

GABRIELA REIS PIAZZETTA

USO DO LASER SCANNER NO IMAGEAMENTO E ANÁLISE DE  
ESTABILIDADE EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS, COMPARAÇÃO COM  
OS DADOS OBTIDOS EM CAMPO, MINA TABIPORÃ – CAMPO LARGO/PR

CURITIBA  
2014

GABRIELA REIS PIAZZETTA

USO DO LASER SCANNER NO IMAGEAMENTO E ANÁLISE DE  
ESTABILIDADE EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS, COMPARAÇÃO COM  
OS DADOS OBTIDOS EM CAMPO, MINA TABIPORÃ – CAMPO LARGO/PR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito para a conclusão no curso de  
graduação em Geologia, do Setor de Ciências  
da Terra da Universidade Federal do Paraná.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra. Bárbara Trzaskos  
Co-orientador: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima  
Machado

CURITIBA  
2014

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

GABRIELA REIS PIAZZETTA

USO DO LASER SCANNER NO IMAGEAMENTO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS, COMPARAÇÃO COM OS DADOS OBTIDOS EM CAMPO, MINA TABIPORÃ – CAMPO LARGO/PR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a conclusão do curso de graduação em Geologia, do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

---

Prof<sup>a</sup> Dra. Bárbara Trzaskos  
Orientadora – Departamento de Geologia  
Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná

---

Dra. Adriana Ahrendt  
Geóloga consultora do Grupo EDP-BR (Energias de Portugal no Brasil)

---

Prof Msc. Fernando Mancini  
Departamento de Geologia  
Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 05 de dezembro de 2014

## **AGRADECIMENTOS**

A orientadora Professora Dra. Bárbara Trzaskos pela dedicação aplicada para a possível realização deste trabalho, orientação, acompanhamento em campo e tempo despendido.

A empresa FARO pelo empréstimo do equipamento Laser Scanner, equipamentos de apoio e pela liberação do técnico durante o levantamento. Especial agradecimento ao Sr. Adriano Scheuer pelo acompanhamento durante a realização deste trabalho, processamento preliminar da nuvem de pontos e dedicação.

À mineração Tabiporã por autorizar o levantamento nas galerias da mina e pelo apoio logístico com locomoção, equipamento de segurança e apoio de campo. Ao geólogo responsável, Sandro Notto Villanova, pelo acompanhamento durante o levantamento de campo e fornecimento das imagens Surpac.

Ao co-orientador Professor Dr. Álvaro M. L. Machado pelo contato com a empresa FARO, disponibilização do computador, dedicação ao processamento dos dados, apoio técnico e compartilhamento do conhecimento.

A Universidade Federal do Paraná e ao Departamento de Geologia pelo ensino, espaço físico e oportunidade.

A família, aos amigos e aos amores por me completarem.

*“Take a walk on the wild side”  
Lou Reed*

## RESUMO

O uso do Laser Scanner na análise geotécnica de queda de blocos de porção da galeria da mineração Tabiporã, têm como objetivo a determinação de uma nuvem de pontos georrefenciados, adquirindo dados remotamente, de modo prático, rápido e eficaz, gerando um modelo 3D que prioriza a segurança dos trabalhadores e diminuição de custos de projetos. No modelo de visualização da nuvem de pontos foram selecionados conjuntos de pontos que representam planos de descontinuidade na rocha, estes foram triangulados e resultaram em planos com direção e mergulho que representam famílias de fraturas da rocha. Os dados obtidos indiretamente foram comparados com a medida de planos de fratura efetuadas no campo. Os resultados comparativos não foram conclusivos até esta fase, embora a técnica se mostre interessante e aplicável ao objetivo..

Palavras-Chave: Laser scanner, análise geotécnica, nuvem de pontos, modelo 3D.

## **ABSTRACT**

The use of Laser Scanner in geotechnical analysis of block portions drops of Tabiporã mining gallery are aimed at determining a geo-referenced points cloud, remotely acquiring data, in a practical way, fast and effective, in order to create a 3D model that prioritizes worker safety and cost reduction projects. From the points cloud model were selected sets of points representing planes of discontinuity in rock, these were triangulated and resulted in plans with specific direction and dip representing families of fractures in the rock. The data were compared with the indirect measure of fracture planes taken in the field. The comparative results were inconclusive up to this stage, although the technique will prove interesting and relevant to the aim.

