

Aplicação do *laser scanner* na análise de estabilidade em escavações subterrâneas: Mina Tabiporã, Campo Largo, PR

Laser scanner applied to stability analysis in underground excavation: Tabiporã Mine, Campo Largo, PR, Brazil

Gabriela Reis Piazzetta¹, Barbara Trzaskos¹, Álvaro Muriel Lima Machado²

¹Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Centro Politécnico, Jardim das Américas, CEP 81531-980, Curitiba, PR, BR (grpiazzetta@gmail.com; barbaratraskos@ufpr.br)

²Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, PR, BR (alvaroml@ufpr.br)

Recebido em 19 de fevereiro de 2015; aceito em 19 de dezembro de 2016

Resumo

Este trabalho demonstra a aplicação do *laser scanner* (*light detection and ranging* – LIDAR) na análise geotécnica de queda de blocos em galeria subterrânea. O estudo, realizado em parte da galeria da Mineração Tabiporã, teve como objetivo testar a utilização de dados remotos na determinação da direção de famílias de fraturas e sua comparação com dados diretos, obtidos em campo. A nuvem de pontos georreferenciados, obtida a partir do *laser scanner*, deu origem ao modelo tridimensional do túnel. A aquisição remota dos dados mostrou-se prática e rápida, fato que favorece a segurança dos trabalhadores e a redução de custos de projetos. No modelo de visualização da nuvem de pontos, foram selecionados conjuntos de pontos que representam planos de descontinuidade na rocha. Esses pontos foram triangulados e resultaram em planos com direção e mergulho, que representam famílias de fraturas. Os dados obtidos indiretamente foram comparados com medidas de planos de fratura adquiridas em campo, na mesma área. A correlação entre os dados, embora parcial, mostrou que a aquisição de dados estruturais pelo método indireto pode ser útil em situações de risco de queda de blocos. O resultado demonstra a utilidade do *laser scanner* em regiões de difícil acesso, garantindo a segurança das equipes de avaliação; no entanto, ressaltou-se que são necessários avanços tecnológicos para tornar o processo de análise indireta mais robusto.

Palavras-chave: Análise Geotécnica; Túnel; Maciços Rochosos; LIDAR.

Abstract

This paper presents the results of the application of the laser scanner (*light detection and ranging* – LIDAR) in the identification of geological structures and its geotechnical implications in an underground gallery in order to prevent block fall. Part of the Tabiporã Mine gallery was scanned to obtain a georeferenced cloud point that was used to create a 3D model. Remote data acquisition using laser scanner proved to be a practical, fast and effective procedure to map geological structures. This approach can be useful to workers safety and to reduce project costs. The model generated by the cloud point enabled the selection of a set of points representing geological discontinuities. The points were triangulated and the result was a series of planes with determined strikes and dip directions, representing groups of fractures. Direct measures of fracture planes in the field were compared to the indirect data. The result shows the method's efficacy as an alternative method to identify fracture's direction in harmful areas with very difficult access. This indirect evaluation of rock masses can be used to ensure labors safety, although technological development of the method are still necessary to improve results.

Keywords: Geotechnical Analysis; Tunnel; Rock Mass; LIDAR.

INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico tem atingido rapidamente as principais áreas do conhecimento. Cada vez mais, o homem busca adquirir informações em menor tempo e com maior precisão, melhorando a quantificação e a previsão de suas análises. A aquisição de dados por *laser scanner* vem sendo usada em diversos setores da engenharia e da geologia na determinação do risco de queda de blocos e no estudo da estabilidade de taludes em estradas (e.g., Abellán et al., 2006; Sturzenegger e Stead, 2009; Nagalli et al., 2011; Assali et al., 2014). Esses autores citam como vantagens a aquisição de imagens em áreas de difícil acesso, a manutenção da segurança dos trabalhadores, a rapidez e a acurácia na aquisição e no processamento de banco de dados. Dessa forma, o levantamento remoto minimiza a introdução de erros derivados da atividade humana e acelera o processo de avaliação de áreas. Na prática, a técnica pode auxiliar na redução de custos do projeto, acelerar a obtenção de resultados e garantir a segurança dos técnicos.

A resolução dos equipamentos e a rapidez no processamento de dados vêm se desenvolvendo proporcionalmente ao aumento da capacidade dos processadores. A construção e a rápida manipulação dos modelos tridimensionais, com milhões de pontos, só foram possíveis devido ao avanço da tecnologia computacional, assim como ao desenvolvimento de *softwares* que auxiliam na análise geotécnica.

Neste trabalho foi realizada a aquisição de nuvem de pontos com o *laser scanner* em trecho de galeria de lavra subterrânea, com o objetivo de avaliar o risco de queda de blocos. Para a avaliação geotécnica, foi utilizado o *software* Geo01, que, fundamentado na triangulação Delaunay, extrai da nuvem de pontos a atitude de planos selecionados. Além disso, o trabalho buscou avaliar a eficiência do método de aquisição indireta de atitudes de planos de fraturas realizando a aquisição de atitudes de planos com bússola, no mesmo trecho da galeria. A escolha da galeria subterrânea como área de estudo se deu pela dificuldade da tomada de atitudes no teto do túnel, fato que pode ser minimizado pelo acesso virtual aos planos de fraturas. Buscou-se, dessa forma, testar o uso do imageamento com o *laser scanner* na análise de estabilidade em escavações subterrâneas. A integração de técnicas de aquisição direta e indireta de dados possibilitou a validação parcial do modelo remoto.

CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo localiza-se na região de Povinho de São João, no município de Campo Largo, a noroeste da cidade de Curitiba, no Estado do Paraná. A área, que representa a

principal mina de ouro do Estado do Paraná, é explorada pela Mineração Tabiporã há cerca de 30 anos (Figura 1). A extração é realizada em galerias subterrâneas sub-horizontais organizadas ao longo de um plano inclinado. A mina é organizada em seis túneis base (TB), utilizados na extração do minério.

A Mineração Tabiporã está localizada no Granito Passa Três e abrange área de aproximadamente 5 km², possui forma ovalada e alongada na direção N45E. O granito encontra-se em contato tectônico com as sequências metavulcanossedimentares dos Grupos Açungui e Setuva, sendo limitado por zonas de cisalhamento, ao norte pela Falha do Cerne e ao sul pela Falha da Boa Vista (Piekars, 1992; Cury, 2003) (Figura 1). Esse maciço é predominantemente constituído por sienogranito de granulometria média a grossa, textura inequigranular, estrutura maciça ou foliada. Há ocorrência de veios aplíticos, pegmatíticos e micrograníticos, além dos veios de quartzo ricos em sulfetos, nos quais se encontram os depósitos auríferos da região (Piekars, 1992).

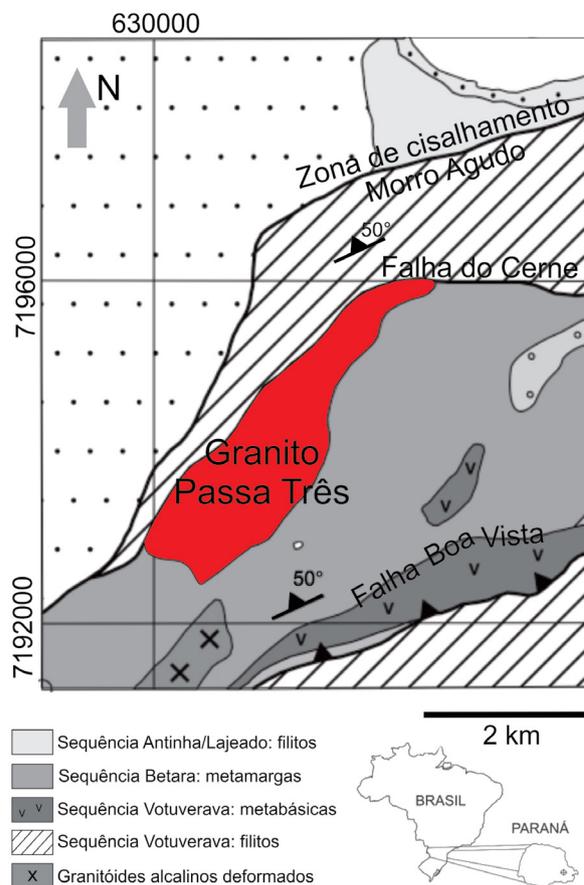


Figura 1. Mapa geológico esquemático mostrando os principais limites tectônicos do Granito Passa Três. Modificado de Cury et al. (2008).

