

EXTRAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA DA ORIENTAÇÃO DE DESCONTINUIDADES COM MODELO TRIDIMENSIONAL DE TALUDES OBTIDO POR FOTOGRAMETRIA DIGITAL

Daner Valcarenghi dos Santos

Orientador: Ítalo Gomes Gonçalves

RESUMO

Neste trabalho aplica-se um método para a obtenção dos valores do mergulho e da direção do mergulho de descontinuidades em taludes de uma mineradora de calcário, sem que haja a utilização de bússolas e quaisquer tipos de levantamentos próximos a áreas suscetíveis de risco e por último as análises cinemáticas que tratam dos potenciais de ruptura das bancadas em questão. Para tal foram usados como ferramentas a fotogrametria digital e *softwares* específicos para o tratamento dos dados. A principal motivação é o emprego de novas tecnologias para a realização de tarefas que tradicionalmente são manuais, árduas e que requerem grande disposição de tempo, aqui com custo atrativo e de acesso simplificado. Foram selecionados dois taludes com estruturas distintas e cujas praças não encontram-se em avanço, dos mesmos foram adquiridas imagens em duas dimensões que por conseguinte deram origem aos modelos tridimensionais dos quais foram extraídos os valores das orientações de 3 descontinuidades para o primeiro talude e de 44 para o segundo. Os resultados comprovam a viabilidade e o êxito da metodologia e os diagramas gerados tendem a confirmar isso, uma vez que corroboram com observações técnicas feitas em campo bem como nos próprios modelos 3D.

Palavras-chave: descontinuidades, fotogrametria, nuvem de pontos, modelo 3D, análise cinemática.

ABSTRACT

In this work, a method is applied to obtain the values of the dip and dip direction of the discontinuities in slopes of a limestone mining company, without the use of compasses and any kind of surveys near areas susceptible to risk, and lastly the kinematic analyzes that deal with the potential of rupture of the benches in question. Digital photogrammetry and specific software for data processing were used as tools. The main motivation is the use of new technologies to perform tasks that are traditionally manual, arduous and time-consuming, with attractive cost and simplified access. Two slopes with different structures were selected, of which the images were acquired in two dimensions. The images were processed to obtain three-dimensional models from which the values of the orientations of 3 discontinuities were extracted for the first slope and 44 for the second. The results confirm the feasibility and success of the methodology and the generated diagrams tend to confirm this, since they corroborate with technical observations made in the field as well as in the 3D models themselves.

Keywords: discontinuities, photogrammetry, point cloud, 3D model, kinematic analysis

1 Introdução

A extensão de uma dada descontinuidade, ou conjunto de descontinuidades, pode desempenhar um papel importante no controle do comportamento de uma massa rochosa (PRIEST & HUDSON, 1981). Nesse contexto faz-se necessário um conhecimento detalhado das descontinuidades de um maciço rochoso em atividades de mineração, uma vez que esse é um parâmetro fundamental para questões econômicas e de segurança da mina, tendo em vista

que servem como subsídio para definição adequada da geometria dos taludes e conformação da cava.

As faces planares geológicas (estratificações, falhas, juntas...) são características-chave para desvendar a história tectônica do afloramento rochoso ou analisar a estabilidade de um talude. As medidas de sua atitude espacial são geralmente realizadas manualmente com uma bússola/clinômetro, algo que consome tempo, requer algum grau de censura, isto é, recusar-se a medir algumas características julgadas de menor importância, de difícil acesso ou mais altas para o alcance manual, fatores que tornam o trabalho mais difícil e perigoso (DEWEZ *et al.*, 2016).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para a extração da orientação de descontinuidades em taludes na lavra de uma mina de calcário no município de Caçapava do Sul, tendo como principal ferramenta, alternativa aos métodos tradicionais (linhas de varredura manuais, as “*scanlines*”), a fotogrametria digital de curta distância. Por fim, estas orientações são utilizadas para se fazer uma análise cinemática dos taludes.

A referida técnica é adotada aqui, pois através dela podem ser realizados levantamentos de locais remotos e de alcance limitado ou inseguros, obtendo-se uma cobertura mais ampla do que os métodos manuais. Dessa forma é possível obter-se uma quantidade muito maior de medidas de orientação de estruturas, possibilitando um mapeamento de descontinuidades muito mais detalhado, de alta precisão e eficiência. Vale ressaltar aqui que este trabalho possui caráter tecnológico e econômico e tende a apresentar uma alternativa mais barata, e como consequência a utilização, dentro do possível e das limitações, de softwares livres ou mais acessíveis.

Área de estudo

A área de estudo está situada dentro de uma mina de calcário no distrito sede do município de Caçapava do Sul, a dez quilômetros do centro urbano e que tem como principal via de acesso e de escoamento para sua produção a BR-392.

A empresa mineradora onde foi realizado este estudo de caso trabalha na produção e comercialização de cal para construção civil e calcário agrícola para corretivo do solo atuando nas atividades de pesquisa, lavra e beneficiamento do minério. A mesma localiza-se num ponto estratégico (Figura 1), uma vez que essa é a principal rota para o porto de Rio Grande e dessa forma tende a viabilizar o transporte da produção, já que o fluxo de caminhões para o porto já existe em função do escoamento de outros produtos. Dessa maneira aproveitam-se o retorno desses caminhões vazios nas suas viagens de volta, sendo um dos fatores que tornam a comercialização do calcário economicamente viável.

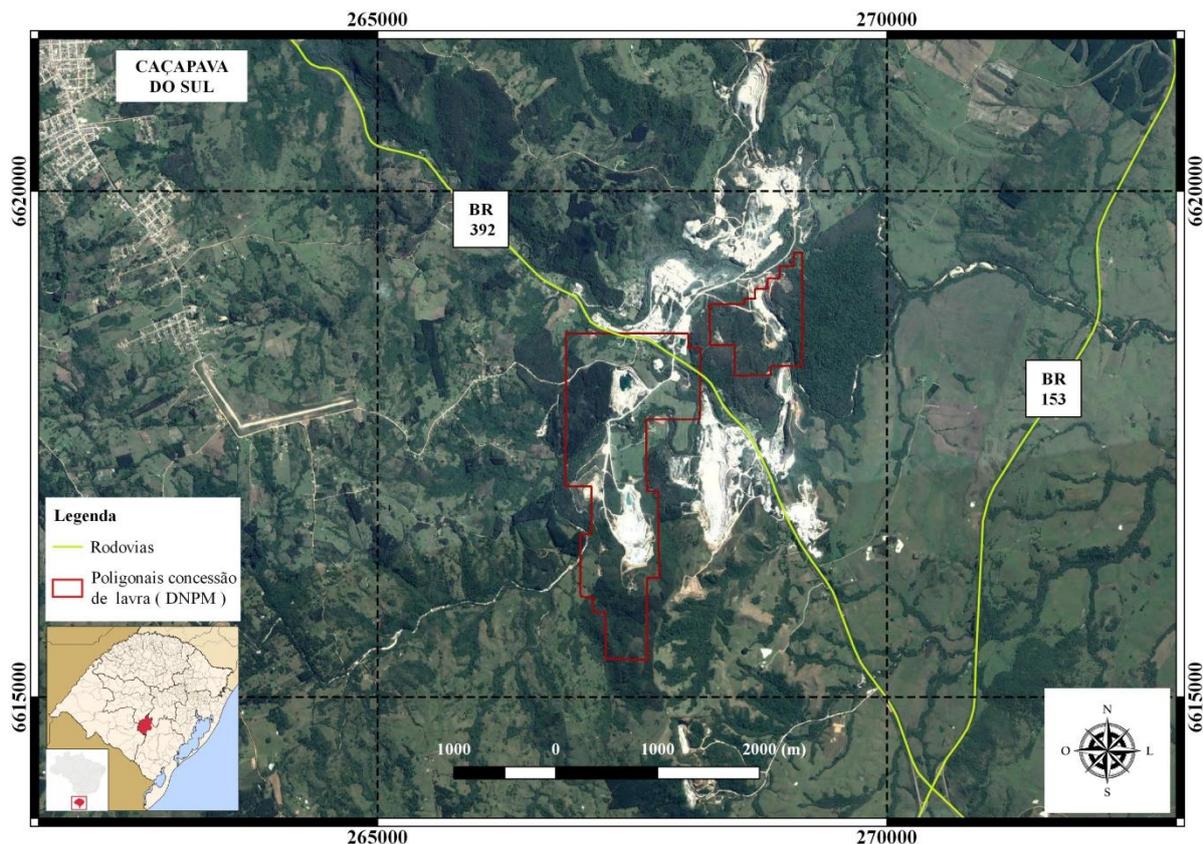


Figura 1: Mapa de localização da mineradora. Fonte: elaborado pelo autor / imagens Google Earth.

