com VANT, surge a necessidade de diferenciar um MDT de um Modelo Digital de Superfície (MDS). Para Dalmolin (2018), MDT corresponde ao modelo do terreno e MDS ao modelo da superfície dos objetos 3D existentes sobre o terreno (vegetação, edificações, etc.).

Vale ressaltar que o MDT capta apenas as informações relacionadas as variações de cotas do terreno trabalhando, portanto, apenas com dados de altitude. Com relação ao MDS, este leva em consideração não só a superfície do terreno propriamente dita, mas também as copas das árvores (áreas vegetadas) e as edificações presentes em uma imagem [6]. Então no presente trabalho será considerado como objeto de estudo o MDT que considera a variação de cota (elevação) do terreno.

### **Ortofoto**

A forma como se representa as feições ortogonalmente, são através das ortofotos, onde são corrigidos deslocamentos de relevo e possíveis rotações de câmera. Esse produto é equivalente a um mapa, ou seja, foto com perspectiva ortogonal. As imagens adquiridas por câmeras convencionais encontram-se em perspectiva central, com os inúmeros raios de luz advindos de diferentes pontos de imagem, passando por um só ponto (centro perspectivo), localizado no sistema óptico da câmera. O conjunto desses raios é chamado de feixe perspectivo [7].

De acordo com [8], as ortofotos podem ser classificadas em tradicionais ou verdadeiras. As ortofotos tradicionais não apresentam projeção ortográfica em elementos com elevação acima do solo, utilizando-se o modelo digital de terreno como base para sua geração, sendo desconsideradas edificações ou feições naturais que cobrem o solo. Por outro lado, as ortofotos verdadeiras (trueortofotos) apresentam as projeções ortográficas em toda a área mapeada, pois utiliza o MDS, considerando o solo e todos os elementos sobre o solo.

### **Pontos de controle**

Podem ser chamados de Pontos de Controles, detalhes ou imagens que apareçam de forma nítida nas fotografias do voo realizado com o equipamento. Esses pontos são responsáveis por fazer a ligação entre o sistema de coordenadas das imagens registradas com as coordenadas do terreno. Resumidamente, são pontos usados como fonte de referência no solo e utilizados posteriormente no processamento das fotografias aéreas aumentando a precisão do produto final gerado.

Para obter uma melhor precisão do produto gerado, é conveniente utilizar pontos de controle e pontos de checagem para controle de qualidade durante o processamento fotogramétrico. Esses pontos servem de suporte para o aumento da precisão do mosaico de imagens gerado com o VANT, já que projetos de engenharia exigem variação mínima possível [9].

Nos serviços realizados com VANT em mineração os pontos de controles usados são do tipo artificiais, já que a área de voo tem normalmente uma aparência homogênea. Isso impossibilita marcar pontos no próprio terreno, no estudo de caso foi usado pontos (Figura 1). Um desses tipos de alvos destacados na Figura 1 é impresso e locado nos locais pré-determinados como pontos de controle do geoprocessamento.

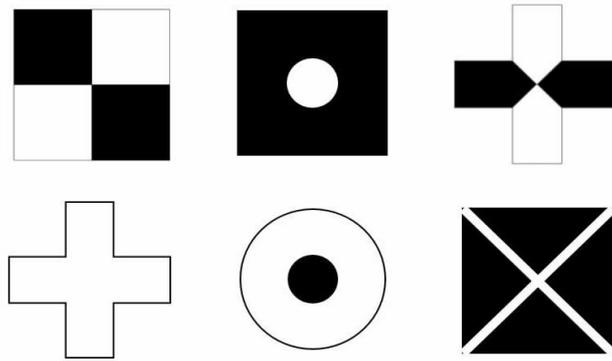


Figura 1: Exemplos de Pontos de controle usuais (Fonte: autoria própria).

Dessa forma, previamente são distribuídos alvos artificiais que servem como pontos de controle pelo terreno que será sobrevoado. Esses pontos são retirados após o término do voo. Tendo em mente que esses pontos servem para ligar as imagens com uma maior acurácia para o aerolevanteamento, esses pontos devem ter suas coordenadas coletadas com receptor GPS geodésico de alta precisão. Esses receptores são capazes de coletar dados com precisão milimétrica, apropriada para o cálculo de volumes das pilhas em questão no presente estudo de caso.

O receptor de sinal geodésico de alta precisão é usado para aumentar o nível de confiança dos pontos que formam a nuvem de pontos do voo com VANT, dessa forma o erro da imagem quando processada no software é minimizado. Vale ressaltar que quanto mais tempo a base do GPS permanecer fixada e coletando dados, maior é o nível de precisão do trabalho final.

### **Modelagem do voo**

Para modelagem dos voos é usado o software chamado Agisoft PhotoScan, que cria um mosaico de nuvens de pontos em três dimensões a partir das fotos tiradas pelo VANT, modelo Phantom 4, durante o voo na área. O sistema do programa é bem usual e fácil de operar, facilitando o tratamento do conjunto de fotos carregadas no sistema.

O sistema do programa Agisoft PhotoScan cria modelos de superfícies, que são gerados a partir do conjunto (nuvens) de pontos, conhecidos também como pixels, gerando modelos: Modelo Digital de Superfície (MDS); Modelo Digital do Terreno (MDT); Modelo Digital de Elevação (MDE). O Modelo Digital de Superfície é que permite gerar uma representação de todos os elementos e objetos sobre a superfície do solo. O Modelo Digital do Terreno é que permite a representação da topografia do terreno excluindo os elementos sobre o solo, como por exemplo, árvores, casas, equipamentos, veículos e etc. E o Modelo Digital de Elevação é que permite a captura e determinação das diferentes cotas existentes do terreno.

Na aerofotogrametria, um dos produtos mais utilizados é a Ortofoto, que consiste em uma fotografia aérea onde as feições são projetadas de forma ortogonal em toda a imagem. A partir deste produto é possível realizar vetorizações de feições existentes, acompanhamento temporal de obras, exploração de áreas inacessíveis, entre outras aplicações [9].

### **METODOLOGIA**

Para levantamento dos dados necessários para realização do estudo de caso são percorridas algumas etapas, que dão um melhor embasamento ao trabalho. Desde a primeira etapa que é a escolha do equipamento a ser usado até a etapa de cálculo do volume das pilhas nos pátios de britagem e de estocagem, quanto maior o conhecimento sobre o material estudado,

melhores e mais assertivos serão os resultados obtidos. Então como forma de comprovação do cálculo de volume através dos softwares, previamente foi realizado um ensaio onde uma pequena quantidade de material foi pesada numa balança rodoviária fixa e depois formada uma pilha secundária, o seu volume foi medido e comparado.