Quanto aos aspectos estruturais, o Granito Passa Três apresenta alta densidade de fraturas, normalmente preenchidas por argilominerais, sericita, clorita, carbonato, óxidos e sulfeto (Piekars, 1992). O autor observa que o corpo granítico teve comportamento rígido durante as fases de cisalhamento transcorrente. A deformação foi acomodada em feições rúpteis de juntas e falhas, embora haja registro de faixas miloníticas pontuais. Piekars (1992) salienta que a distribuição de veios está associada a alterações hidrotermais, sendo que a sericitização e a argilização que se desenvolvem nesses planos diminuem o atrito interno, favorecendo a percolação de água, fato que aumenta o risco de desestabilização e queda de blocos. Picanço (2000) apresentou cem medidas de fraturas e associa as principais concentrações N20-30W ao padrão de falhamento regional, associado à Zona de Cisalhamento Transcorrente Lancinha.

SISTEMA LASER SCANNER

O sistema *laser scanner* gera coordenadas tridimensionais (x, y, z) de pontos constituintes de uma superfície, por meio da emissão e da captação de pulsos de *laser*. Esses pulsos são gerados e emitidos pelo sistema óptico do equipamento e com o auxílio de um espelho, denominado espelho de varredura, os feixes são direcionados para atingir a área de cobertura do imageamento (360° horizontal, 180° vertical).

O *laser* incidente é refletido na superfície atingida e parte do pulso de retorno é capturado pelo leitor do equipamento. Por intermédio do intervalo de tempo (Dt) entre o pulso de *laser* emitido e seu retorno, é possível determinar a distância entre o sensor e a superfície do objeto (Dalmolin e Santos, 2004).

Existem dois tipos de sistemas de varreduras a *laser*, classificados conforme o seu princípio de funcionamento:

os sistemas estáticos, também denominados LIDAR (*light detection and ranging*), e os sistemas dinâmicos ou aerotransportados. Os sistemas estáticos podem funcionar em *time-of-flight* (intervalo de tempo) ou diferença de fase, também conhecida como princípio de triangulação. O sistema *laser scanner* estático, por *time-of-flight*, determina a distância (Equação 1) por meio da medida do tempo de retorno do pulso *laser* emitido (Figura 2). A distância (D) (Equação 1) entre o sensor e o objeto pode ser determinada utilizando-se a velocidade da luz ($c = 300 \times 10^3 \text{ km/s}^2$), a constante $\frac{1}{2}$, utilizada para restringir o tempo, já que o sensor mede o tempo de ida e volta do sinal, e o Dt (D tempo) medido pelo sensor (Wutke, 2006).

$$D = \frac{1}{2} \Delta t \quad (1)$$

Em que:

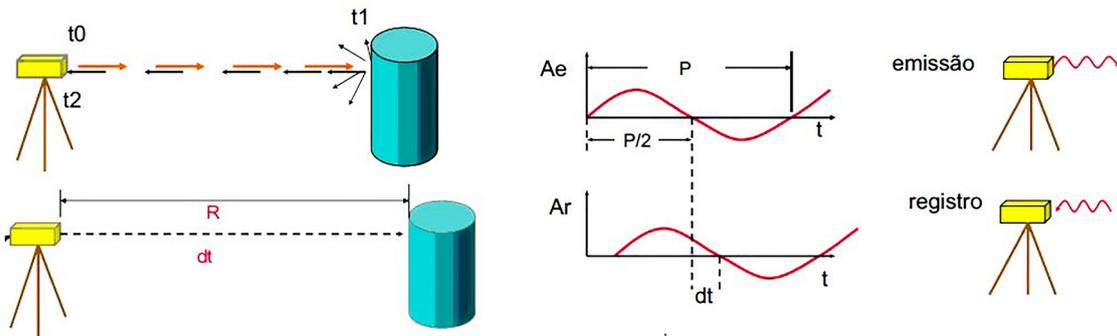
D = distância (metros);

c = velocidade da luz (m.s^{-2}); e

Δt = intervalo de tempo (segundos).

Já o sistema dinâmico utiliza o feixe ótico de alta potência direcionado com o auxílio do sistema de posicionamento de alta precisão (GPS) para medir a distância entre o ponto na superfície e o sensor (Dalmolin e Santos, 2004).

Além do tempo de trânsito do pulso *laser*, o sistema também registra a intensidade da energia contida no pulso refletido pelo objeto. A intensidade do pulso refletido pode ser utilizada para gerar “mapa” ou “imagem” associados à refletância das superfícies dos objetos imageados, de acordo com o comprimento de onda utilizado no levantamento (Dalmolin e Santos, 2004). Alguns modelos de sistemas *laser scanner* possuem câmera digital acoplada, o que permite a captação e associação do valor *red, green and blue* (RGB) para cada ponto obtido, com respectiva coordenada tridimensional.



Fonte: Vosselman et al., 2007.

t0: pulso disparado na direção do objeto; t1: tempo quando o pulso atinge o objeto; t2: tempo no instante que o pulso é captado pelo sensor; R: distância entre o sensor e o objeto; dt: diferença entre o tempo inicial e final; t: tempo; Ae: pulso emitido; Ar: pulso refletido; P: período da onda; P/2: metade do período de onda.

Figura 2. Esquema de funcionamento do *laser scanner time-of-flight* e medição do tempo por diferença de fase ou método da onda contínua.

Esse artifício possibilita a visualização da imagem com *pixels* georreferenciados.

Componentes do sistema *laser scanner*

O *laser* (*light amplification by stimulated emission of radiation*) é um dispositivo que produz radiação eletromagnética monocromática (comprimento de onda definido e único), coerente (todas as ondas dos fótons que compõem o feixe estão em fase) e colimada (propaga-se como um feixe de ondas praticamente paralelas). No sistema *laser scanner*, o *laser* é produzido pelo gerador de pulsos (Dalmolin e Santos, 2004), em que há o estímulo de cristal por um diodo semicondutor, resultando na emissão da radiação amplificada da luz (*laser*). O comprimento de onda gerado depende do material utilizado na produção do pulso, do sistema óptico e da forma de energizá-lo, porém, a onda produzida será sempre monocromática, ou seja, terá o mesmo comprimento de onda. A maioria dos sistemas *laser scanner* opera na faixa entre 0,8 e 1,6 μm do espectro eletromagnético (Dalmolin e Santos, 2004).

O *laser scanner* utiliza um feixe de *laser* para determinar a distância entre o objeto e o sensor, por intermédio da interação do gerador de pulsos com o conjunto óptico emissor e receptor, em uma unidade de registro de medições. O conjunto óptico constitui-se de espelhos, controlados por servomotores, encarregados de direcionar e distribuir o feixe de *laser* emitido. Os denominados espelhos de varredura permitem a cobertura de 360° da superfície horizontal e até 180° da vertical. Esse conjunto de espelhos também atua na captação dos sinais de retorno e no redirecionamento para o receptor. O sinal captado é filtrado para verificar se os pulsos recebidos possuem a mesma frequência do *laser* emitido (Dalmolin e Santos, 2004).