2 Estado da Arte

A existência de descontinuidades em uma massa rochosa não é algo incomum, porém de fundamental importância para a competência do maciço. Assim define-se descontinuidade como sendo qualquer separação no contínuo da rocha tendo efetivamente zero resistência à tração e o termo é usado sem qualquer conotação genética. O material que compreende a rocha intacta é natural e tem sido sujeito na maioria dos casos a milhões de anos de ações mecânicas, térmicas e químicas. Durante esses processos, as descontinuidades foram sendo introduzidas na rocha por eventos geológicos, em momentos diferentes e como um resultado de diferentes estados de estresse. Uma descontinuidade particularmente grande e persistente poderia afetar criticamente a estabilidade de qualquer superfície ou escavação subterrânea (HUDSON & HARRISON, 1997).

Conforme Jaeger *et al.* (2007), as descontinuidades geralmente ocorrem em conjuntos que são aproximadamente paralelos e regularmente espaçados. Há também geralmente vários conjuntos orientados em diferentes direções, aos quais podemos chamar de famílias, de modo que a massa de rocha se torne dividida em uma estrutura de blocos. Este é o principal motivo para a importância das juntas na mecânica das rochas: eles dividem uma massa de rocha em diferentes partes, e o deslizamento pode ocorrer ao longo das superfícies das mesmas.

As técnicas de fotogrametria digital terrestre são cada vez mais utilizadas como ferramentas de mapeamento para descrever a morfologia de rochas em três dimensões

(STURZENEGGER & STEAD, 2009). Segundo os mesmos autores, destacam-se com frequência algumas vantagens com relação aos métodos manuais: a capacidade de amostrar porções estendidas que não estão restritas à base de um afloramento, fornecendo amostras estatísticas mais representativas; a capacidade de examinar superfícies rochosas inacessíveis e altas; redução do risco para os trabalhadores, uma vez que o levantamento pode ser feito remotamente em local seguro e protegido do tráfego e da queda de rochas; criação de um registro permanente da condição de declive da rocha; permitir medições de orientação de descontinuidade quando as leituras do clinômetro da bússola são afetadas por minérios magnéticos.

2.1 Contexto geológico da área

O termo Calcário é usado comercialmente por tal indústria, no entanto sabe-se que se trata de uma jazida de mármore e o devido conhecimento da sua geologia torna-se pertinente como um dos fatores importantes no estudo das descontinuidades dos taludes da mina em questão. Segundo Ribeiro *et al.* (1966), tratam-se de mármore magnesianos, situados na borda leste do “*stock*” de Caçapava, na localidade conhecida como Pedreiras ou Caieiras. Esses mármore são afetados pelo metamorfismo de contato do granito de Caçapava, os quais desenvolvem associações mineralógicas características. Além disso, de acordo com o mesmo, os mármore para fins de fabricação de cal são aproveitados de numerosas lentes que se estendem por uma faixa contínua por alguns quilômetros.

Ribeiro *et al.* (1966) situam essa litologia dentro de uma espessa sequência de rochas metamórficas, metassedimentares e meta-vulcânicas associadas, dentro da Formação Vacacaí pertencente ao Grupo Porongos, identificando-as como “*mármore das pedreiras, nas caieiras a leste de Caçapava*”. Além desses mármore, no mapa geológico apresentado na Figura 2 podem-se observar as principais litologias e falhas que ocorrem na região da área de estudo.

Outro autor que discorre sobre essa litologia é Bortolotto (1986) ao descrever os metamorfitos situados a leste do granito Caçapava, identificando um corpo de rochas carbonatadas, de aspecto lenticular e com intrusões de apófises graníticas. O mesmo autor afirma que tais rochas são impróprias para fins de construção que exijam blocos inteiros de grande dimensão, devido ao seu alto grau de fraturamento e que seu principal constituinte mineralógico é a dolomita dentre outros como calcita, calcita ferrífera, olivina, serpentina, flogopita, anfibólio, clorita, piroxênio, apatita, titanita, quartzo e talco.

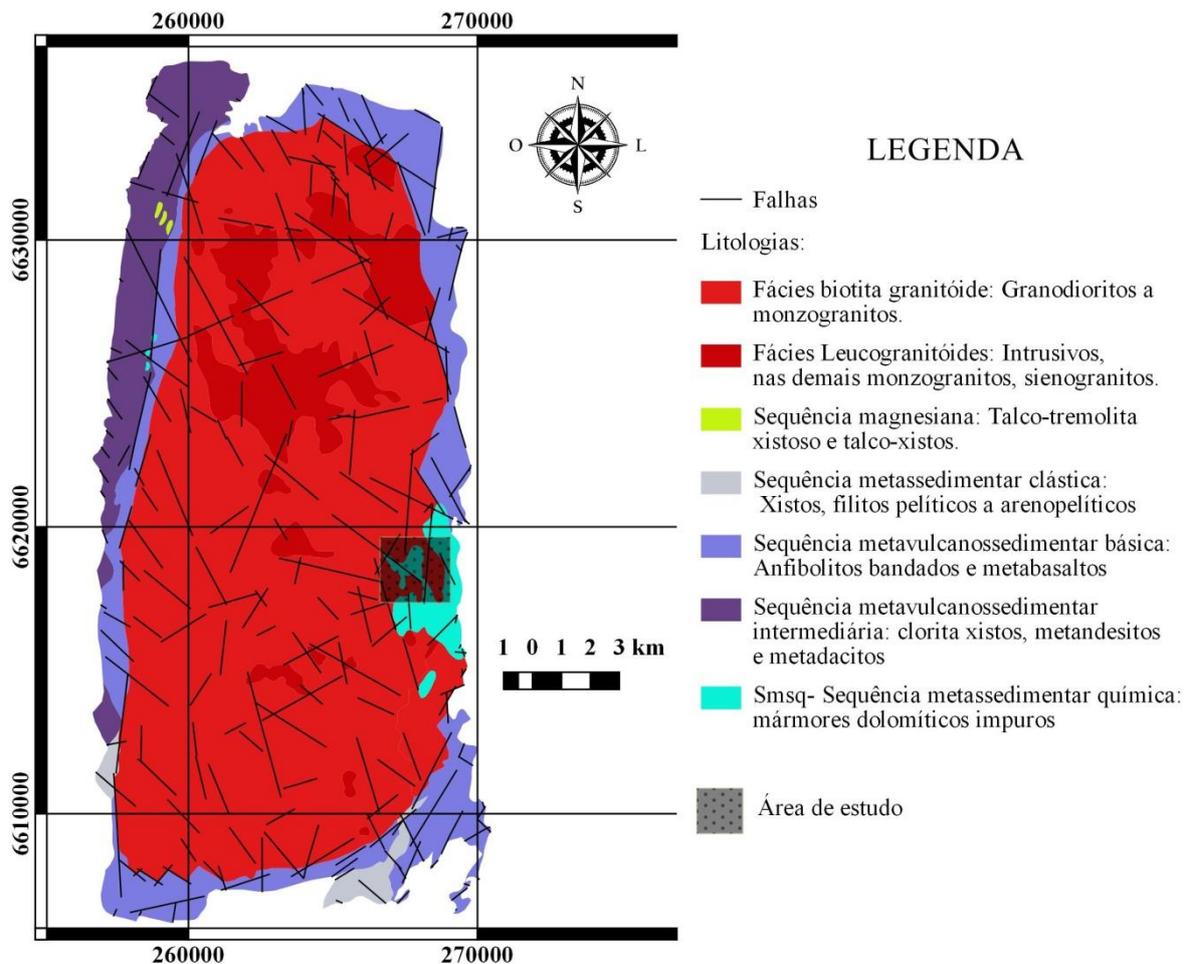


Figura 2: Mapa geológico simplificado da região da área de estudo. Fonte: modificado de UFRGS (1999).