Para um cálculo da massa de agregados contidos nas pilhas com eficiência tornou-se necessário a determinação das densidades aparentes de cada um dos tipos de produtos e rejeitos da pedreira, assim como a análise granulométrica, que permite um melhor entendimento do material que está sendo analisado.

## **Seleção do VANT**

Para a realização do presente trabalho foi utilizado o VANT, modelo Phantom 4, que possui uma câmera de alta resolução e fácil manipulação. O equipamento foi usado para realizar voos na área da Pedreira Superbritas com objetivo de recolher imagens com qualidade que permita o tratamento e processamento topográfico das imagens.

## **Geoprocessamento**

O processamento das imagens obtidas dos voos com o VANT é realizado através do Agisoft PhotoScan, empregando um algoritmo semelhante ao SIFT (Scale-invariant feature transform) com a finalidade de alinhar as fotografias capturadas e criar pontos de amarração nos centros das imagens. Primeiramente o programa faz um alinhamento das imagens segundo a posição e orientação na qual a câmera esta acoplada no equipamento.

Posteriormente, o software utiliza como parâmetros de calibração os coeficientes de transformação de inclinação, de distorção radial e de distorção tangencial [10]. De acordo com [11], é obtida uma orientação da câmera por sequência de procedimentos, que se inicia pela transformação das coordenadas do sistema de máquinas para um sistema com origem no centro da imagem. Posteriormente faz-se uma translação do ponto principal, e finalmente a correção dos erros sistemáticos.

## **Ajuste da Superfície por Triangulação**

Os Modelos Digitais de Terreno (MDT) utilizam grades regulares retangulares quando se tem pouca variação de elevação e de grades irregulares triangulares nos casos onde apresentam elevada descontinuidade [12]. Então após feito o alinhamento das imagens no software realiza-se a amarração das imagens capturadas por triangulação para construção do MDT. Então o programa gera um espaço paramétrico  $(u, v)$  que é topologicamente igual à superfície original triangulada, mas de geometria distinta, que permite o mapeamento através de triângulos equiláteros [13]. Com base na triangulação descrita o programa faz a modelagem geométrica tridimensional, do que resulta numa descrição fiel da superfície geológica do terreno, como mostrado na Figura 2.

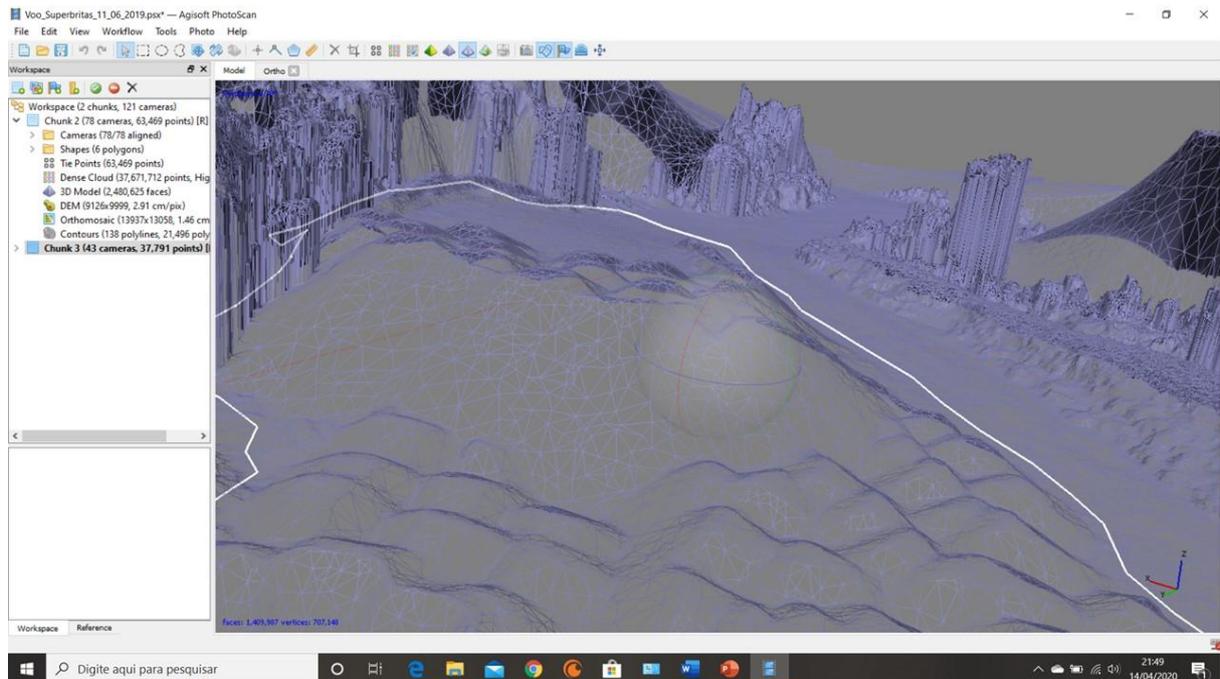


Figura 2: Modelagem geométrica tridimensional feita no AgiSoft (Fonte: autoria própria).

### Ensaio de validação do cálculo de volume de pilhas com VANT

Como forma de validação do método de cálculo de volume de pilhas utilizando o VANT, foi realizado um ensaio com auxílio de um caminhão caçamba, balança rodoviária fixa e imagens captadas com uso do VANT. O objetivo do ensaio foi o de comparar os resultados obtidos com as diferentes técnicas de estimativa de massa.

No ensaio, primeiramente, um caminhão caçamba (Figura 3a) foi pesado vazio na balança rodoviária fixa, servindo como tara para o experimento. A massa registrada pelo equipamento foi de 10.200 kg; esse valor foi armazenado no sistema de programação. Realizada a tara, então o veículo dirigiu-se até o pátio da usina de britagem, onde uma pá carregadeira o completou com material da pilha de Brita 3/8". O caminhão retornou à balança e foi então pesado com a carga (Figura 3b). Na sequência o caminhão retornou ao pátio de britagem e basculou a carga numa superfície plana, formando uma pilha secundária de Brita 3/8" (Figura 3c). Por fim, com o VANT modelo Phantom 4, foi realizado um voo para capturar imagens dessa pilha de material.