O resultado da coleta dos pulsos de *laser* emitidos e a distância dos pontos contidos nas superfícies imageadas constituem um conjunto de pontos com coordenadas tridimensionais (Figura 3). Esse conjunto de dados indiretos é chamado “nuvem de pontos”, devido à alta concentração de pontos gerados. A resolução da nuvem de pontos, determinada pela distância entre os pontos, depende do tamanho do menor objeto que se deseja imagear, da distância entre os objetos, do sensor e da acurácia do equipamento. O parâmetro distância entre os pontos deve ser fixado antes do início da varredura (Wutke, 2006), para que a malha de pontos gerados seja uniforme. O avanço da tecnologia tem permitido equipamentos com resolução cada vez maior em um menor tempo de varredura.

Os pontos obtidos pelo sistema estão referenciados ao sistema local de GPS ou ao ponto de amarração com coordenadas conhecidas; como no exemplo da Figura 3, o espelho rotativo seria a coordenada (0,0,0).

MATERIAIS E MÉTODOS

Aquisição indireta dos dados

O equipamento Laser Scanner Focus3D X 330, utilizado durante o levantamento, foi cedido pela FARO Technologies e apresenta as especificações sintetizadas na Tabela 1.

A aquisição dos dados indiretos por meio do *laser scanner* foi feita em parte do Túnel Base 4 (TB-04) da Mina Tabiporã, Campo Largo, Paraná. O nível analisado (TB-04) (Figura 4)

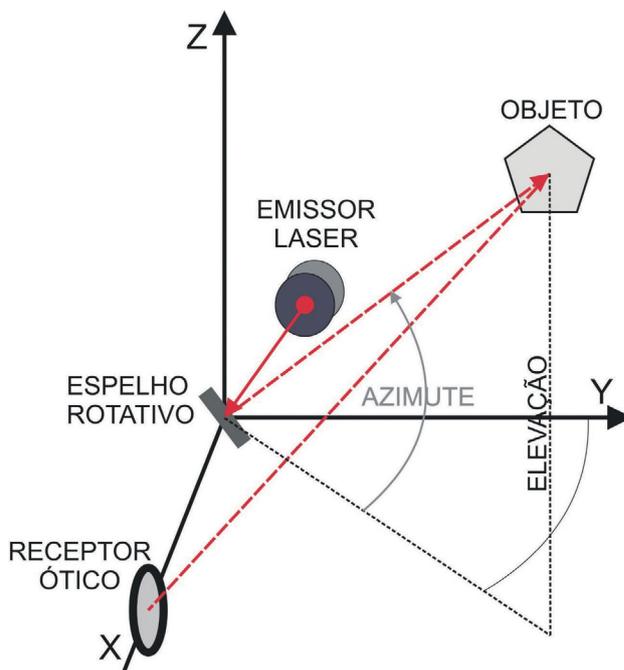


Figura 3. Diagrama da concepção das coordenadas dos pontos obtidos pelo *laser scanner*. Diagrama modificado de NSTA (tradução livre dos termos).

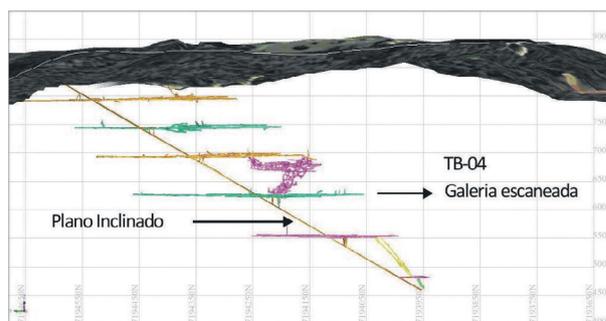


Figura 4. Seção N-S da mina Tabiporã para visualização do plano inclinado e dos seis túneis base utilizados para acesso e retirada de minério. Destaque em rosa das galerias do TB-04 selecionadas para aquisição de dados com o *laser scanner*. Imagem SURPAC cedida pela Mineração Tabiporã.

está ativo para a mineração, sendo realizada constante inspeção de blocos instáveis e de convergência das seções da galeria. O acesso ao túnel foi feito pelo plano inclinado de 30° (Figura 4), com o apoio do geólogo responsável Sandro Notto Villanova e do técnico da FARO.

Para este estudo foram posicionadas 9 estações de varredura com o *laser scanner*, que cobriram área de cerca de 2.400 m². Cada varredura foi realizada com a montagem do tripé e a fixação do equipamento (Figura 5A), configurando uma estação/base ou varredura. Em cada estação foram posicionados os alvos esféricos, utilizados para a correlação entre as varreduras (Figura 5B).

Na primeira base/estação, um alvo esférico foi colocado sob o ponto de coordenadas conhecidas, previamente determinadas pelo sistema topográfico da Mina Tabiporã.

Tabela 1. FARO Laser Scanner Focus3D X 330.

| | |
|---|--|
| <i>Ranging unit</i> | |
| Alcance (<i>indoor</i> ou <i>outdoor</i>) | 0,6 a 330 m |
| Velocidade (pontos.segundo ⁻¹) | 122000/244000/488000/976000 |
| Precisão | ±2 mm |
| <i>Color unit</i> | |
| Resolução | Maior que 70 megapixels |
| <i>Deflection unit</i> | |
| <i>Range</i> vertical | 300° |
| <i>Range</i> horizontal | 360° |
| <i>Step size</i> vertical | 0.009° |
| <i>Step Size</i> horizontal | 0.009° |
| Velocidade máxima do scanner na vertical | 5.820 rpm ou 97 Hz |
| <i>Laser</i> (transmissor ótico) | |
| Laser | Classe 1 |
| Comprimento de onda | 1.550 nm |
| Divergência | 0,19 mrad (0,011°) |
| Posicionamento | GPS integrado |
| Especificações de <i>hardware</i> | |
| Fonte de energia | 14,4 V (bateria interna) |
| Duração da bateria | 4,5 horas |
| Temperatura ambiente | 5 a 40°C |
| Umidade | Atmosfera não condensada |
| Interface com o usuário | Tela <i>touchscreen</i> e controle remoto WLAN |
| Peso | 5,2 kg |
| Dimensões | 240 x 200 x 100 mm |
| Acessórios | |
| Tripé | |
| Alvos esféricos | 6 unidades |

Na fase pré-levantamento foram determinados os padrões do levantamento e a distância entre os pontos, definida de acordo com a acurácia máxima do equipamento. O levantamento foi realizado com espaçamento de 0,7 mm. A falta de luz natural no interior da mina também contribuiu para a utilização do menor espaçamento entre os pontos, possibilitando maior detalhamento das estruturas sem o auxílio das imagens da câmera fotográfica.

Processamento e tratamento dos dados

A etapa inicial de processamento, que corresponde à junção dos pontos imageados pelas nove varreduras, foi realizada com a amarração dos alvos esféricos (Figura 5B). O arquivo inicial gerado apresenta formato “.isproj”, que contém a união de todas estas leituras com coordenadas x, y e z, resultando em nuvem de pontos tridimensional (Figura 6). O *software* de manipulação FARO SCENE permitiu a visualização do levantamento integrado, assim como a identificação individual de cada uma das nove estações (Figura 6). Além disso, o *software* permite a visualização tridimensional do levantamento, simulando a navegação virtual pelo conjunto de pontos da galeria (Figura 7).