2.2 Estabilidade de taludes

Como visto anteriormente o levantamento das descontinuidades é um fator crucial para a estabilização dos taludes em ambientes de mineração. Aqui se define por talude qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou de ambos. Pode ser natural, caso das encostas ou vertentes, ou artificial, quando construído pelo homem, caso dos cortes e aterros. Dessa forma, derivando de sua própria definição, na estabilidade dos taludes existem alguns fatores condicionantes que atuam e que provém da natureza dos materiais constituintes e dos agentes perturbadores sejam eles de origem geológica, antrópica ou geotécnica. São eles de fundamental importância, levando-se em consideração o risco de acidentes bem como os já ocorridos com relativa frequência ao redor do mundo inteiro em diversas épocas e que acarretaram muitas vezes em mortes e prejuízos ao empreendimento (FIORI, 2015).

Outra definição dada por Fiori (2015), do ponto de vista teórico, diz que um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de força distintos: forças devidas ao peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento. E segundo o mesmo, o estudo da estabilidade dos taludes deve, necessariamente, levar em conta o equilíbrio entre essas forças, uma vez que as duas primeiras se somam, e tendem a movimentar a massa de solo encosta abaixo, enquanto a última atua como um freio a essa movimentação.

O desenho ideal da cava a ser executado, em mineração a céu aberto, normalmente é aquele que maximize os ângulos gerais de inclinação e minimize a quantidade de material estéril a ser removido. Porém deverá respeitar os riscos de instabilidade geral dos taludes e o mesmo deve ser gerido permanentemente a fim de proporcionar movimentos seguros e eficientes de pessoal, equipamentos e materiais durante as operações realizadas na mina (HOEK & BRAY, 1991).

2.2.1 Análise Cinemática de taludes em rochas

Este conceito trata da movimentação de corpos, sem que se faça nenhum tipo de referência às forças responsáveis por causar o mesmo. Em operações de mineração e demais atividades onde haja conformação de taludes, muitos blocos estão em condições estáveis, mesmo que contenham planos de fraqueza bastante inclinados. Isso acontece quando existe a impossibilidade de movimentação ao longo de todas as superfícies de fraqueza que os delimitam, pois ocorrem, com certa frequência, impedimentos para que aconteça essa livre movimentação. Uma vez que esses impedimentos sejam retirados por qualquer processo, sejam eles, erosão, escavação ou crescimento de fraturas, o bloco (ou blocos) ficará livre e deslizará em seguida (FIORI, 2015).

Para a avaliação dos mecanismos de rupturas, segundo Reis (2010) as análises cinemáticas compreendem basicamente a movimentação potencial de zonas específicas do maciço. Essa metodologia utiliza a representação espacial dos taludes e das discontinuidades através da projeção estereográfica em diagramas de projeção hemisférica de igual área. Com os dados estruturais plotados em estereogramas, torna-se possível a avaliação das condições de estabilidade dos taludes ao longo das seções mais representativas dos domínios lito-estruturais existentes. Os mecanismos de ruptura a serem estudados mais tarde nesse trabalho são ilustrados na figura 3:

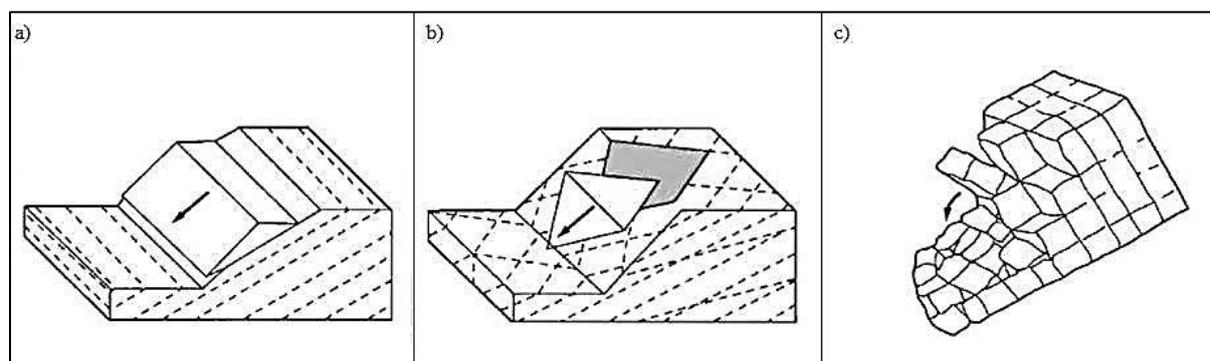


Figura 3: Mecanismos da estabilidade dos taludes estudados nesse trabalho: a) ruptura planar; b) ruptura em cunha; c) ruptura por tombamento direto. Fonte: modificado de Hudson & Harrison (1997).

2.2.2 Fricção entre superfícies rochosas

Segundo Jaeger *et al.* (2007), a fricção é um fenômeno pelo qual é necessária uma força de corte tangencial para deslocar duas superfícies de contato ao longo de uma direção paralela ao seu plano de contato nominal. É necessário que seja atribuído um valor limite de ângulo de fricção (ou ângulo de atrito) para que as análises cinemáticas possam ser realizadas e que se tenha um indicativo da possibilidade de ruptura do maciço rochoso.

2.3 Fotogrametria

De acordo com Schenk (2005) não existe uma definição universalmente aceita de fotogrametria, porém ele a define como sendo a ciência de obter informações confiáveis sobre as propriedades de superfícies e objetos sem contato físico com os mesmos e de medir e interpretar essas informações.

Uma definição mais antiga é dada pela *American Society of Photogrammetry – ASP* (1980), segundo a instituição essa é a arte, ciência e tecnologia de se obter uma informação fiel sobre objetos ou meio físico através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas ou padrões de radiação eletromagnética.

No que tange ao conceito de fotogrametria digital, BETHEL (1989) a define como sendo o ramo de obtenção de informações tridimensionais de imagens estereoscópicas ou digitais múltiplas.

A fotogrametria digital de curta distância é adotada neste trabalho, pois o mesmo compreende levantamentos em pequena escala de alvos relativamente próximos do sensor, e também por tratar-se de uma técnica economicamente mais atraente, se comparada a outras como, por exemplo, as de varredura a *laser (laser scanner)*, para empresas de pequeno e médio porte uma vez que podem ser utilizadas câmeras fotográficas convencionais.

Estereoscopia

O termo visão estereoscópica, segundo Jan (1993), significa olhar para o mesmo objeto em duas fotografias diferentes, dessa forma a condição primordial para a estereoscopia é a de que o mesmo objeto apareça em duas fotos adjacentes, para tal é necessário que sejam tiradas fotografias de maneira que elas se sobreponham (Figura 4). Esta é uma definição baseada inicialmente na fotografia analógica (negativos e positivos), no entanto a mesma pode ser aplicada para a fotografia digital, sendo que essa ao contrário da primeira é baseada na resolução e *pixels* da imagem.

Com a utilização de fotografias digitais, de acordo com Leite (2014), para que a visão estereoscópica seja possível, é necessário que sejam pareadas as duas projeções de um mesmo ponto em cada câmera, sendo esse um procedimento complexo uma vez que ocorrerá um tratamento estatístico das diferentes particularidades de cada região das duas imagens.

Dentro deste contexto, no presente trabalho serão utilizadas fotografias em duas dimensões para posterior geração, por pareamento de pontos comuns a ambas as imagens, de um modelo para visualização e interpretação em três dimensões dentro de *softwares* específicos.