Figura 3: Ensaio para validação do uso de VANT para estimativa de massa: a) Caçamba sendo carregada com Brita 3/8". b) Caçamba sendo passada na balança rodoviária fixa. c)

Imagens da pilha secundária de Brita 3/8” que vai ser usada no ensaio. (Fonte: Autoria própria)

## Planejamento de missões aéreas

Para planejar os voos foram usados dois softwares, Google Earth e o Dronedeploy. O primeiro foi usado para ter uma base (pré-determinação) da localização da área onde se deseja fazer o estudo. Nele é possível, com maior facilidade, determinar o formato da área (Figura 4) onde se deseja realizar o voo e desenhar a poligonal desejada. Para seu uso, também foi levada em consideração a maior facilidade de determinação das coordenadas da localidade.

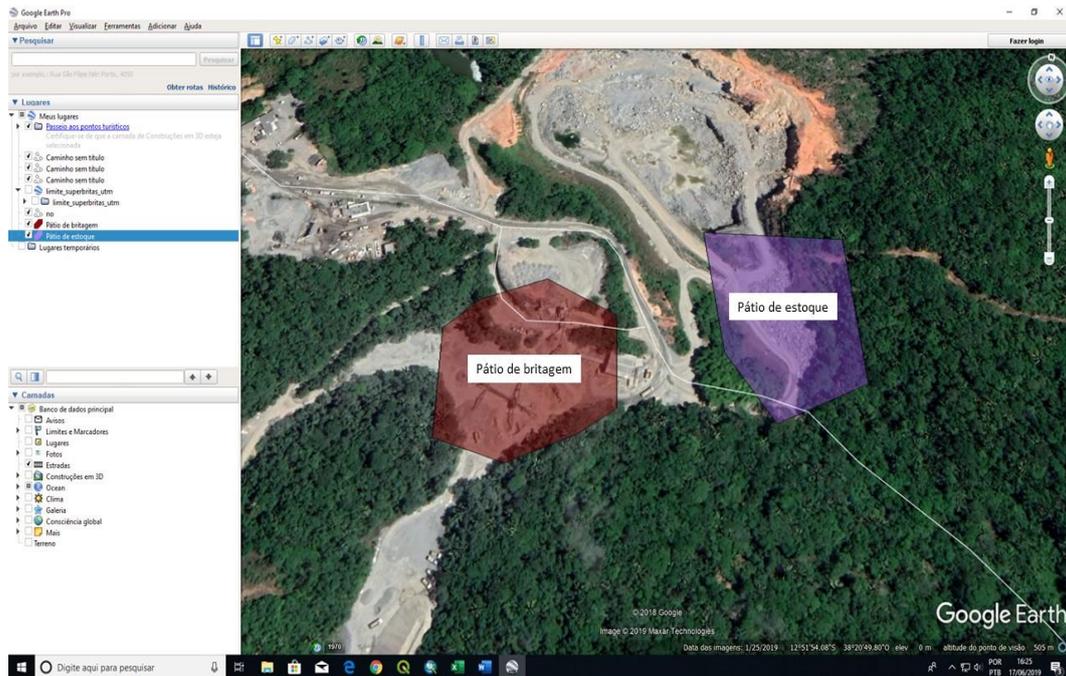


Figura 4: Definição das poligonais dos voos (Fonte: autoria própria).

O Dronedeploy foi utilizado por sua vez, no planejamento do voo. A área definida no software anterior foi importada e a partir daí foi possível planejar e definir: número de baterias, altitude do equipamento; ponto de partida e encerramento do trajeto, Figuras 5.

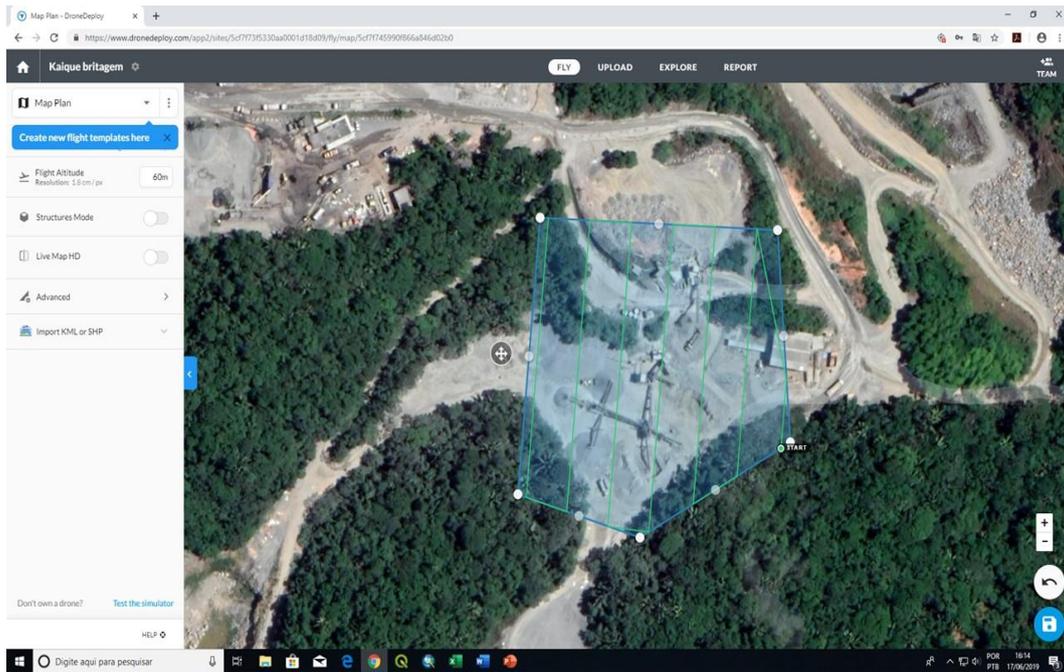


Figura 5: Planejamento do voo do pátio de britagem (Fonte: autoria própria).

Antes da realização do voo foi instalado o GPS Geodésico nos pontos previamente determinados (Figura 6a), deixando a base fixa e a base móvel o tempo necessário para coleta do sinal nos pontos demarcados previamente como pontos de controle do voo nas etapas ilustradas nas Figuras 5. Tendo sido cumpridas as etapas anteriores, foi realizado o voo com o VANT (Figura 6b).