Keywords: Laser scanner, geotechnical analysis, points cloud, 3D model

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1: MAPA DE LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO PARTINDO DO MUNICÍPIO DE CURITIBA ATÉ A MINERAÇÃO TABIPORÃ, ONDE FOI REALIZADO O ESTUDO. .... 3
- FIGURA 2: MAPA GEOLÓGICO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO OS PRINCIPAIS LIMITES TECTÔNICOS E FÁCIES DO GRANITO PASSA TRÊS. MODIFICADOS DE CURY, 2003. .... 5
- FIGURA 3: (A) DESENHO ESQUEMÁTICO DE SISTEMA DE FRATURAS COM RISCO DE QUEDA POR AÇÃO DA GRAVIDADE. A LINHA VERTICAL TRAÇADA QUE PASSA PELO ÁPICE E PELA BASE DO BLOCO INDICA A CONDIÇÃO PARA A QUEDA DO BLOCO POR GRAVIDADE. (B) DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO REPRESENTANDO O DESENHO (A), BLOCO FORMADO POR DUAS DESCONTINUIDADES E O PLANO HORIZONTAL DO TETO DO TÚNEL (CIRCUNFERÊNCIA NO DIAGRAMA), A LINHA VERTICAL É REPRESENTADA PELO PONTO CENTRAL DO DIAGRAMA. (C) QUEDA DE BLOCO POR GRAVIDADE, FORMADO POR TRÊS DESCONTINUIDADES. FONTE: FIORI E CARMIGNANI, 2009. .... 8
- FIGURA 4: (A) DESENHO ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE FRATURAS COM RISCO DE QUEDA POR DESLIZAMENTO. A LINHA VERTICAL TRAÇADA QUE PASSA PELO ÁPICE DO BLOCO E NÃO PASSA PELA BASE DESTA REPRESENTA A CONDIÇÃO PARA A QUEDA DO BLOCO POR DESLIZAMENTO. (B) DIAGRAMA REPRESENTANDO O DESENHO (A), ONDE PARTE DA FIGURA DE INTERFERÊNCIA ESTÁ DENTRO DO CONE DO ÂNGULO DE ATRITO ( $\phi$ ). FONTE: FIORI E CARMIGNANI, 2009. 9
- FIGURA 5: DIAGRAMA REPRESENTANDO A CONDIÇÃO DE BLOCO ESTÁVEL, A FIGURA DE INTERFERÊNCIA NÃO SECCIONA O CONE DO ÂNGULO DE ATRITO ( $\phi$ ). FONTE: FIORI E CARMIGNANI, 2009. .... 9