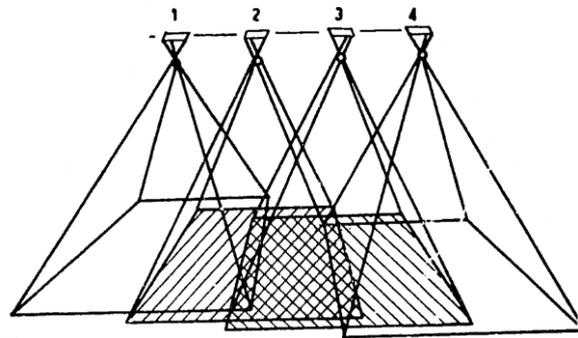


Figura 4: Condição básica para visão estereoscópica. Imagens adjacentes 1,2,3 e 4 com sobreposição de áreas comuns aos seus respectivos pares. Fonte: modificado de Jan (1993).

2.4 Modelo tridimensional

A crescente evolução tecnológica faz com que cada vez mais, métodos de visualização e caracterização em três dimensões sejam utilizados nas mais diversas áreas da ciência, sendo eles criados a partir de nuvens de pontos que contém as coordenadas (X,Y), a elevação (Z) e os valores do modelo de cores aditivas “RGB” para colorização dos pontos, sejam essas nuvens de pontos obtidas por fotogrametria digital de curta distância, aerofotogrametria ou mesmo por sistemas de varredura a *Laser (laser scanner)* tendo como resultado um banco de dados simples, como por exemplo em formato de texto (txt), passível de ser visualizado e editado por diversos softwares que vem sendo progressivamente desenvolvidos e aprimorados nas últimas décadas, sejam eles produtos pagos ou livres. Com a nuvem de pontos adquirida, a topografia da inclinação pode ser reconstruída e informações sobre descontinuidades (posição, orientação, espaçamento...) assim como a hierarquia das juntas podem ser extraídas, sem que seja necessariamente construída uma malha 3D (como por exemplo, por triangulação de *Delaunay*), pois o procedimento pode ser executado diretamente na nuvem de pontos não estruturada, por agrupamento, uma vez que tenhamos um número suficiente de pontos distribuídos, reduzindo assim o tempo de pós-processamento (RONCELLA *et al*, 2006).

3 Materiais e Métodos

Inicialmente foi prevista a definição e identificação dos alvos em potencial, ou seja, dos taludes da mina em questão cujo levantamento das descontinuidades seja justificado, análise e escolha feitas em concordância com a empresa levando-se em consideração os taludes que segundo a mesma não serão lavrados durante longo período ou mesmo os que se encontram no avanço final da mina.

3.1 Aquisição das imagens

Nesta etapa foram realizadas a coleta das coordenadas dos pontos a serem amostrados e posteriormente a obtenção das sequências dos pares de imagens dos alvos com a utilização de uma câmera fotográfica convencional Sony Cyber-Shot modelo DSC-H7 / 8.1 *Megapixels*, ou transportada por veículo aéreo não tripulado (*drone*) DJI modelo Phantom 4 equipado com sua própria câmera e GPS para o georreferenciamento. Com a aquisição dessas

fotografias em campo, na etapa seguinte, as mesmas foram descarregadas no computador em laboratório para pós-processamento.

3.2 Processamento das imagens

Para a realização da sobreposição e alinhamento das áreas comuns as diferentes imagens foi utilizado o *software Agisoft PhotoScan*, gerando como principal produto, após tratamento dos dados, uma nuvem de pontos para posterior processamento, visualização do modelo tridimensional e levantamento das descontinuidades na etapa subsequente.

O *Agisoft PhotoScan*, segundo Thiele *et al* (2015), utiliza uma técnica computacional chamada *Structure from Motion* (SFM), trata-se de um recurso para estabelecer uma estrutura 3D de um cenário a partir de um conjunto de imagens 2D. De acordo com Lowe (2004) os algoritmos SFM identificam pontos comuns entre pares de imagens em um conjunto (Figura 5).

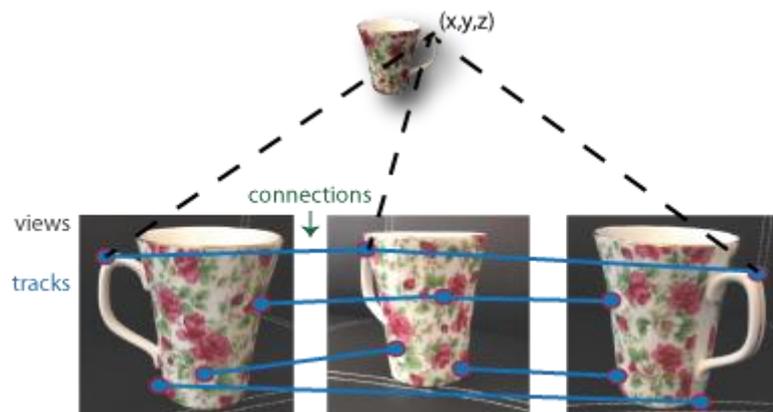


Figura 5: correspondência de pontos em várias imagens, com trajeto e conexões para tal, resultando em coordenadas (x,y,z) , obtidos por algoritmos SFM. Fonte: Mathworks (2017)

3.3 Processamento das nuvens de pontos

De posse das nuvens de pontos 3D obtidas pela fotogrametria digital, as mesmas foram exportadas para o *CloudCompare*, um *software* gratuito de processamento de nuvens de pontos mais generalista que inclui diversos algoritmos avançados com ferramentas para a realização de variadas tarefas. A partir dele se utilizou o *plugin* chamado *Facets*, um *plugin* de geologia estrutural, implantado e projetado para extrair planos de nuvens de pontos 3D não estruturadas e que de maneira geral consiste em dividir a nuvem em conjuntos de pontos adjacentes que compartilham algum grau de coplanaridade definida pelo usuário, o mesmo executa um algoritmo de ajuste de mínimos quadrados conhecido como *k-d tree* para realização de tal partição (DEWEZ *et al.*, 2016). Também foram feitas segmentações manuais a fim de se obter planos ajustáveis localmente dentro de tais partições obtendo-se assim orientações individualmente.

Uma vez que essa etapa foi concluída com as descontinuidades levantadas bem como suas atitudes extraídas, essas foram copiadas para uma tabela no *software Dips*, onde foram traçados os estereogramas, que são os diagramas para a representação gráfica em plano, das orientações tridimensionais das descontinuidades e, por conseguinte as análises cinemáticas.

Para melhor compreensão do método proposto nesse trabalho, é apresentado um fluxograma com a sequência das atividades (Figura 6).

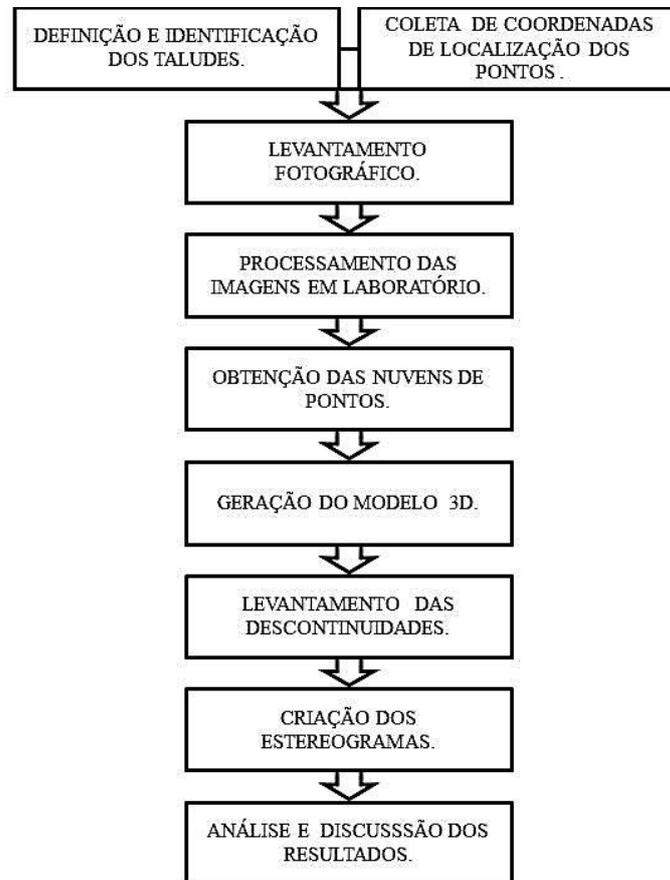


Figura 6: Fluxograma da sequência de atividades. Fonte: elaborado pelo autor.