Os dados foram processados no *software* FARO SCENE 5.3.3.38662. Nessa etapa foram selecionados e delimitados os planos de fratura para aquisição de atitudes estruturais de modo indireto. A visualização dos planos foi feita no modo “visualização em planta”. A delimitação dos pontos que correspondem à superfície das fraturas foi realizada com a ferramenta “seleção de plano” (Figura 8). Os planos foram escolhidos de modo aleatório, para que não houvesse tendência na comparação com os dados diretos. Os pontos de varredura dos planos selecionados foram exportados em arquivo.ptx.

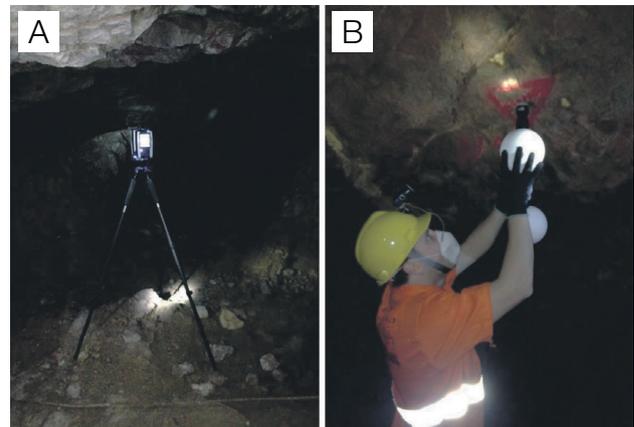


Figura 5. Imagens do levantamento de campo. (A) equipamento *laser scanner* montado sobre tripé e em funcionamento; (B) colocação de alvo esférico em ponto de coordenadas conhecidas. As mesmas esferas foram utilizadas na correlação entre as varreduras.

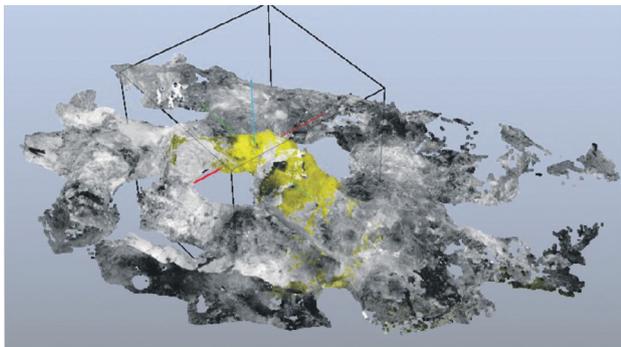


Figura 6. Imagem da visualização em perspectiva da integração da nuvem de pontos das nove estações. Destaque em amarelo dos pontos pertencentes à primeira estação de varredura (Scan001), com visualização dos eixos x, y e z dentro do polígono de localização. Visualização no *software* FARO SCENE.

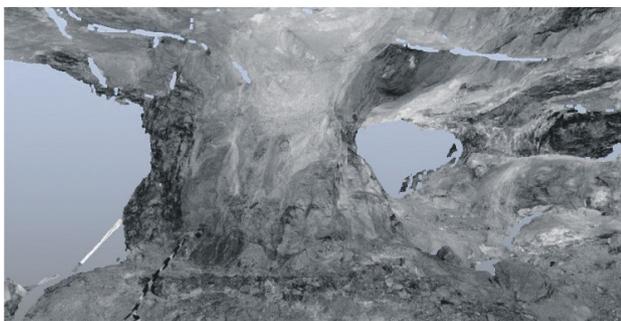


Figura 7. Vista tridimensional da galeria com a visualização de um dos pilares de sustentação escaneado na base 4. Visualização no *software* FARO SCENE.

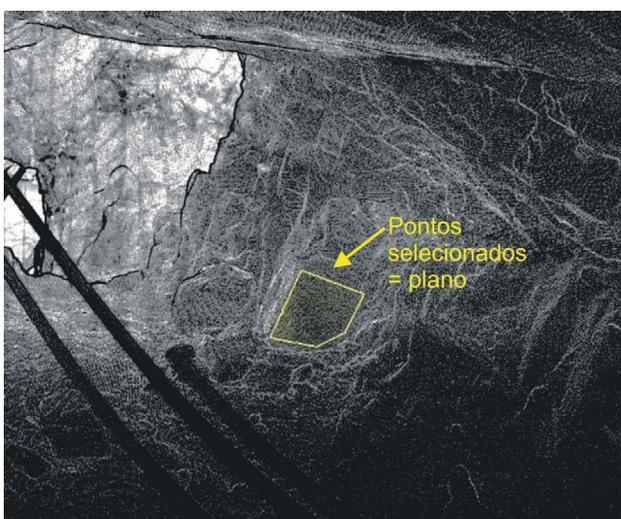


Figura 8. Seleção do plano de fratura, destacado em amarelo, modo visualização planar. Os pontos selecionados (cerca de 10 mil) foram exportados para posterior análise estrutural. Visualização no *software* FARO SCENE.

Para validação do método de obtenção de atitudes pela nuvem de pontos, foram selecionados 110 conjuntos de pontos, que representam planos de fraturas. Esses conjuntos de pontos foram exportados em arquivo.ptx., que contém as coordenadas x, y e z de cada ponto. O mesmo arquivo pode conter, no caso da associação com imagens da câmera fotográfica, valores de RGB e intensidade de sinal organizados em tabela.

A segunda parte do processamento foi desenvolvida no *software* Geo01, gerado em linguagem de programação Delphi (Rostirolla et al., 2006). A base de cálculo desse aplicativo consiste no uso da triangulação Delaunay, em que cada ponto é o vértice de um triângulo (Figura 9). Nessa triangulação, o círculo circunscrito em cada triângulo não contém nenhum outro ponto da triangulação, ou seja, a cada três pontos mais próximos interligados tem-se um triângulo Delaunay (Figura 10), que pode ser interpretado como um plano.

Com a conversão do ângulo trigonométrico em ângulo azimutal temos um plano com direção e mergulho determinados, na notação geológica. O arquivo de saída do *software*

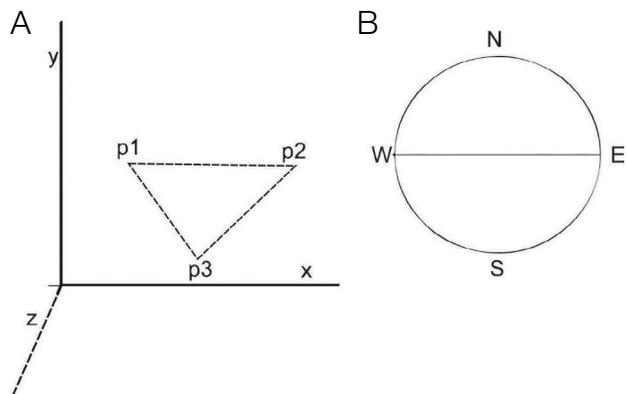


Figura 9. Esquema representando um triângulo/plano (A) formado entre pontos p1, p2 e p3, contidos no plano xy, correspondente a um plano vertical no campo. Em (B) o mesmo plano contido no plano xy e sem inclinação no plano z (A) é representado em notação geológica.

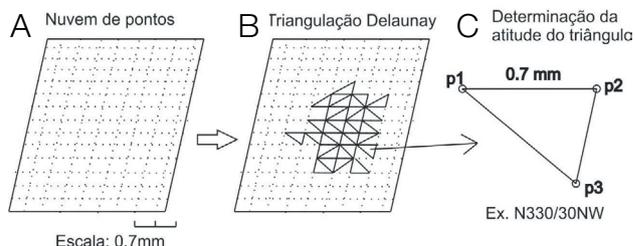


Figura 10. Esquema do processamento de dados. (A) Conjunto de pontos que representam o plano selecionado; (B) pontos georreferenciados contidos no plano transformados em triângulos; (C) para cada três pontos triangulados é determinada a atitude.