FIGURA 6: (A) DIAGRAMA COM A INTERSECÇÃO DOS PLANOS DAS DESCONTINUIDADES QUE FORMAM O BLOCO (AB, AC E BC). (B) ROTAÇÃO DAS INTERSECÇÕES EM 90° EM TORNO DO EIXO DO TÚNEL. (C) NOVO BLOCO FORMADO PELAS INTERSECÇÕES ROTACIONADAS (AB', AC' E BC'). FONTE: FIORI E CARMIGNANI, 2009.....	10
FIGURA 7: FUNCIONAMENTO DO LASER SCANNER “TIME-OF-FLIGHT” E MEDIÇÃO DO TEMPO POR DIFERENÇA DE FASE OU MÉTODO DA ONDA CONTÍNUA. FONTE: VOSELMAN ET AL. DISPONÍVEL EM <a href="http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/pdf/curso10/centeno/centeno.pdf">HTTP://WWW.DSR.INPE.BR/SBSR2007/PDF/CURSO10/CENTENO/CENTENO.PDF</a> .....	12
FIGURA 8: DIAGRAMA DA CONCEPÇÃO DAS COORDENADAS DOS PONTOS OBTIDOS PELO LASER SCANNER. MODIFICADO DE: <a href="http://dev.nsta.org/evwebs/2017/future.html">HTTP://DEV.NSTA.ORG/EVWEBS/2017/FUTURE.HTML</a> .....	13
FIGURA 9: EQUIPAMENTO FARO LASER SCANNER FOCUS3D X 330. FONTE: FARO. ....	14
FIGURA 10: SEÇÃO N-S DA MINA TABIPORÃ, PARA VISUALIZAÇÃO DO PLANO INCLINADO UTILIZADO PARA ACESSO E RETIRADA DE MINÉRIO, E OS SEIS TÚNEIS BASE. DESTAQUE EM ROSA A PORÇÃO DO TB-04, SELECIONADA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS COM O LASER SCANNER. IMAGEM SURPAC CEDIDA PELA MINERAÇÃO TABIPORÃ, FONTE: GEÓLOGO SANDRO VILLANOVA. ....	17
FIGURA 11: VISTA EM PLANTA DA PORÇÃO SELECIONADA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS PELO LASER SCANNER. IMAGEM SURPAC CEDIDA PELA MINERAÇÃO TABIPORÃ, FONTE: GEÓLOGO SANDRO VILLANOVA.....	18
FIGURA 12: FOTOGRAFIAS DO LEVANTAMENTO DE CAMPO. A) COLOCAÇÃO DO ALVO ESFÉRICO NO PONTO DE COORDENADAS CONHECIDAS. B) EQUIPAMENTO LASER SCANNER EM FUNCIONAMENTO.....	19

FIGURA 13: IMAGEM DA NUVEM DE PONTOS RESULTADO DO LEVANTAMENTO NO TB-04 – MINA TABIPORÃ – CAMPO LARGO/PR. VISUALIZAÇÃO NO SOFTWARE FARO SCENE....	20
FIGURA 14: IMAGEM DA NUVEM DE PONTOS DO LEVANTAMENTO COM O DESTAQUE EM AMARELO DOS PONTOS PERTENCENTES À PRIMEIRA ESTAÇÃO DE VARREDURA (SCAN001). VISUALIZAÇÃO NO SOFTWARE FARO SCENE. ....	20
FIGURA 15: VISTA 3D DE DENTRO DA GALERIA COM A VISUALIZAÇÃO DE UM PILAR DE SUSTENTAÇÃO SCANEADO NA BASE 4. VISUALIZAÇÃO NO SOFTWARE FARO SCENE. ....	21
FIGURA 16: SELEÇÃO DO PLANO DE FRATURA NO MODO VISUALIZAÇÃO PLANAR, DESTACADO EM AMARELO. OS PONTOS SELECIONADOS (CERCA DE 12 MIL PONTOS) DENTRO DO POLÍGONO FORAM EXPORTADOS SEPARADAMENTE PARA POSTERIOR ANÁLISE ESTRUTURAL. VISUALIZAÇÃO NO SOFTWARE FARO SCENE.....	22
FIGURA 17: REPRESENTAÇÃO DA TRIANGULAÇÃO DELAUNAY. ....	23
FIGURA 18: DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO DE CONTORNO DESTACANDO CINCO CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS (A, B, C, D E E) QUE REPRESENTAM AS PRINCIPAIS FAMÍLIAS DE FRATURAS, DADOS NÃO DECLINADOS. VISUALIZAÇÃO SOFTWARE STEREO32. ....	25
FIGURA 19: DIAGRAMAS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE QUEDA 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 18), PLANO B' REPRESENTA A CONCENTRAÇÃO DE POLOS B (FIGURA 18) E O PLANO C' REPRESENTA A CONCENTRAÇÃO DE POLOS C (FIGURA 18). (B) PLANOS: A', B' E D'. (C) PLANOS: B' E D'. (D) PLANOS: B', C', D'.....	26