4 Resultados e Discussão

Tal como previsto anteriormente, sob justificativa, foram escolhidos dois taludes a serem chamados aqui de talude_01 e talude_02 (Figura 7).

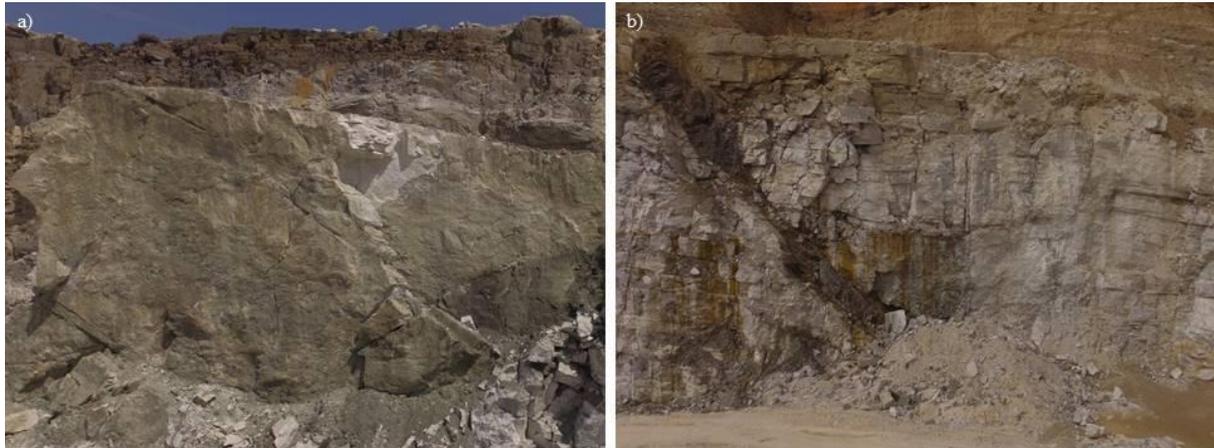


Figura 7: a) Imagem digital do Talude_01; b) Imagem digital do Talude_02. Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir das fotografias adquiridas com o drone e foram georreferenciados com base nas coordenadas dos pontos centrais das imagens, mecanismo possibilitado em função do GPS equipado no drone usado em questão. No entanto destaca-se aqui que as fotografias terrestres, obtidas com câmera convencional, também foram utilizadas para a geração de modelos em paralelo e que se mostraram igualmente úteis ao gerarem reconstruções bastante fiéis dos alvos, tal como as demais, para esse caso o georreferenciamento foi realizado pelo alinhamento com as anteriores, podendo-se também ser realizado a partir de pontos de controle coletados previamente no cenário do imageamento.

4.1 Modelos gerados

Para ambos os taludes, dentro do *software Agisoft PhotoScan*, foram utilizadas as configurações no nível médio, tanto para o alinhamento das imagens e geração da nuvem de pontos, como para a reconstrução da nuvem densa e para a confecção do modelo 3D final.

Para o Talude_01 foram utilizadas 20 fotografias que deram origem a uma nuvem densa com 815.824 pontos e um modelo 3D em mosaico, já para o Talude_02 foram utilizadas 15 fotografias que deram origem a uma nuvem densa com 1.079.194 pontos e um modelo 3D em mosaico (Figura 8). Visivelmente as nuvens se assemelham bastante aos modelos finais em mosaico, devido à alta densidade de pontos conseguida, fato que torna possível que se trabalhe diretamente com as mesmas uma vez que elas também reconstituem com clareza as feições dos taludes.

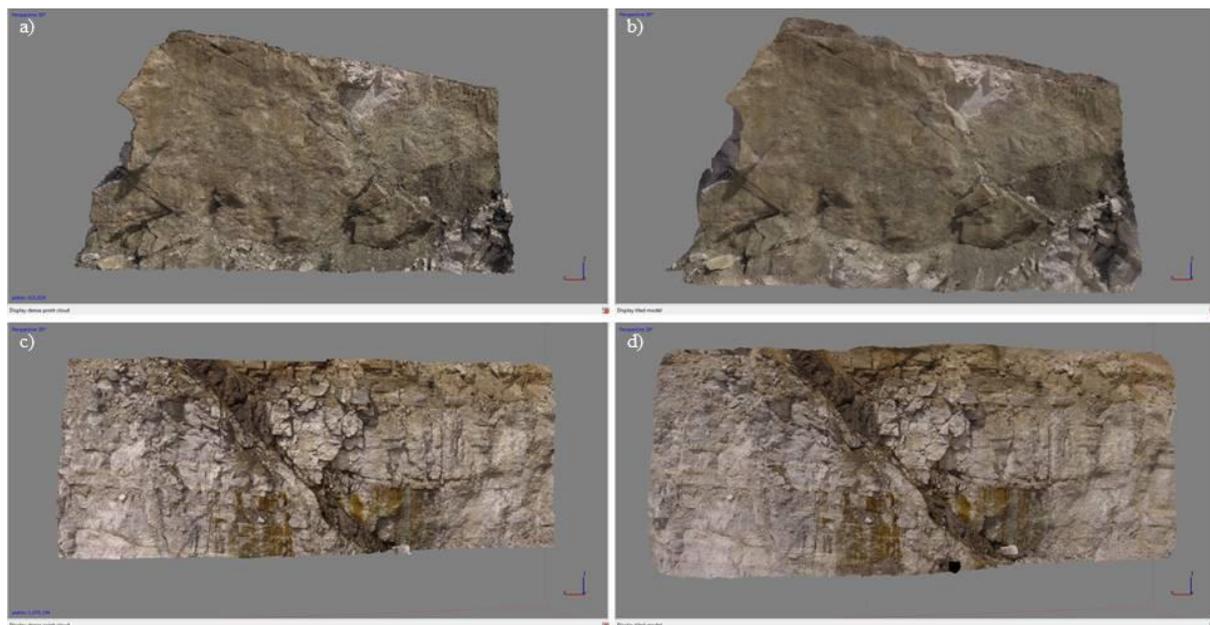


Figura 8: a) nuvem de pontos densa do Talude_01; b) modelo 3D final do Talude_01; c) nuvem de pontos densa do Talude_02; d) modelo 3D final do Talude_02. Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 Extração semiautomática das discontinuidades

Os parâmetros do *plugin*, utilizados para a geração das faces planares no *software CloudCompare*, como o ângulo máximo entre porções vizinhas, como distância máxima entre os pontos de fusão e o centro da face, como critérios de distância entre os pontos e o mínimo de pontos para que seja gerada uma face, foram definidos de forma empírica, baseados apenas a partir de observações a cerca do proposto por Dewez *et al.* (2016) e levando-se em consideração as peculiaridades de cada nuvem de pontos gerada para cada um dos taludes aqui apresentados, como distribuição espacial e espaçamento entre pontos.

Posteriormente foram filtradas manualmente as atitudes de planos gerados que não representavam de fato falhas na continuidade do maciço e conseqüentemente potencial de movimentação de blocos e possível ruptura, critérios usados em concomitância com observações feitas em campo e no próprio modelo tridimensional. Em alguns casos as faces foram delimitadas manualmente a fim de se otimizar o processo e um plano ajustado de acordo com a distribuição dos pontos apenas dentro desse limite estipulado.

Na Figura 9 as faces geradas aparecem sobrepostas as nuvens de pontos de seus respectivos taludes.