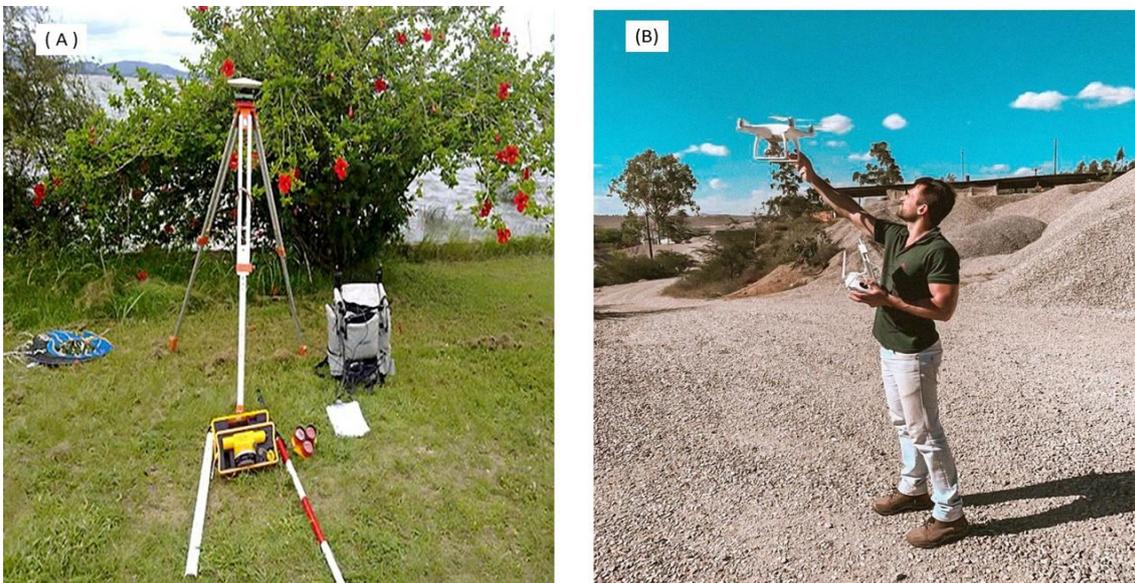


Figura 6: a) Receptor de sinal Geodésico. b) Voo realizado com o VANT modelo Phantom 4. (Fonte: autoria própria).

### Amostragem de agregados

A amostragem dos diferentes produtos da Pedreira Superbritas foi realizada conforme procedimentos descritos na Norma NBR NM 26: Agregados – Amostragem [14], que tem como objetivo estabelecer os procedimentos para amostragem de agregados, desde sua extração

e redução até seu armazenamento, de forma que seja homogênea e representativa. Como não se dispunha de equipamento mecânico para obtenção de uma pilha secundária de material foi realizada a coleta dos incrementos em várias posições da pilha e de forma aleatória, como descrita na norma. Logo, as amostras primárias de campo foram formadas através da composição de pelo menos três incrementos, que foram recolhidas no topo, no meio e na base da pilha, tanto na sua superfície como no seu interior.

### **Redução da amostra de campo**

A redução de amostra de campo foi realizada conforme descrito na Norma NBR NM 27: Agregados – Redução da Amostra de Campos para Ensaios de Laboratório [15]. As amostras coletadas nas pilhas, classificadas como agregados miúdos, foram submetidas a processos de homogeneização e quarteamento, no próprio campo, com o auxílio do quarteador Jones. Já as amostras classificadas como agregados graúdos foram homogeneizadas e quarteadas com o método de pilha cônica. As amostras reduzidas/parciais de cada pilha, aproximadamente 25 kg, foram encaminhadas para ensaios em laboratório.

### **Análise granulométrica**

A análise de composição granulométrica das amostras coletadas nas pilhas formadas pelos produtos e rejeitos da Pedreira Superbritas foi realizada segundo a Norma NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica [16]. Para realização desse estudo foram utilizados: balança; estufa; peneiras; agitador mecânico de peneiras; bandejas; escova ou pincel; fundo avulso de peneiras.

Os ensaios de análise granulométrica foram realizados após a redução da massa das amostras coletadas em campo, de modo que as massas mínimas utilizadas foram superiores àquelas recomendadas pela mencionada norma.

Após secagem em estufa, as mesas amostras foram resfriadas à temperatura ambiente e levadas a balança para a determinação das suas massas. Foi então selecionado o conjunto de peneiras usado para cada produto da britagem que foi amostrado do campo. As peneiras foram previamente limpas e encaixadas de modo a formar um único conjunto de peneiras com abertura das malhas em ordem crescente da base para o topo.

Com o conjunto de peneiras selecionadas e devidamente encaixadas, promove-se a agitação mecânica do conjunto no Ro-tap, por um tempo razoável que permita a separação e classificação prévia dos diferentes tamanhos de grãos da amostra. No presente experimento foi usado o tempo de 15 minutos para material mais grosseiro e de 25 minutos para amostras de material mais fino.

### **Determinação de densidade aparente (agregado graúdo)**

É considerado como agregado graúdo o material que tem a sua maior parte retida na peneira de 4,75 mm. Para determinação da densidade aparente levou-se como parâmetro o experimento descrito na NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água [17], que dispõe de roteiro para certificar que os processos são feitos da melhor forma possível e obter resultados mais confiáveis.

Para realização do experimento foram necessários os seguintes equipamentos: Balança com capacidade mínima de 10 kg e resolução de 1 g; Recipiente que deve ser um cesto de arame com abertura de malha igual ou inferior a 3,35 mm e capacidade para 4 dm<sup>3</sup> a 7 dm<sup>3</sup>; Estufa para secagem; Pano para secagem e manter o material úmido; Balde com água.

### **Determinação de densidade aparente (agregado miúdo)**

Para a determinação de densidade aparente de agregados miúdo será usado como roteiro a NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente [18]. É considerado como agregado miúdo material que passa na peneira com abertura de malha 9,5 mm, que passa quase totalmente na peneira de malha 4,75 mm e fica retido na peneira com malha de 75 micra. A massa mínima usada para o ensaio será de 1 kg, obtido através do quarteamento e redução da amostra de campo.