FIGURA 20: DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO DE CONTORNO, COM A CONCENTRAÇÃO DE POLOS, REPRESENTANDO A DIREÇÃO PREFERENCIAL DO PLANO. VISUALIZAÇÃO: SOFTWARE DIPS – ROCSCIENCE INC. ....	27
FIGURA 21: DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO DE CONTORNO, COM DISPERSÃO DE MEDIDAS AO LONGO DO EIXO E-W E CONCENTRAÇÃO DE POLOS ÚNICA. VISUALIZAÇÃO: SOFTWARE DIPS – ROCSCIENCE INC.....	28
FIGURA 22: DIAGRAMA DE CONTORNO COM DUAS CONCENTRAÇÕES DE POLOS, QUE REPRESENTAM IRREGULARIDADES NO PLANO OU QUE MAIS DE UM PLANO FOI SELECIONADO. VISUALIZAÇÃO: SOFTWARE DIPS – ROCSCIENCE INC.....	28
FIGURA 23: DIAGRAMA DE CONTORNO COM 17 PLANOS QUE APRESENTARAM DISPERSÃO AO LONGO DO EIXO E-W. A CONCENTRAÇÃO DE POLOS NO CENTRO DO DIAGRAMA REPRESENTA PLANOS HORIZONTAIS. VISUALIZAÇÃO: SOFTWARE DIPS – ROCSCIENCE INC.....	29
FIGURA 24: DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO DE CONTORNO DAS ATITUDES OBTIDAS DE FORMA INDIRETA, DESTACANDO TRÊS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS (I, II E III) QUE REPRESENTAM AS PRINCIPAIS FAMÍLIAS DE FRATURAS, DADOS NÃO DECLINADOS. VISUALIZAÇÃO SOFTWARE STEREO32.....	30
FIGURA 25: DIAGRAMAS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE, OS PLANOS REPRESENTAM FAMÍLIAS DE FRATURAS OBTIDAS PELA ANÁLISE DE DADOS INDIRETOS. (A) PLANO I REPRESENTA A CONCENTRAÇÃO DE POLOS I (FIGURA 20), PLANO II REPRESENTA A CONCENTRAÇÃO DE POLOS II (FIGURA 20) E PLANO III REPRESENTA A CONCENTRAÇÃO DE POLOS III (FIGURA 20). (B) PLANOS I, II E IV (C) PLANOS I, II E V (D) PLANOS I, III E IV (E) PLANOS I, III E V (E) PLANOS II, III E IV (F) PLANOS II, III E V (G) PLANOS III, IV E V. VISUALIZAÇÃO NO SOFTWARE STEREO32. ....	31

FIGURA 26: (A) ANÁLISE DE ESTABILIDADE F (FIGURA 25F) RESULTA EM QUEDA DE BLOCO COM DESLIZAMENTO EM UM DOS PLANOS. (B) ANÁLISE DE ESTABILIDADE A (FIGURA 25A) RESULTA EM BLOCO ESTÁVEL.....	32
FIGURA 27: COMPARAÇÃO ENTRE OS DIAGRAMAS DE DADOS DIRETOS (A) DADOS DECLINADOS (B) DADOS NÃO DECLINADOS. VISUALIZAÇÃO: SOFTWARE DIPS – ROCSCIENCE INC.....	33
FIGURA 28: COMPARAÇÃO ENTRE OS DIAGRAMAS DE DADOS INDIRETOS (A) DADOS DECLINADOS (B) DADOS NÃO DECLINADOS. VISUALIZAÇÃO: SOFTWARE DIPS – ROCSCIENCE INC. ....	33
FIGURA 29: COMPARAÇÃO ENTRE OS DIAGRAMAS DE DADOS OBTIDOS EM CAMPO (A) E DADOS OBTIDOS DE FORMA INDIRETA (B) POR AQUISIÇÃO COM LASER SCANNER E PROCESSAMENTO. VISUALIZAÇÃO: SOFTWARE DIPS – ROCSCIENCE INC.....	34