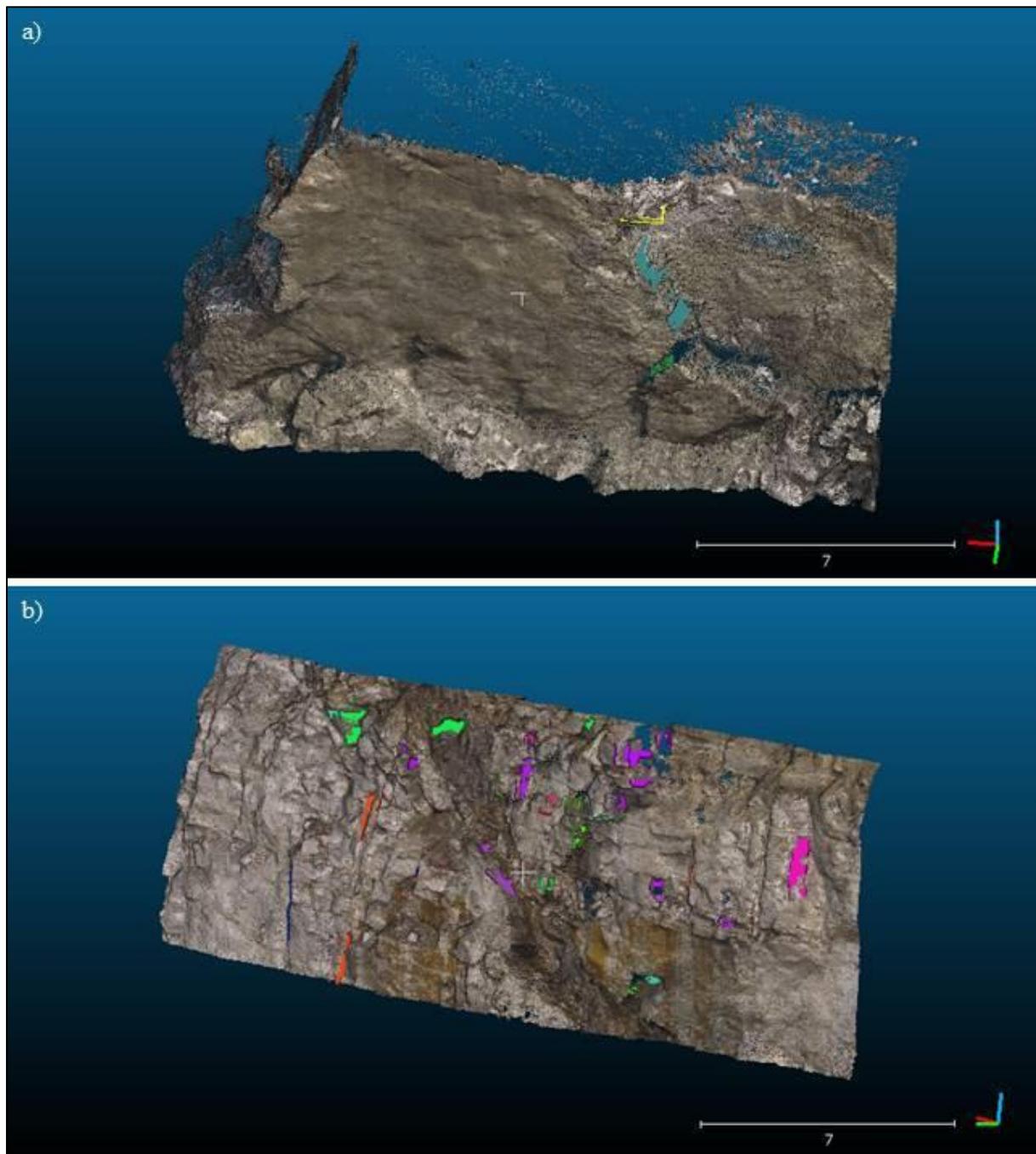


Figura 9: a) faces planares das descontinuidades do Talude_01, extraídas e sobrepostas a sua nuvem de pontos
b) faces planares das descontinuidades do Talude_02, extraídas e sobrepostas a sua nuvem de pontos. Fonte:
elaborado pelo autor.

No primeiro caso foram extraídas apenas 3 orientações distintas, já no segundo foram extraídas 44 orientações, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Valores gerados, pelo software, das orientações das descontinuidades extraídas do Talude_01 e do Talude_02.

Talude_01		Talude_02	
Dip	Dip dir.	Dip	Dip dir.
5	195	85	231
50	67	57	175
67	284	39	75
		64	109
		56	3
		60	65
		36	180
		27	140
		75	291
		87	144
		6	120
		53	31
		52	85
		84	226
		89	0
		56	119
		48	160
		40	157
		80	300
		46	273
		42	271
		83	276
		33	316
		56	346
		75	11
		85	297
		82	94
		87	28
		77	55
		85	298
		79	112
		83	97
		69	124
		86	134
		77	288
		63	127
		85	134
		88	242
		86	243
		84	271
		73	272
		68	270
		71	290
		89	328

4.3 Análises cinemáticas

Das orientações das descontinuidades extraídas, foram desenhados os estereogramas, todos em projeção de igual área (rede de Schmidt-Lambert), hemisfério inferior. Para o talude_01 foram plotados juntamente os polos e os planos dos 3 únicos valores extraídos (Figura 10), para o Talude_02 foram plotados os planos (Figura 11) e os polos dos planos com os contornos de acordo com a densidade da concentração (Figura 12).

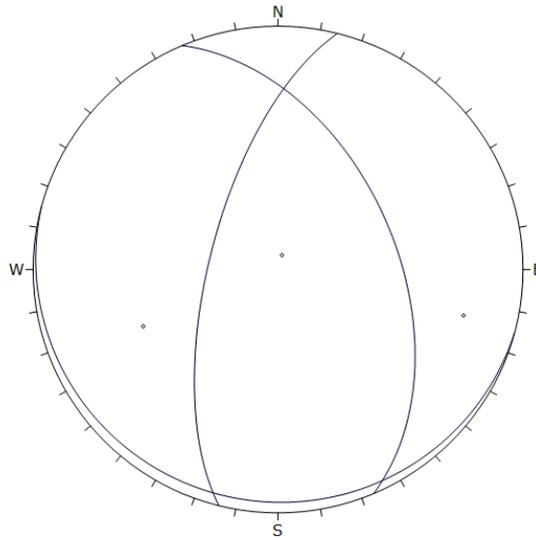


Figura 10: Estereograma com as atitudes das descontinuidades do Talude_01 (polos e planos). Fonte: elaborado pelo autor.

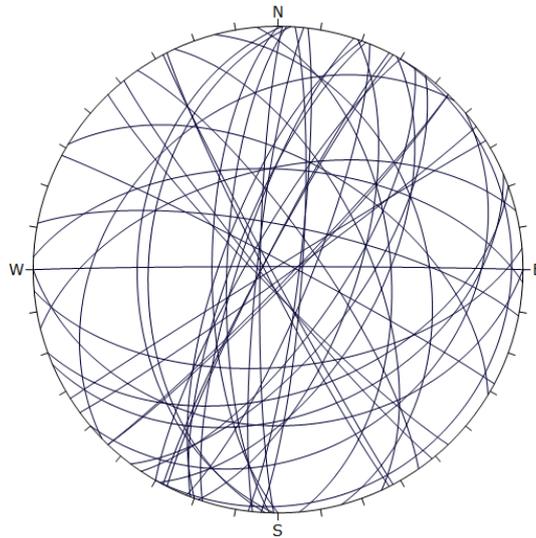


Figura 11: Estereograma com as atitudes das descontinuidades do Talude_02 (planos). Fonte: elaborado pelo autor.

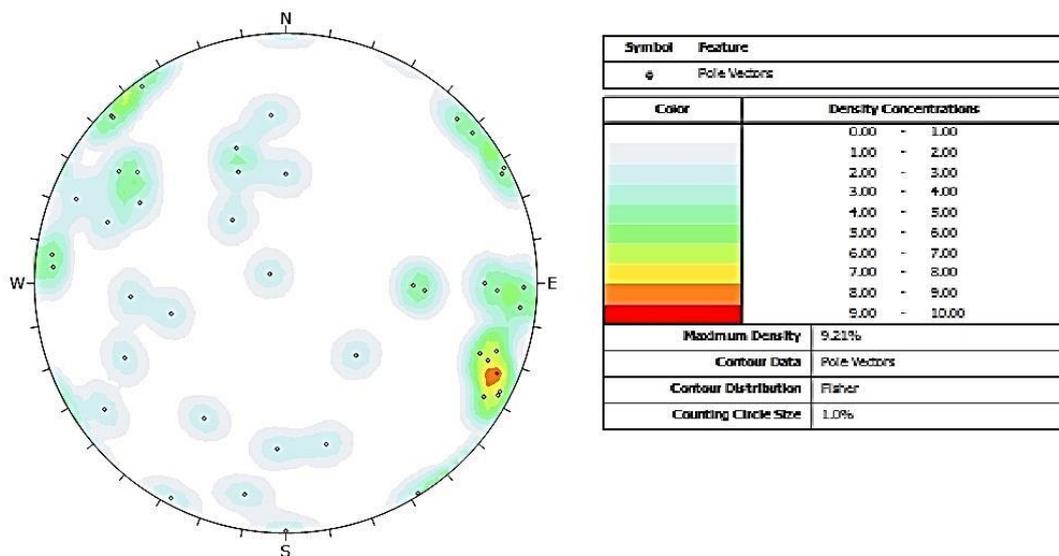


Figura 12: Estereograma com as atitudes das descontinuidades do Talude_02 (polos e contornos). Fonte: elaborado pelo autor.