Geo01 é um arquivo.txt com duas colunas, que representam o mergulho e a direção de mergulho de cada plano triangulado. O número de atitudes por plano varia conforme a quantidade de pontos selecionados inicialmente. Neste estudo, a planilha de saída contém, para os 110 planos selecionados, entre 200 e 12.000 atitudes trianguladas.

A terceira etapa do processamento consistiu em inserir as atitudes do arquivo.txt em *software* de análise estrutural. Para isso, foram utilizados os *softwares* Stereo32 e Dips (Rocscience). Para cada plano selecionado foi gerado um diagrama de contorno dos planos triangulados. Dessa forma, obteve-se a direção principal de cada plano. Em cada diagrama foram selecionadas as concentrações de polos mais significativas. Como resultado parcial, foram obtidas as orientações de 110 planos de fratura pelo método indireto.

Aquisição direta dos dados estruturais

Durante a aquisição da nuvem de pontos, foi realizado o levantamento estrutural de 110 atitudes de planos de fraturas com a bússola Clark. Essas atitudes foram tomadas tanto nos pilares de sustentação quanto no chão e no teto

da galeria, e foram escolhidas de modo aleatório, visando capturar várias famílias de fraturas e seguindo o método de tomada de atitudes clássico, em campo. Os dados obtidos foram tratados nos *softwares* Stereo32 e Dips (Rocscience).

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS DADOS MEDIDOS EM CAMPO – DADOS DIRETOS

As 110 atitudes obtidas em campo foram analisadas em diagrama de contorno (Figura 11), que evidenciou 5 concentrações de polo, interpretadas como 4 famílias de fraturas principais (A, B, C e D) e 1 secundária (E).

Análise de queda de blocos

A análise da estabilidade foi feita para determinar a probabilidade de queda de blocos do teto da escavação, sem abranger a estabilidade nas paredes laterais da escavação. As famílias de fraturas foram analisadas em trios: A-B-C; A-B-D; A-C-D e B-C-D. Por isso, foram feitas combinações contemplando todas as possibilidades.

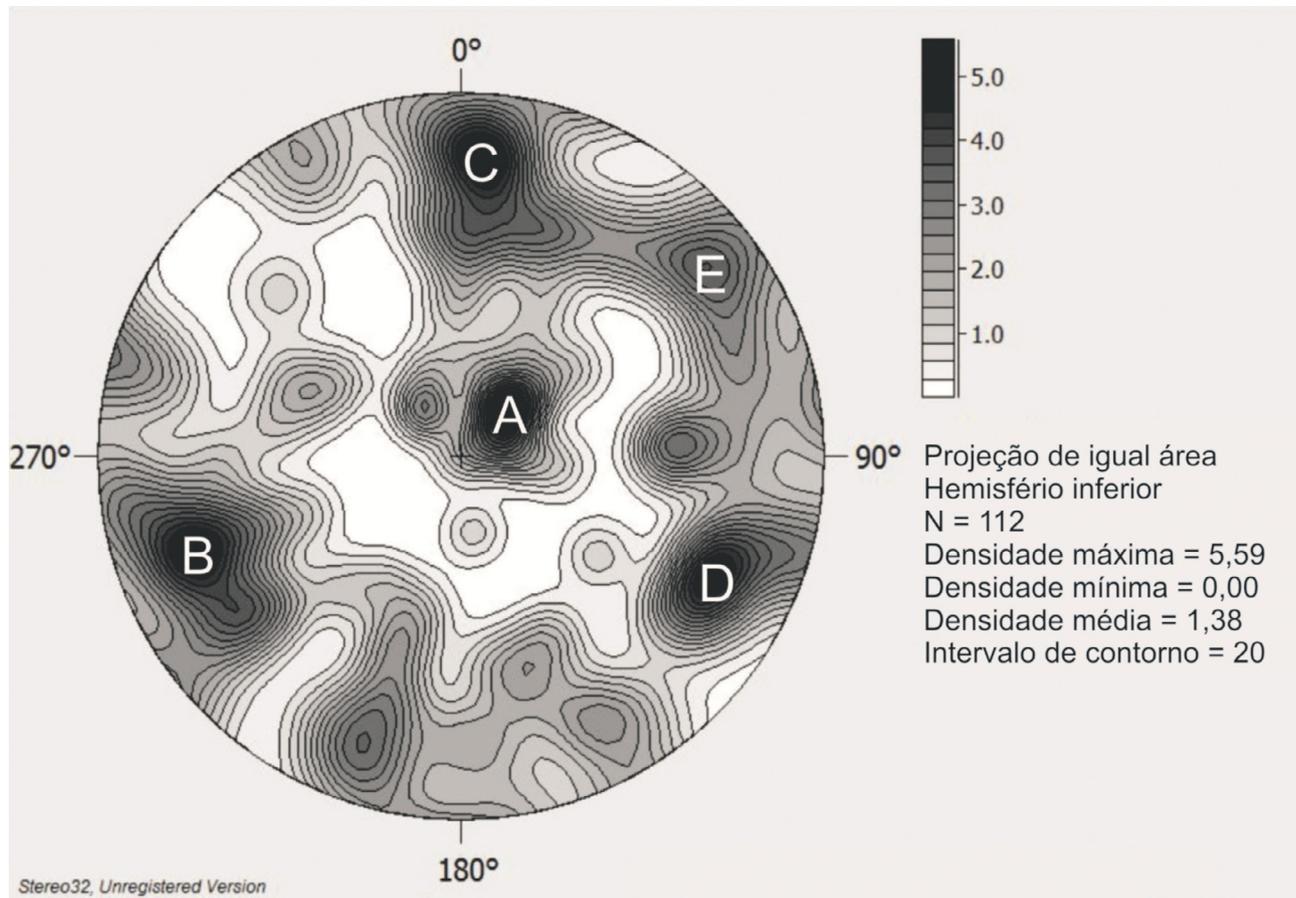


Figura 11. Diagrama estereográfico de contorno dos polos das fraturas, destacando cinco concentrações máximas (A, B, C, D e E) que representam as principais famílias de fraturas. Visualização no *software* Stereo32.

Em todas as análises há condições para a queda de blocos por gravidade (Figura 12A, 12B e 12C). Na condição apresentada na Figura 12D, combinação das famílias B e D, o terceiro plano, necessário à formação do bloco, é o plano horizontal do teto da escavação (representado pelo grande círculo).

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS DADOS ADQUIRIDOS PELO LASER SCANNER – DADOS INDIRETOS

A nuvem de pontos, produzida pelo imageamento *laser*, reflete a superfície de toda a galeria. Observando a “imagem em pontos” foi possível identificar os planos de fratura e selecionar os pontos correspondentes àquele plano. Os pontos selecionados e triangulados tiveram o

azimute e o mergulho determinados. Esse conjunto de atitudes foi plotado em diagrama de contorno (Figura 13). O diagrama final apresenta 124 medidas, pois em alguns planos foram identificadas mais de uma concentração e ambas foram consideradas.

Análise de queda de blocos

Da mesma forma como foram analisados os dados diretos, foi realizada, pela nuvem de pontos do *laser scanner*, a análise de risco de queda de blocos para os planos de fraturas obtidos de forma indireta. Pretende-se, dessa forma, avaliar se, mesmo sem a identificação de algumas direções de fraturas pelo método indireto, fica caracterizado o risco de queda de blocos por gravidade ou deslizamento.