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	2
3	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	2
3.1	LOCALIZAÇÃO E ACESSO A ÁREA.....	2
3.2	GEOLOGIA REGIONAL.....	3
3.3	GEOLOGIA DO GRANITO PASSA TRÊS.....	4
3.3.1	ASPECTOS ESTRUTURAIS.....	6
4	ESTABILIDADE DE TALUDES EM ROCHA.....	7
4.1	ESTABILIDADE DE BLOCOS NO TETO DE ESCAVAÇÕES.....	8
4.1.1	QUEDA DE BLOCO POR AÇÃO DA GRAVIDADE.....	8
4.1.2	QUEDA DE BLOCO COM DESLIZAMENTO.....	8
4.1.3	BLOCO ESTÁVEL.....	9
4.2	ESTABILIDADE DE BLOCOS EM PAREDES DE ESCAVAÇÕES.....	10
5	SISTEMA LASER SCANNER.....	11
5.1	COMPONENTES DO SISTEMA LASER SCANNER.....	12
5.2	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	14
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
6.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
6.2	AQUISIÇÃO DOS DADOS DE IMAGEAMENTO.....	16
6.3	AQUISIÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS.....	19
6.4	PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS.....	19
7	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS DADOS MEDIDOS EM CAMPO – DADOS DIRETOS.....	24
7.1	QUEDA DE BLOCOS POR AÇÃO DA GRAVIDADE.....	25
8	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS DADOS ADQUIRIDOS PELO LASER SCANNER – DADOS INDIRETOS.....	26
8.1	ANÁLISE DE QUEDA DE BLOCOS.....	30
9	COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO ENTRE OS DADOS DIRETOS E INDIRETOS.....	32
10	CONCLUSÃO.....	35
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

# 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico tem atingido rapidamente todas as principais áreas do conhecimento, cada vez mais o homem busca capturar informações em menor tempo e com maior precisão, melhorando a quantificação e a previsão de tudo o que está em sua volta. Este trabalho buscou a aplicação, desenvolvimento e comparação de técnicas ainda pouco difundidas e utilizadas na análise geológica.

A aquisição de dados por Laser Scanner vem sendo usada em diversos setores da engenharia e da geologia (e.g. ABELLÁN, VILAPLANA e MARTÍNEZ, 2006; STURZENEGGER & STEAD, 2009 e PIERRE ASSALI et. al, 2014). Nestes trabalhos os autores aplicaram a tecnologia na prevenção da queda de blocos e no estudo da estabilidade de taludes em estradas. Os autores citam as vantagens da aquisição de dados a partir deste sistema, incluindo o imageamento de áreas de difícil acesso, manutenção da segurança dos trabalhadores, rapidez e acurácia da aquisição e processamento do banco de dados. Desta forma o levantamento 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.

O processamento de dados vem se desenvolvendo proporcionalmente com o aumento da capacidade dos processadores. A construção e a rápida manipulação dos modelos 3D, com milhões de pontos, só foi possível com o avanço da tecnologia computacional, assim como, com o desenvolvimento de softwares que auxiliam na análise geotécnica.

Um diferencial deste trabalho, em relação aos trabalhos anteriores, foi a aquisição de dados com Laser Scanner em mina subterrânea, onde, devido a falta de iluminação, não foi possível adquirir imagens fotográficas para auxiliar na interpretação de estruturas na rocha. Assim, a base de dados indiretos é formada somente pela integração da nuvem de pontos georreferenciados.

A integração de técnicas de aquisição direta e indireta de dados, a partir da tomada de atitudes estruturais em campo e do processamento de modelos

tridimensionais possibilitou, nesse trabalho, a validação parcial do modelo de aquisição de dados indiretos.

## **2 OBJETIVO**

Esta monografia tem por objetivo testar o uso do imageamento com o laser scanner na análise de estabilidade em escavações subterrâneas. Para alcançar o objetivo será necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- realizar o imageamento em galeria;
- processar a nuvem de pontos;
- adquirir planos de fraturas a partir do modelo tridimensional;
- adquirir atitudes dos planos de fratura de forma direta, em campo;
- analisar os dados obtidos em campo;
- analisar as medidas obtidas indiretamente;
- comparar os dados diretos e indiretos.

## **3 CONTEXTO GEOLÓGICO**

### **3.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO A ÁREA**

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. A extração é realizada em galerias subterrâneas organizadas ao longo de plano inclinado. Atualmente existem 6 túneis base, a partir dos quais são desenvolvidas “gavetas” para a extração do minério. O levantamento com o laser scanner foi realizado em algumas “gavetas” do Túnel Base nº 4 (TB-04).