Aliado as projeções apresentadas anteriormente também foi plotada a orientação do respectivo talude para cada caso (obtida com as mesmas ferramentas de extração das descontinuidades), possibilitando por fim identificar e quantificar pontos críticos que representam potenciais de ruptura, para tanto se assumiu um ângulo de atrito de 27° assim como o utilizado e justificado por Paz (2014) em estudo realizado na mesma área.

Para o Talude_01 foram interpretadas zonas críticas com potencial de ruptura planar (Figura 13) e de ruptura por tombamento direto (Figura 14).

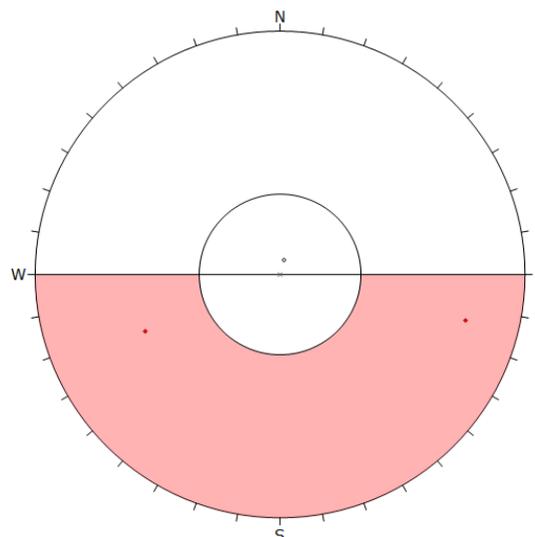


Figura 13: Análise cinemática do Talude_01 para ruptura planar. Pontos vermelhos: vetores críticos. Pontos pretos: demais polos medidos. Orientação do talude: 90/0. Fonte: elaborado pelo autor.

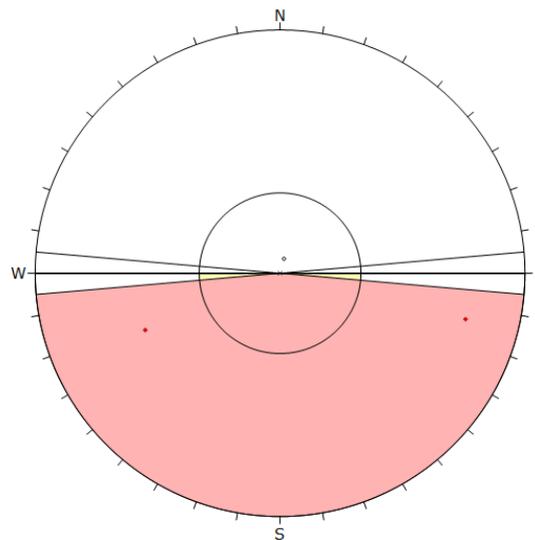


Figura 14: Análise cinemática do Talude_01 para ruptura por tombamento direto. Pontos vermelhos: vetores críticos. Pontos pretos: demais polos medidos. Orientação do talude: 90/0. Fonte: elaborado pelo autor.

Para o Talude_02 foram interpretadas zonas críticas com potencial de ruptura planar (Figura 15), em cunha (Figura 16) e por tombamento direto (Figura 17).

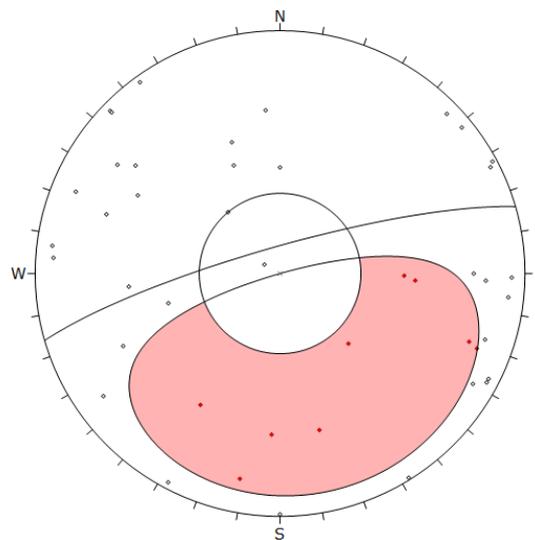


Figura 15: Análise cinemática do Talude_02 para ruptura planar. Pontos vermelhos: vetores críticos. Pontos pretos: demais polos medidos. Orientação do talude: 81/344. Fonte: elaborado pelo autor.

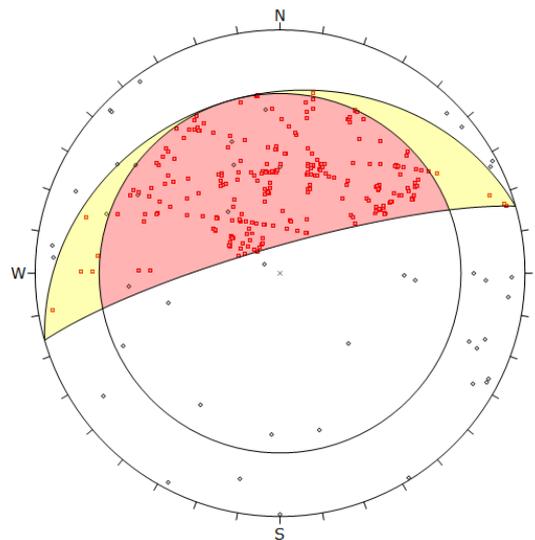


Figura 16: Análise cinemática do Talude_02 para ruptura em cunha. Pontos vermelhos: intersecções críticas. Pontos pretos: demais polos medidos. Orientação do talude: 81/344. Fonte: elaborado pelo autor.

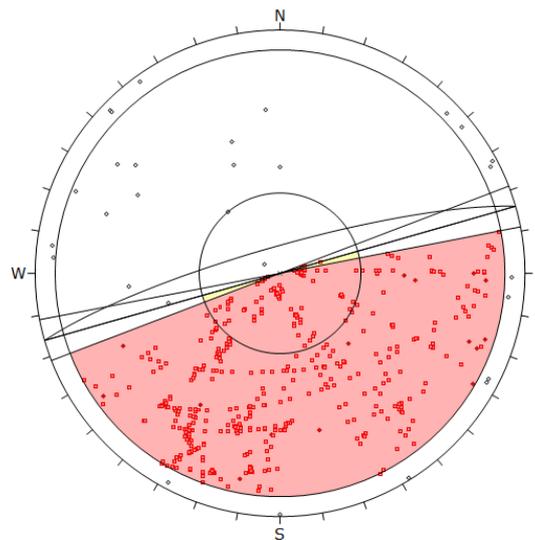


Figura 17: Análise cinemática do Talude_02 para ruptura por tombamento direto. Pontos vermelhos: intersecções e vetores críticos. Pontos pretos: demais polos medidos. Orientação do talude: 81/344. Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se que para o Talude_01 o pequeno número de descontinuidades tende a gerar também um pequeno número de pontos críticos instáveis, tal fato ao que tudo indica, justifica-se pelo fato das faces remanescentes do mesmo, pressuporem uma zona de contato (chamados no jargão local como “lisos”).