Na análise A (Figura 14A) há a formação de bloco que não contém o ponto central do diagrama, assim, a queda

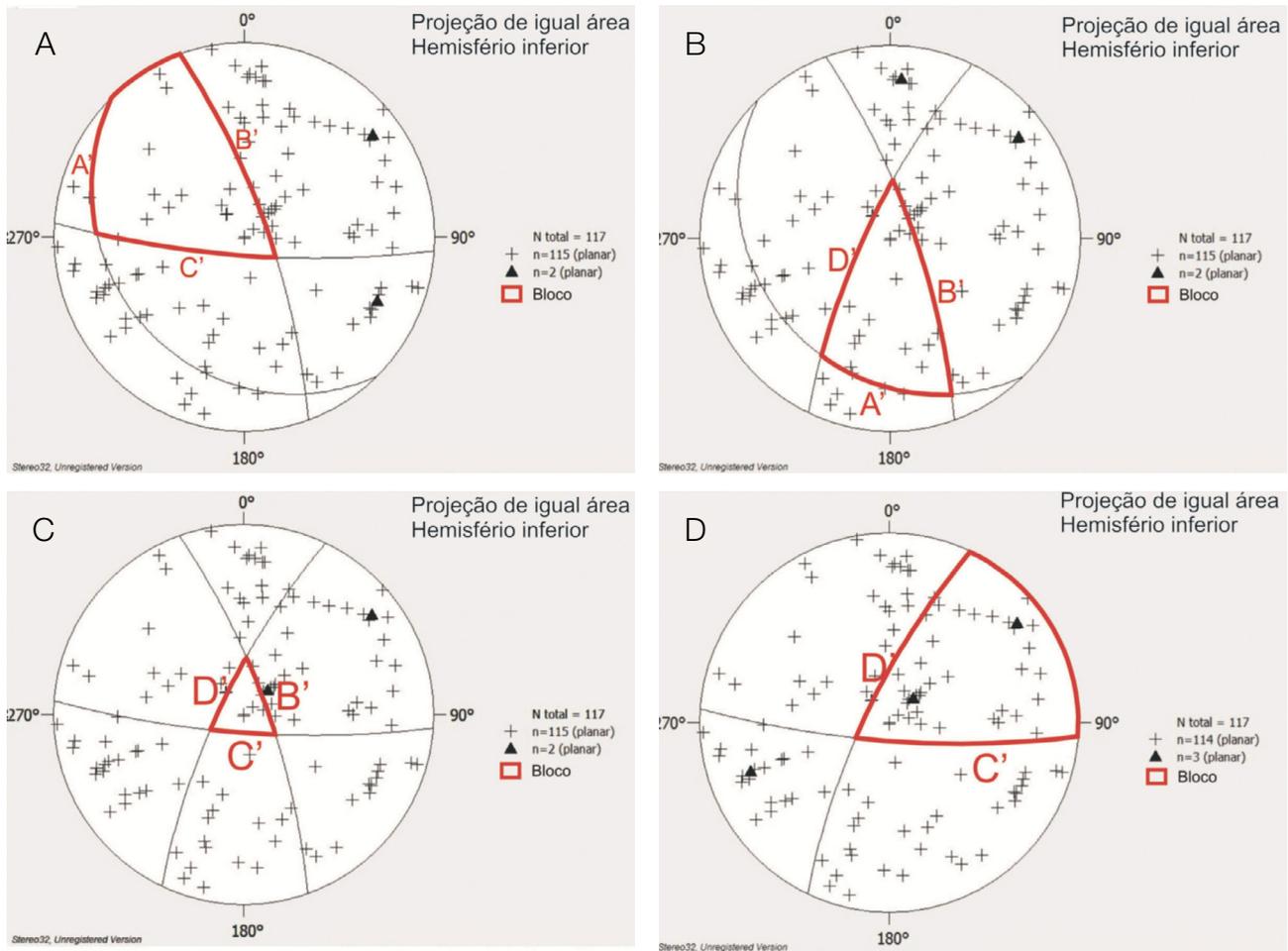


Figura 12. Diagramas de análise de estabilidade de bloco com três descontinuidades. Em todas as análises há ocorrência de queda de blocos, uma vez que a figura de interferência formada inclui a linha imaginária vertical representada pelo ponto no centro do diagrama; (A) plano A' representa a concentração de polos A (Figura 11), plano B' representa a concentração de polos B (Figura 11) e o plano C' representa a concentração de polos C (Figura 11); (B) planos: A', B' e D'; (C) planos: B', C', D'; (D) planos: B' e D'.

do bloco é condicionada pela possibilidade de deslizamento dos planos. Nos diagramas das análises B, C e D (Figuras 14B, 14C e 14D), observa-se o risco de queda de bloco por gravidade. Na análise IV, há a formação de bloco que não contém o ponto central do diagrama, assim, a queda do bloco é condicionada pela possibilidade de deslizamento dos planos. Para essa análise foi estipulado coeficiente de atrito de 30° (Figuras 15A e 15B). O ângulo de atrito foi determinado pelas observações de campo, como fraturas preenchidas por lâminas de argila, e por informações do *staff* da mina.

COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO ENTRE OS DADOS DIRETOS E INDIRETOS

A comparação entre os dados diretos e indiretos foi feita com base nos diagramas estereográficos de contorno dos polos, adquiridos para cada método trabalhado. Os planos obtidos, tanto em campo quanto pela nuvem de pontos, foram escolhidos de forma aleatória, visando à validação

do método indireto. Comparando os dois resultados, observa-se que poucos máximos estruturais encontram boa correlação. As Figuras 11 e 13 mostram os diagramas estruturais, destacando as principais concentrações obtidas pelos métodos.

De maneira geral, a comparação entre os dados diretos e indiretos é pouco consistente. Em primeira análise, nota-se que os dados obtidos em campo (Figura 11) identificaram maior número de família de fraturas. A análise mais prolongada dos diagramas mostra algumas sutis tendências de correlação. As duas principais famílias de fraturas, A (Figura 11) e I (Figura 13), podem ser consideradas correlacionáveis, pois ambas apresentam a maior concentração de polos na porção central do diagrama, representando planos com baixo mergulho, sub-horizontais, com pouca variação de direção. A existência dessas concentrações, em ambas as análises, permite afirmar que há abundância de planos sub-horizontais na galeria. Isso pode ter interferido na seleção de planos a partir da nuvem de pontos. Por isso, as concentrações I e III (Figura 13), localizadas no centro do diagrama, e com maior dispersão de medidas,