### **Estimativa de densidade aparente da pilha pulmão**

A estimativa da densidade aparente da pilha pulmão foi realizada através de um experimento realizado com uma pá carregadeira (VOLVO L90-F) com capacidade de concha nova de 2,50 m<sup>3</sup> - segundo catálogo do fabricante. Primeiramente foi pesada a pá carregadeira vazia na balança rodoviária fixa, valor esse que serve como tara no experimento. Então a carregadeira se dirigiu até o pátio e carregou sua concha com material da pilha pulmão, a quantidade de material que forma o chamado coroamento (excesso) da concha foi removido, garantindo que o volume da concha seja o real informado pelo fabricante, então a carregadeira retornou para balança fixa, onde foi pesado novamente com sua concha cheia. O processo foi repetido três vezes, para aumentar seu nível de confiança e diminuir os erros acumulativos do processo.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **Validação do método**

Com as imagens coletadas durante o voo com o equipamento, foi feito o geoprocessamento no software *Agisoft PhotoScan*. Na Figura 7a as fotos estão emparelhadas e montadas no programa, envolvendo todo o entorno da pilha. Então foi possível gerar uma nuvem densa de pontos e uma MDT, a partir de onde foram delimitadas as saias e a modelagem das pilhas concluindo assim o cálculo do volume de material (Figura 7b e 7c).

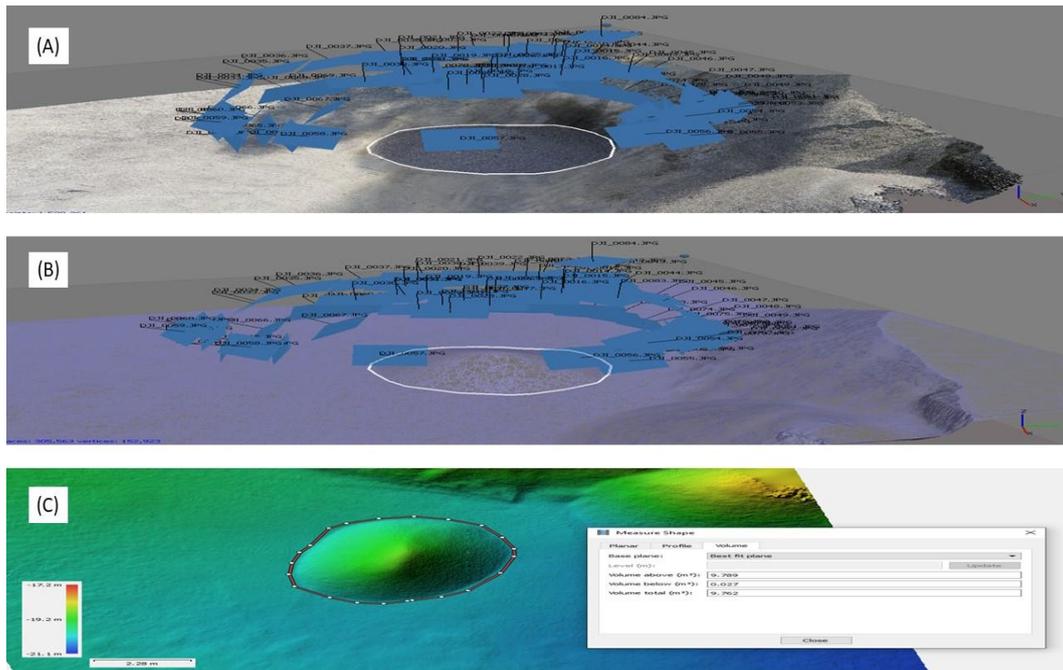


Figura 7: a) Geoprocessamento das imagens registradas pelo VANT no AgiSoft PhotoScan: fotos alinhadas; b) triangulação da superfície; c) delimitação da saia da pilha e volumetria. (Fonte: Hammer Consultoria e Mineração).

O geoprocessamento da imagem gerou um volume de 9,762 m<sup>3</sup>, com o valor de densidade aparente desse material encontrado nos ensaios de laboratório, foi calculado o valor em massa do material. Multiplicando assim o volume (m<sup>3</sup>) encontrado pela densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>) da Brita 3/8', obtendo um valor de 14,450 toneladas de material.

A partir de então foi feita uma comparação entre os valores encontrados através do peso medido pela balança rodoviária fixa que foi de 13,410 toneladas e o encontrado pelo AgiSoft, que foi de 14,450 toneladas, uma diferença de 1,04 toneladas, que corresponde a uma variação de 7,76 % entre os valores pesados na balança e o geoprocessamento. Essa diferença se torna relativamente pequena quando levado em consideração a quantidade de toneladas movimentada no empreendimento dentro do período em estudo, tornando o método de medição confiável.

### Cálculo do volume das pilhas

O geoprocessamento das imagens no AgiSoft permitiu montar um quebra cabeça ligando as fotografias tiradas pelo equipamento durante o voo. Ou seja, foi feito um alinhamento fotográfico, onde as fotos se encaixam e juntamente com as informações do GPS Geodésico de precisão foi feita a união das imagens; os pontos de controle dão precisão em nível de centímetros. A Figura 8 mostra o alinhamento das fotografias tiradas pelo equipamento.