Para o Talude_02 um número maior de atitudes foi extraído, e as análises indicaram uma maior tendência para rupturas de tombamento direto, fato que se justifica pela parcial fragmentação de sua face remanescente que expôs planos livres em diferentes direções em razão não somente da presença de descontinuidades de gênese geológica como por advento

do desmonte com explosivos e carregamento mecanizado muito próximo da bancada, para o transporte do minério.

Outros tipos de ruptura como a circular e por tombamento flexural não foram diagnosticadas em nenhum dos casos e por tanto não foram mencionadas anteriormente.

Ressalta-se aqui que as análises cinemáticas não seriam por si só suficientes para uma análise mais ampla a cerca da estabilização dos taludes, assim como em qualquer outro caso, no entanto os pontos críticos apresentados pelos diagramas e observados no próprio modelo 3D, não representam um risco para a estabilidade dos taludes como um todo. Esses pontos são localizados e compreendidos pelos fatores citados anteriormente e tendem apenas ao desprendimento de pequenos fragmentos, fato completamente aceitável em ambientes de mineração, principalmente tratando-se de rochas relativamente mais friáveis como são as da mina em questão.

5 Conclusões

O procedimento elaborado e executado nesse trabalho mostrou-se bastante eficaz, uma vez que não foi necessário mais que um dia de trabalho em campo para a realização dos levantamentos e que conseguiu-se a geração de uma nuvem de pontos suficientemente densa para a extração das descontinuidades, com um número pequeno de imagens. Tudo isso a um custo irrisório, no entanto se esta prática for realizada rotineiramente, será necessária a aquisição das ferramentas necessárias como máquinas fotográficas e/ou Drone, bem como os *softwares* não livres e que seus custos nesse caso deveriam ser melhores avaliados.

Diversos testes preliminares de imageamento foram realizados e conclui-se que um número ainda maior de fotografias e de áreas comuns aos pares adjacentes tende a enriquecer ainda mais os modelos, não necessariamente sendo primordial a equivalência das distâncias focais e que diversos ângulos podem ser utilizados com sucesso, devendo-se apenas serem evitadas altas luminosidades.

O processamento dos dados atendeu as expectativas, não requerendo significativamente de *hardware e software*, tanto para o alinhamento das imagens e geração das nuvens de pontos quanto para as etapas seguintes. Para as extrações propriamente ditas das descontinuidades, bastaram pequenos ajustes nos parâmetros do *plugin*, fator que encurtou consideravelmente o tempo de processamento uma vez que não foram necessárias a geração de malhas ou qualquer tipo de estruturação prévia das nuvens de pontos.

Não foram realizados levantamentos manuais com bússolas para fins de comparação com a metodologia proposta, levando em conta que outros autores já validaram as ferramentas utilizadas aqui, em trabalhos semelhantes, porém em janelas de mesmo alcance dos levantamentos manuais, sendo que um dos objetivos desse trabalho, realizado com êxito, era justamente o levantamento em porções inacessíveis ao alcance manual.

Por fim, mesmo não sendo sua realização o objetivo principal, as análises cinemáticas como ponto de chegada deste trabalho, serviram também para confirmar o que se idealizava, uma vez que a representação das orientações nesses diagramas apresenta como resposta o comportamento que se pressupunha do maciço rochoso dos taludes investigados. O estudo indica que as inclinações dos taludes bem como a direção do avanço dos mesmos estão em conformidade com o desejável para a competência dos maciços em questão o que atesta as boas práticas realizadas pela empresa mineradora.

6 Agradecimentos

Aos meus pais Semarino Teixeira dos Santos e Lélia Valcarenghi dos Santos, minha irmã Daiane Valcarenghi dos Santos e meu tio Selmar Teixeira dos Santos (*In memoriam*), pelo apoio familiar e incentivo.

Ao meu professor e orientador Ítalo Gomes Gonçalves, pela orientação e contribuição para o êxito desse trabalho e ao longo da graduação.

A direção e funcionários da empresa onde foi realizado o estudo de caso supracitado, por ter possibilitado e contribuído com a realização do mesmo.

A Tecnóloga Angela Cristina Bertoi Fleck, pelo apoio prestado junto ao LATRAM.

Ao professor Felipe Guadagnin, pelo apoio em campo na aquisição das imagens com o drone gentilmente emprestado por ele e ao Bruno Nunes Machado pelo auxílio na realização de tais tarefas.

A todos os demais professores, colegas e servidores da UNIPAMPA que de alguma forma foram parceiros ao longo da graduação ou colaboraram para a realização deste trabalho.

7 Referências bibliográficas

American Society of Photogrammetry – ASP. 1980. Manual of Photogrammetry. 4 ed. Falls Church: ASP Press. 1056p.

BETHEL, D.J. Digital image processing in photogrammetry. **Photogrammetric Record**, Aarau, Vol 13, pp 493-504, Outubro de 1989.

BORTOLOTTI, O. J. **Petrografia dos Mármore de Caçapava do Sul**. 1986. 118f. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Universidade de São Paulo Instituto de Geociências. São Paulo. 1986.

CLOUDCOMPARE ORG. **Facets (plugin)**. Disponível em: <[http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Facets_\(plugin\)](http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Facets_(plugin))>. Acessado em: 12 de maio de 2017.

DEWEZ, T. J. B.; GIRARDEAU-MONTAUT, D.; ALLANIC, C.; AND ROHMER, J. **Facets** : A cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.**, XLI-B5, 799-804, doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-799-2016, 2016.

FIORI, A.P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas** : aplicações na estabilidade de taludes. 1Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HOEK, E.; BRAY, J. **Rock Slope Engineering**: Civil and Mining. 3.Ed. London: Inst. Mining and Metallurgy, 1981.

HUDSON, J.A.; HARRISON, J.P. **Engineering rock mechanics an introduction to the principles**. 1. Ed. Trowbridge: Redwood Books, 1997.

JAEGER, J. C.; COOK, N. G.W; ZIMMERMAN, R.W. **Fundamentals of Rock Mechanics**. 4.Ed. Malden, Oxford, Melbourne: Blackwell Publishing Ltd, 2007.

JAN, A. **Fundamentals of photointerpretation and photogrammetry**. 1Ed. Islamabad: Pictorial Printers (Pvt) Ltd: 1993.

LEITE, R.F. **Aplicação de Estereoscopia em Imagens Digitais**. 2014. 73f. Monografia. (Bacharelado em Engenharia de Computação) - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, 2014.

LOWE, D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. **International Journal of Computer Vision**, Vancouver, v.60, n.2, p.1-20, Janeiro de 2004.

MATHWORKS. **Structure from Motion**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/vision/ug/structure-from-motion.html>>. Acessado em 12 de maio de 2017.

PAZ, V. Levantamento das Descontinuidades e Avaliação da Estabilidade de Taludes da Mina do Mangueirão. Universidade Federal do Pampa. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Caçapava do Sul, 2014.

PRIEST, S.D.; HUDSON, J.A. Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.** Vol. 18, pp. 183-197, 1981 Printed in Great Britain.

REIS, R.C. **Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira – MG**. 2010. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

RIBEIRO, M.; BROCCHI, P.R.; FIGUEIREDO F^o,P.M; TESSARI, R.I. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul - Rio Grande do Sul - Brasil. **DNPM Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral**, Rio de Janeiro,127, pp. 1-232, 1966.

ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, 41., 2006, Golden. **Report workshop: laser and photogrammetric methods for rock face characterization**. Alexandria: American Rock Mechanics Association, 2006.

SCHENK, T. **Introduction to Photogrammetry**. 2005. 100p. Apostila.

STURZENEGGER, M.; STEAD, D. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. **Engineering Geology**, V.106, pp. 163-182, Março de 2009.

THIELE, S.T; MICKLETHWAITE, S; BOURKE, P; VERRAL, M; KOVESI, P. Insights into the mechanics of en-echelon sigmoidal vein formation using ultra-high resolution photogrammetry and computed tomography. **Journal of Structural Geology**, V.77, pp. 27-44, Agosto de 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – INSTITUTO DE GEOCIENCIAS. **Projeto Caçapava do Sul: Mapa Geológico**. Porto Alegre, 1999. 1 mapa. Escala 1:50.000.