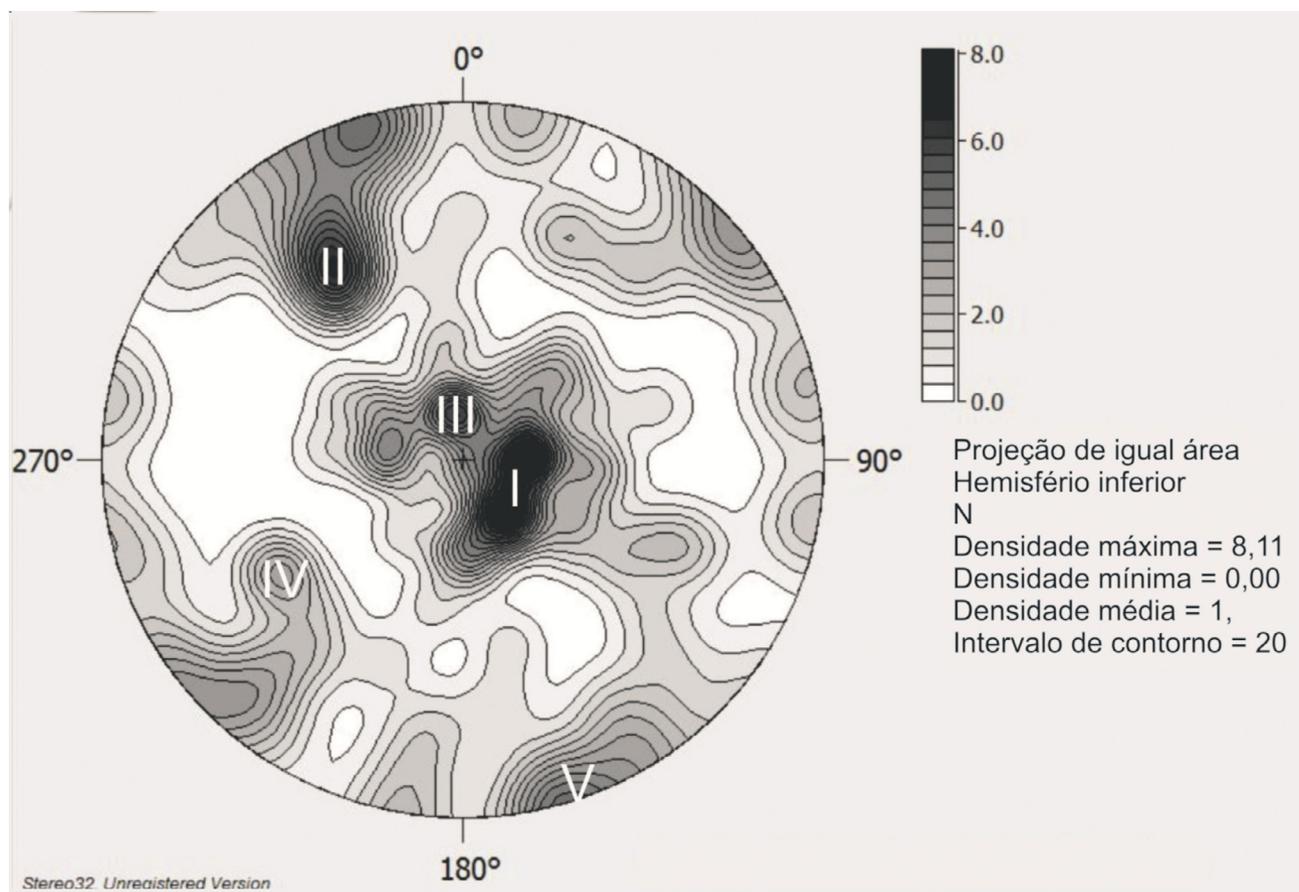


Figura 13. Diagrama estereográfico de contorno dos polos das atitudes obtidas de forma indireta, destacando três concentrações máximas (I, II e III) e duas secundárias (IV e V) que representam as principais famílias de fraturas, dados não declinados. Visualização no software Stereo32.

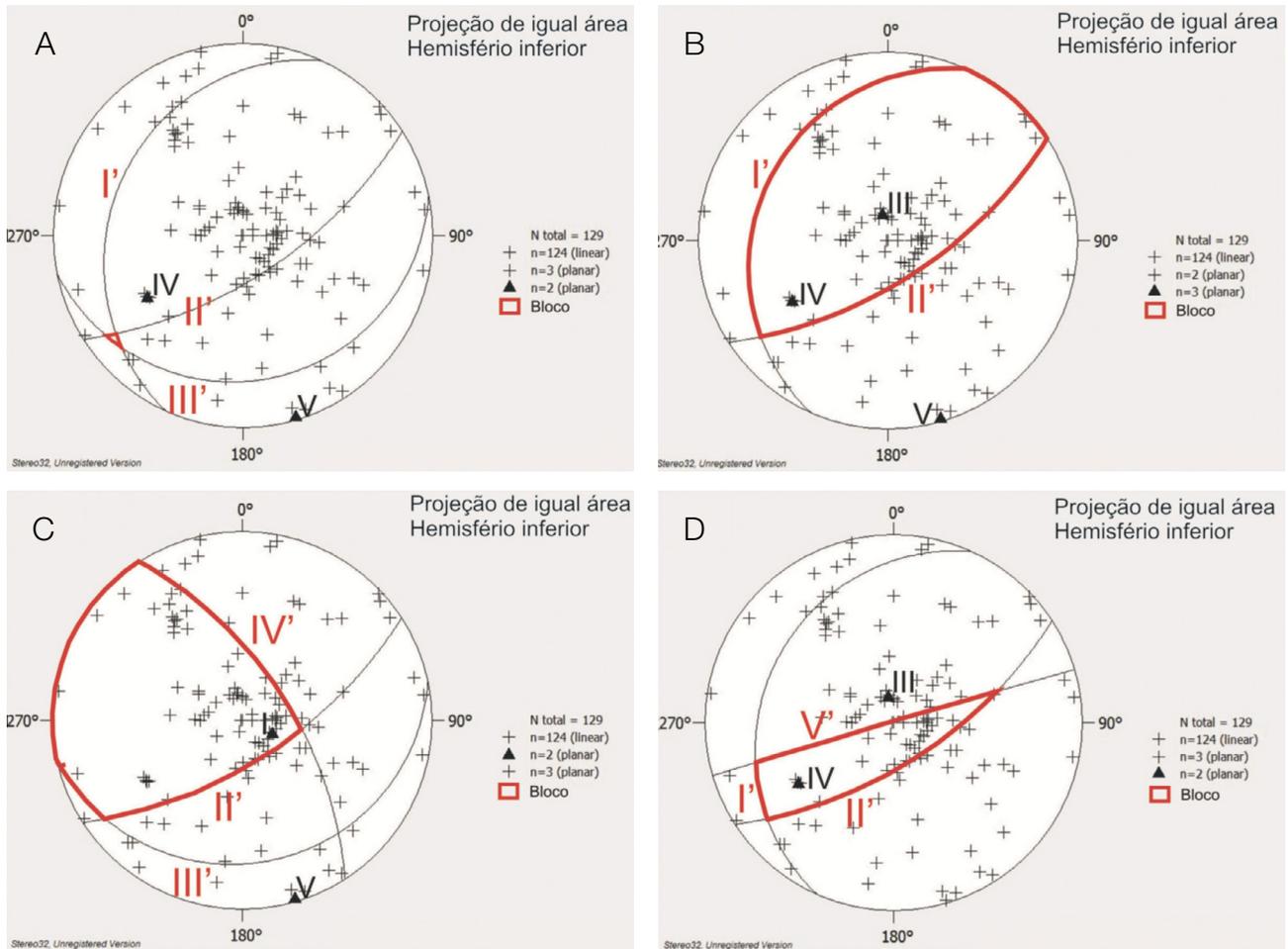


Figura 14. Alguns exemplos de diagramas de análise de estabilidade onde há queda de bloco por gravidade, os planos representam famílias de fraturas obtidas pela análise de dados indiretos; (A) plano I representa a concentração de polos I (Figura 13), plano II representa a concentração de polos II, e plano III representa a concentração de polos III, e assim respectivamente; (B) planos I, II e IV; (C) planos II, III e V; (D) planos I, III e V. Visualização no *software* Stereo32.