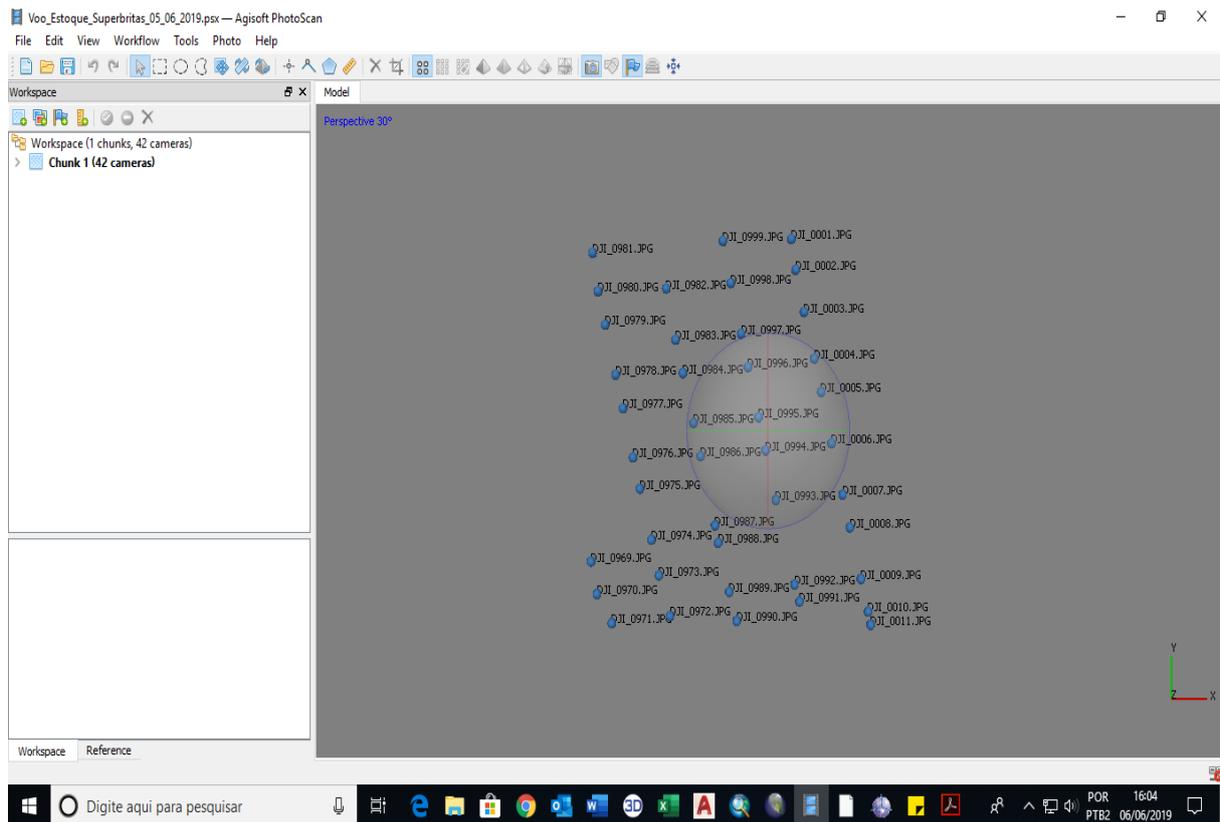


Figura 8: Alinhamento das imagens tiradas pelo Drone durante o voo (Fonte: autoria própria).

A partir da junção dessas informações foi criada a nuvem densa de pontos e a Ortofoto (Figuras 9 e 10) ou Ortomosaico (como também é chamada) da área mapeada topograficamente através do equipamento. Após a modelagem do terreno no AgiSoft, obteve-se como produto a ortofoto com as características do terreno, podendo ser extraída as curvas de nível do local sobrevoado.



Figura 91: Ortofoto do Pátio de Britagem (Fonte: autoria própria).



Figura 10: Ortofoto do Pátio de Estoque (Fonte: autoria própria).

Com a chamada Dense Cloud (nuvem de pontos), pode ser diferenciada e classificada o que seria terreno (solo) de vegetação da imagem. A partir daí foram delimitadas as saias de cada pilha (Figura 11), então adicionando ao software uma cota média como base da pilha o volume

de cada uma das pilhas em análise pode ser determinado. Na Tabela 1 estão listados os resultados do geoprocessamento das imagens obtidas nos voos dos dias 05/06 e 11/06 com o VANT.



Figura 11: Saídas das pilhas definidas (Fonte: autoria própria).

Tabela 1: Listagem dos resultados do Cálculo de Volume das Pilhas para os dois geoprocessamentos (Fonte: autoria própria).

<b>Pilha</b>	<b>05/jun Volume (m³)</b>	<b>11/jun Volume (m³)</b>
Pulmão	2410,29	2683,21
Bota Fora	2139,83	1875,63
Brita 01	1,88	0,00
Brita 5/8"	894,32	863,66
Brita 3/8"	379,74	264,35
Pó de Brita 01	1882,43	1140,83
Pó de Brita 02	236,14	466,07
Estoque	1699,97	2021,09

Da Tabela 1 observa-se que a quantidade de material fino estocada no empreendimento é enorme, ocupando uma área considerável do pátio do empreendimento. Com isso os materiais denominados de Pó de Brita 01 e 02 se tornaram um grande problema na pedreira.

### **Balço de massa local integral no circuito de britagem da Pedreira Superbritas**

Para avaliar a utilização do uso de VANT na estimativa de volumes, e conseqüentemente a determinação direta dos valores de massa de cada uma das pilhas dispostas nos pátios de britagem e estocagem da pedreira, foi realizado o balanço de massa local integral no circuito de britagem da Pedreira Superbritas. Com isso foi determinado as toneladas de cada uma das pilhas (Figura 11) em duas datas distintas.

A partir das imagens coletadas com os voos realizados com o VANT nos dias 05/junho e no dia 11/junho foram obtidos os resultados listados na Tabela 2. Nesta tabela estão sumarizados os resultados de volume (m<sup>3</sup>), densidade (g/cm<sup>3</sup>) e a massa (t) de cada uma das pilhas do pátio de britagem e do pátio de estocagem. Os valores de massa (t) foram encontrados através do produto entre o volume medido e a densidade aparente determinada para cada agregado/pilha.

Tabela 2: Resultado do cálculo de tonelage de cada uma das pilhas (Fonte: autoria própria).

PILHA	05/jun			11/jun		
	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Massa (t)	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Massa (t)
Pulmão	2410,29	1,39	3339,05	2683,21	1,39	3717,14
Bota Fora	2139,83	1,52	3252,54	1875,63	1,52	2850,96
Brita 01	1,88	1,39	2,61	0,00	1,39	0,00
Brita 5/8"	894,32	1,42	1269,93	863,66	1,42	1226,40
Brita 3/8"	379,74	1,48	562,02	264,35	1,48	391,24
Pó de Brita	1882,43	1,67	3143,66	1140,83	1,67	1905,19
Pó de Brita	236,14	1,61	380,19	466,07	1,61	750,37
Estoque	1699,97	1,67	2838,95	2021,09	1,67	3375,21
	<b>Total: 14788,94</b>			<b>Total: 14216,51</b>		

Com o resultado do geoprocessamento dos voos realizados, foi calculado que no dia 05/06 no pátio do empreendimento havia 14.788,94 toneladas de material e no dia 11/06 havia 14.216,51 toneladas. A partir desses valores foi possível realizar um balanço de massa local integral do que foi produzido na pedreira no intervalo de tempo considerado. Esses valores serão usados como comparativo, uma vez que são conhecidos os valores de massa que entrou no circuito de britagem (registro da balança integradora) e os valores em tonelage de material que foi retirado do empreendimento (registro da balança rodoviária fixa). Esse balanço também pode ser chamado de Inventário. Vale ressaltar que o empreendimento funcionou normalmente entre os dias 05/06 a 07/06, e entre os dias 08/06 e 11/06 a empresa estava de férias coletivas, somente existindo venda de material e a produção estava paralisada.

### Balanço de massa global integral do circuito de britagem

Na intenção de comparar os resultados, foi realizado o balanço de massa global integral do circuito, com os dados de entrada e de saída de material na usina da Pedreira Superbritas. O balanço de massa integral global foi feito com o levantamento das informações obtidas da balança integradora, que mede a tonelage de material que entra na usina, e da balança rodoviária fixa, que mede a tonelage do material que é vendido pelo empreendimento. A diferença entre esses valores determina o balanço integral global do circuito de britagem. Essas informações servem de comparação na validação do método de medição volumétrica das pilhas através do geoprocessamento das imagens coletadas com o uso do VANT.

A balança integradora (I40 – PRECIA MOLEN) com capacidade de 200 t/h foi instalada na correia transportadora abaixo da pilha pulmão de onde retomam o minério britado até a primeira unidade de classificação. Esse equipamento é usado rotineiramente no levantamento de dados para o fechamento do balanço de massa do circuito de britagem do empreendimento, informando a quantidade de material que passa na correia transportadora em tempo real. O equipamento disponibiliza também o somatório de todo material que foi pesado desde sua última aferição. Rotineiramente são feitas anotações, em todo final e começo de turno, o valor é informado em toneladas no painel do equipamento. Dessa forma

foi possível verificar a quantidade de material que passou pela usina entre o intervalo de dias que foram realizados os voos (Tabela 3).

Tabela 3: Valores apresentados nos equipamentos (Fonte: autoria própria).

<b>Equipamento</b>	<b>Data</b>	<b>Marcação (t)</b>
Balança Integradora	05/jun	601.554
Balança Integradora	07/jun	605.221

Os valores mostrados na balança integradora estão em toneladas, logo a diferença de massa que passou pelo equipamento no intervalo de dias em que foram realizados os voos foi de 3.667 toneladas. Essa foi a quantidade de material que foi produzido na pedreira durante o intervalo de tempo.

A balança rodoviária é o equipamento usado como medidor de todo material que foi vendido no empreendimento. Entre os dias 05/junho e 11/junho (data de realização dos voos) a pedreira esteve em produção nos dias 05, 06 e 07, porém o empreendimento continuou a vender material até a data 11/junho. Essa quantidade de material vendida foi disponibilizada, o valor total foi de 4.478,55 toneladas.

Como procedimento de rotina nas vendas de material na pedreira, todo caminhão que entra e sai do empreendimento é pesado vazio (na entrada) e pesado cheio (na saída). Dessa forma tara-se cada um dos caminhões e registrando-os no sistema, que já informa no monitor, ao controlador da pesagem, a massa total (toneladas) de material que está sendo vendido. Essa medida mostrada pela balança rodoviária será dita como confiável, uma vez que é o método usado pelo empreendimento como forma de vender seu material cotidianamente.

Dessa forma com os dados das balanças integradora e rodoviária fixa foi elaborado um fluxograma ilustrativo da produção do empreendimento no período em estudo (Figura 12). Observa-se que no período em análise o empreendimento vendeu mais material do que produziu, conclusão tomada devida a quantidade de material nos pátios do empreendimento ter diminuído entre as duas medições.

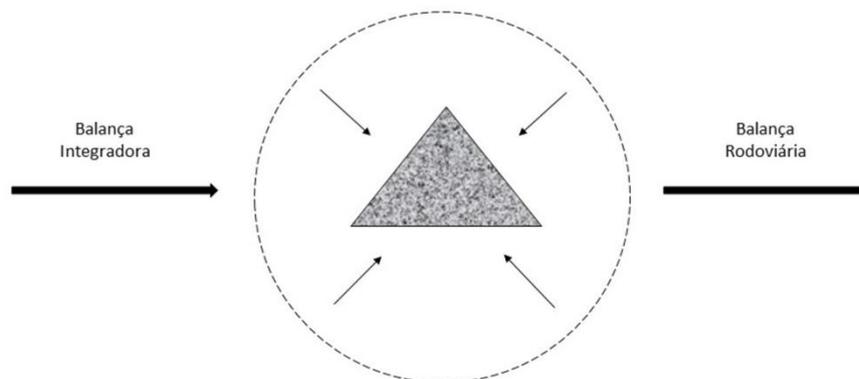


Figura 12: Fluxograma do balanço integral da pedreira (Fonte: autoria própria).

A partir dos dados levantados foi possível realizar um inventário do que foi produzido e confirmar a eficácia do método de levantamento volumétrico por imagens, obtidas com uso de VANT. Foi possível determinar, por exemplo, a quantidade de material produzido no empreendimento sem necessariamente a presença da balança integradora, uma vez que a maioria das pedreiras de pequeno e médio porte não dispõe de capital suficiente para implantação desse equipamento em quantidades suficientes de correias transportadoras em suas usinas de beneficiamento, além de não manterem o equipamento devidamente calibrado para garantir a confiabilidade dos dados gerados. Como a balança rodoviária fixa informa que foi vendido 4.478,55 toneladas de agregado no período e com o geoprocessamento das imagens a variação de massa no pátio foi de 572,43 toneladas, logo a diferença entre esses

valores determina quanto de material foi tratado na usina de britagem. Essa diferença foi de 3.906,12 toneladas, como a balança integradora informa um valor de 3.667 toneladas, uma diferença de 239,12 toneladas que representa um erro de 6,52 %, valor aceitável levando em consideração a massa de material em análise.

### **Estimativa indireta da densidade aparente dos agregados**

A determinação da massa (tonelagem) dos diferentes produtos numa pedreira pode ser feita de forma direta, através do uso de balanças integradoras associadas às correias transportadoras ou pela pesagem dos caminhões carregados em balanças rodoviárias. Alternativamente, a quantificação dos diferentes produtos pode ser realizada de forma indireta através da integração dos volumes das pilhas dos produtos, em diferentes momentos, com as respectivas densidades aparentes.

Os valores de densidade aparente de cada um dos agregados em questão foram determinados para agregados graúdo e miúdo, respectivamente conforme [18] e [17]. Esses valores são importantes, pois a partir deles as massas de material presentes em volumes previamente conhecidos (caçambas, conchas e pilhas) puderam ser determinadas. Porém, a realização de ensaios para determinação dessa propriedade física dos agregados é pouco frequente nos empreendimentos de mineração, motivo pelo qual as empresas usam em seus inventários de produção um único valor de densidade aparente para diferentes tipos de agregados, podendo embutir erros significativos de estimativas de massa.