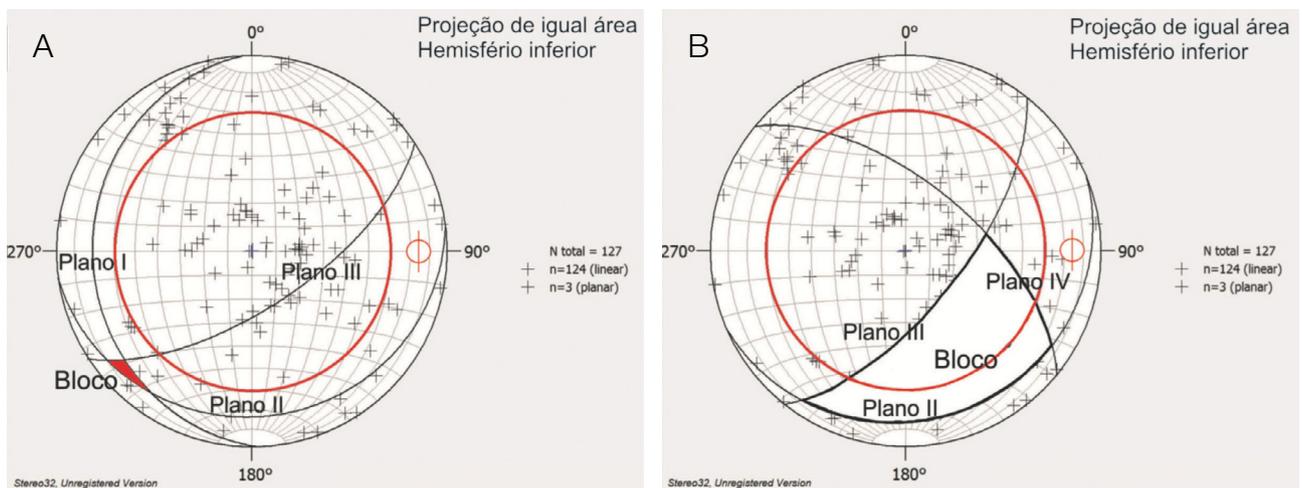


Figura 15. Diagramas de análise de estabilidade; (A) análise de estabilidade I, II e III (Figura 14) que resulta em queda de bloco com deslizamento em um dos planos; (B) análise de estabilidade II, III e IV, resulta em bloco estável. Ângulo de atrito estimado: 30°. Visualização no *software* Dips.

podem representar maior detalhamento da família de fraturas identificada em A (Figura 11). A maior dispersão de medidas também pode ser atribuída à iluminação da imagem digital e a vícios na seleção de planos a partir da nuvem.

Outra associação percebida configura-se nas concentrações C (Figura 11), que representam fraturas verticais a sub-verticais, com direção N10-20E e mergulho para NW, com a concentração II (Figura 13), subvertical, N30E com mergulho NW. As concentrações B (Figura 11) e IV (Figura 13) apresentam boa correlação de direção, porém, mostram diferente densidade de dados. Isso pode ser explicado pela imperfeição no método de seleção dos planos.

De maneira geral, observa-se a correlação parcial entre as principais famílias de fraturas identificadas pelos dois métodos de aquisição. A aquisição de medidas em campo mostrou-se mais eficiente na identificação de famílias de fraturas (Figura 11), enquanto no método indireto obteve-se grande densidade de planos na concentração mais representativa: I (Figura 13).

Embora possa ser notada alguma semelhança entre os dados, a avaliação de risco de queda de blocos (Figuras 12 e 14) indica que o método indireto foi menos eficiente na identificação do risco. O número limitado de famílias de fraturas, obtidas pelo método indireto, dificultou a análise de risco, minimizando os riscos reais.

CONCLUSÕES

O estudo comparativo entre os dados diretos e indiretos para a análise de estabilidade em escavações mostrou correlação parcial entre os métodos, indicando que a técnica pode ser interessante e aplicável ao objetivo. Porém, algumas observações são pertinentes:

- O avanço na tecnologia *laser scanner* permite a aquisição de dados de maneira rápida, precisa e com boa representação da superfície, devido ao espaçamento de 7 mm entre os pontos;
- Apesar do avanço computacional, o processamento dos dados mostrou-se demorado, sendo a maior dificuldade a definição dos planos de fratura;
- A correlação parcial dos dados pode ser resultado de efeito de vício na escolha de atitudes pelo modo “visão planar” na seleção de pontos na nuvem;
- Os dados estruturais obtidos em campo mostraram-se mais consistentes e permitiram a visualização de mais planos de fraturas. Dessa forma, permitiram melhor análise de estabilidade na escavação;
- A análise de estabilidade considerando apenas as medidas indiretas pode trazer prejuízos aos estudos geotécnicos, uma vez que essas não definiram de maneira clara os principais planos de fraturas.

São sugestões para o aprofundamento e o desenvolvimento de outras etapas de trabalho:

- Método para rápida aquisição de planos e formação de superfícies a partir da nuvem de pontos, além de simplificação do método de determinação da atitude dos planos;
- Método para a seleção de pontos em modo de visualização 3D, para melhor dimensionamento e seleção dos planos de fratura;
- Estudo geológico estrutural prévio, para melhor determinação das correlações e dos métodos utilizados para selecionar os planos de interesse.

AGRADECIMENTOS

À Faro Technologies, na pessoa do Sr. Adriano Scheuer, pelo empréstimo do equipamento e pelo auxílio durante o levantamento em campo. À Mineração Tabiporã, pela autorização de acesso às galerias da mina. Aos geólogos Sandro Notto Villanova e José Bazille Newton, pela ajuda em campo. À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Departamento de Geologia, pela infraestrutura para o processamento das imagens.

REFERÊNCIAS

- Abellán, A., Vilaplana, J. M., Martínez, J. (2006). Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering Geology*, 88, 136-148.
- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemain, T., Pollet, N., Viguier, F. (2014). Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laserscanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. *Journal of Structural Geology*, 66, 102-114.
- Cury, L. F. (2003). *Geocronologia e Litogeoquímica dos stocks graníticos da porção Sudeste da Faixa Apiaí, Estado do Paraná*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP.
- Cury, L. F., Siga Jr., O., Harara, O. M. M., Prazeres Filho, H. J., Basei, M. A. S. (2008). Aspectos tectônicos das intrusões dos Granitos do Cerne, Passa Três e Rio Abaixo, sudeste do Pré-cambriano Paranaense. Estudo baseado em datações ³⁹Ar-⁴⁰Ar em Micas. *Geologia USP. Série Científica*, 8(1), 87-104.
- Dalmolin, Q., Santos, D. R. (2004). *Sistema Laserscanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento*. 3.^aed. Curitiba: UFPR.

Nagalli, A., Fiori, A. P., Nagalli B. (2011). Método para aplicação de escâner a laser terrestre ao estudo da estabilidade de taludes em rocha. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(1), 56-67.

Picanço, J. L. (2000). *Composição isotópica e processos hidrotermais associados aos veios auríferos do maciço granítico Passa Três, Campo Largo, PR*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP.

Piekars, G. L. F. (1992). *O granito Passa Três – PR e as mineralizações auríferas associadas*. Dissertação (Mestrado). Campinas: UNICAMP.

Rostirolla, S. P., Mezzomo, E., Figueira, I. R., Kraft, R. P., Mancini, F., Figueira, E. G., Machado, A. M. L., Mitishida, E. A., Bartoszeck, M., Campos, A. F., Brunetta, R., Santos, T. B.,

Ramiro, A. P. (2006). Relatório Final do Projeto: Imageamento 3D e arquitetura de elementos essenciais de sistemas petrolíferos. [Não Publicado] Realização: LABAP, UFPR e PETROBRAS.

Sturzenegger, M., Stead, D. (2009). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106, 163-182.

Vosselman, G., Hellmeyer, A., Centeno, J., Mitishida, E., Philips, J. (2007). Curso Sensoriamento remoto por LIDAR (LIDAR Remote Sensing). *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Acesso em: 20 de setembro de 2014, <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/pdf/curso10/Centeno/centeno.pdf>>.

Wutke, J. D. (2006). *Métodos para a avaliação de um sistema Laser Scanner terrestre*. Dissertação (Mestrado). Curitiba: UFPR.