Para minimizar os inconvenientes relacionados a ausência de instrumentação para a aferição de massas dos estoques da Pedreira Superbritas e viabilizar o uso da geotecnologia para este fim, neste trabalho foram realizadas investigações para encontrar correlações entre a granulometria dos diferentes produtos da Pedreira e a correspondente densidade aparente.

Os resultados dos ensaios de caracterização granulométrica e de determinação da densidade aparente dos diferentes produtos da Pedreira Superbritas, são apresentados no presente trabalho, indicam uma forte correlação entre o diâmetro mediano da distribuição granulométrica ( $d_{50}$ ) e as correspondentes densidades aparentes. Uma regressão potencial com coeficiente de determinação  $R^2$ , igual 0,9971, equação x, foi obtida para relacionar essas variáveis de tal sorte que apenas 0,003 % das correlações entre os valores analisados não são explicados pelo modelo.

$$\rho_a = 2,2754 \times (d_{50})^{-0,05} \quad (1)$$

Através dessa equação de regressão foi possível determinar a densidade aparente do material sabendo a distribuição granulométrica com exatidão. O emprego desta metodologia aumenta a rapidez da análise dos resultados, já que não seriam necessários ensaios de laboratório para determinação de densidade aparente. Vale ressaltar que nem todos os empreendimentos dispõem de laboratórios e nem recursos para realização de ensaios, tornando essa informação ainda mais importante.

### **CONCLUSÕES**

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a aplicação do uso de VANT, como ferramenta auxiliar na elaboração de inventários em empreendimentos mineiros, nesse caso referente à Pedreira Superbritas. Para tanto foram realizadas análises granulométricas, ensaios para determinação de densidade aparente de agregados e balanço de massa local e global integrais.

Para justificar a utilização do geoprocessamento das imagens captadas com uso de VANT e sua consequente validação foi necessário realizar algumas etapas ao longo da elaboração do presente estudo de caso. Antes da medição volumétrica das pilhas dos produtos da usina de britagem foi realizado um ensaio comparativo, onde a massa de uma pilha secundária formada foi pesada na balança rodoviária fixa e comparada com a tonelagem calculada com o geoprocessamento das imagens. A diferença de valores encontrada foi de 7,76 %, confirmando a eficácia do método de medição indireta de massa por aerofotogrametria.

Ao realizar o inventário da Pedreira Superbritas chama atenção a quantidade de fino presente no pátio de britagem e estocagem do empreendimento. No primeiro dia do voo realizado com VANT as pilhas de fino somavam uma massa de 3.818,54 toneladas e no segundo 3.627,99 toneladas, uma quantidade expressiva de material. Com tanto material fino acumulado em estoque, torna-se necessário uma análise quanto a possibilidade da empresa aproveitar esse material como subproduto de algo, por exemplo, como matéria-prima na produção de fertilizantes, como material para aterro, dentre outras aplicações que são utilizadas por outras empresas do ramo.

De posse do inventário do empreendimento foi possível realizar o balanço de massa local e global integral do circuito de britagem. Logo as informações da balança integradora, balança rodoviária fixa e do geoprocessamento foram confrontadas, confirmando assim a eficácia do levantamento realizado com VANT para cálculo de volumetria das pilhas. A partir dos dados levantados com a caracterização do material foi possível encontrar uma correlação entre o  $d_{50}$  e a densidade aparente, que torna possível a determinação indireta da densidade sem a realização de ensaios de laboratório. Esses métodos tornam a realização do balanço de massa mais rápido e eficiente. Vale ressaltar que um conhecimento aprofundado do balanço de massa do empreendimento permite um controle de produção ideal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VASCONCELOS, S. **Determinação de Volumes e Áreas em Mineração a Céu Aberto Utilizando Drones**. Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco, Recife, 2018.
- [2] RIBEIRO JÚNIOR, S. **Determinação de Volumes em Área de Mineração Utilizando ferramentas do Sensoriamento Remoto**. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, Viçosa, 2011.
- [3] OLIVEIRA, D. **Geração de Modelo Digital de Terreno a Partir de Imagens Obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado**. Revista Brasileira de Cartografia, Edição de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, N 69/6: 1143-1151. Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- [4] RODRIGUES, M. **Anais da quarta conferência latino-americana sobre sistemas de informação geográfica/segundo simpósio brasileiro de geoprocessamento**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. São Paulo, 2003.
- [5] COELHO, L.; BRITO, J.N. **Fotogrametria Digital**. Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.
- [6] NÓBREGA, D. G; MOURA, S.R. **Mapeamento Planialtimétrico para Estudo de Viabilidade na Implantação de Reservatórios de Água na Zona Sul de Porto Alegre Utilizando Métodos Fotogramétricos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- [7] NÓBREGA, D. G; MOURA, S.R. **Mapeamento Planialtimétrico para Estudo de Viabilidade na Implantação de Reservatórios de Água na Zona Sul de Porto Alegre**

**Utilizando Métodos Fotogramétricos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

[8] JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** *University of South Carolina* (J. C. Epiphany, Ed.) São Paulo, São José dos Campos, 2009.

[9] BRAGHIROLI, G. **Influência da Quantidade de Pontos de Controle no Processamento de Imagens Aéreas Obtidas por RPAS.** XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São Paulo, Santos, 2019.

[10] ANDRADE, J. B. **Fotogrametria,** SBEE, Rio Grande do Sul, Curitiba, 1998, 258p.

[11] REISS, M. L. L. **Restituição Fotogramétrica Flexível de Imagens à Curta Distância: estudo de método e desenvolvimento de protótipo.** Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciência e Tecnologia. São Paulo, Presidente Prudente, 2002.

[12] NAMIKAWA, L. M. **Um Método de Ajuste de Superfícies para Grades Triangulares Considerando a Quebra de Continuidades das Linhas Características.** Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo, 1996.

[13] MIRANDA, A. C.; MARTHA, L. F. **Geração de Malhas Estruturadas a Partir de um Espaço Paramétrico de Triangulações não Estruturadas.** Departamento de Engenharia Civil e Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica. Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

[14] ABNT. NBR. NM 26 – **Agregados – Amostragem.** 2009.

[15] ABNT. NBR. NM 27 – **Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.** 2001.

[16] ABNT. NBR. NM 248 – **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** 2003.

[17] ABNT. NBR. NM 53 – **Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** 2009.

[18] ABNT. NBR. NM 52 – **Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** 2009.