O acesso principal se faz pela estrada da Itambé (fábrica de cimento), a partir da BR-277 km 32, trecho Curitiba - Ponta Grossa, com acesso por estrada secundária ensaibrada até a Mineração Tabiporã (Figura 1).

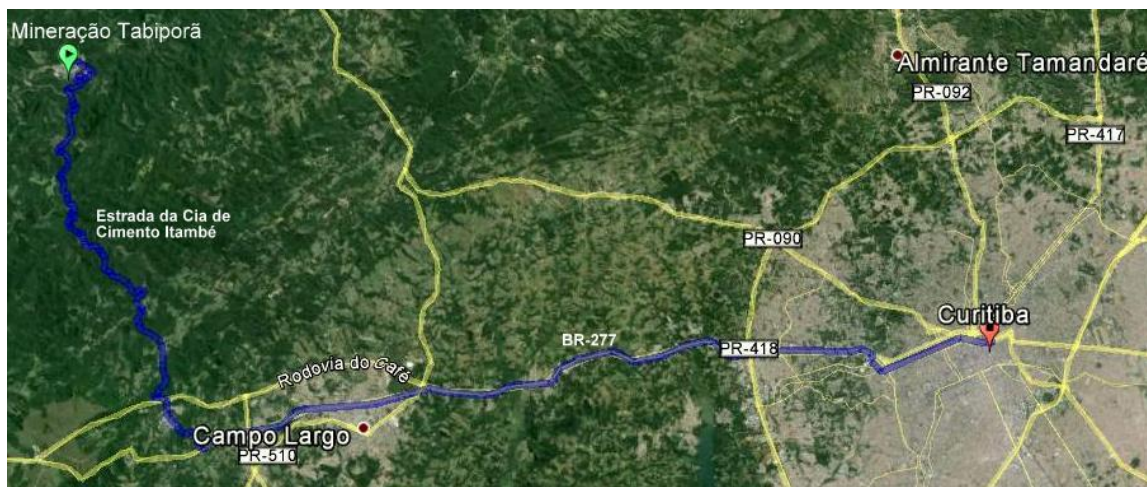


Figura 1: Mapa de localização e vias de acesso partindo do município de Curitiba até a Mineração Tabiporã, onde foi realizado o estudo.

### 3.2 GEOLOGIA REGIONAL

A área selecionada para o levantamento está localizada na porção sudoeste do Cinturão Ribeira (HASUI et al, 1975), especificadamente no Domínio Apiaí. A região é constituída por granitóides deformados do núcleo do embasamento, sequências metavulcanossedimentares do Grupo Setuva e Grupo Açungui e granitos sin, tarde e pós colisionais, representados por batólitos e stocks. Todas estas rochas estão compartimentadas por falhas de cavalgamento, zonas de falhas transcorrentes e tectônica rúptil posterior, formando diversos blocos alóctones (Figura 2).

Os granitóides constituem uma das principais feições do Ciclo Brasileiro no sul do Brasil, ocorrendo tanto na Província Mantiqueira como na Região Costeira. Chiodi Filho *et. al* (1989) classificaram estes granitóides geoquimicamente, enquadrando o granito Passa Três no grupo de granitóides de sintexia da faixa central do escudo paranaense, de tendência subalcalina, intrusivos tardi a pós colisionais, inserido em rochas do Grupo Setuva a sudeste e Açungui a norte e noroeste.



### 3.3 GEOLOGIA DO GRANITO PASSA TRÊS

O Granito Passa Três, descrito por Piekarz (1981) abrange a área de aproximadamente cinco km<sup>2</sup>, possui forma ovalada, estirada na direção N45E. Encontra-se em contato tectônico com as sequências metavulcanossedimentares dos Grupos Açungui e Setuva e é limitado por zonas de cisalhamento, ao norte pela Falha do Cerne e ao sul pela Falha da Boa Vista (PIEKARS, 1989) (Figura 2). Este maciço é predominantemente constituído por sienogranitos de granulometria média a grossa, textura inequigranular, estrutura maciça ou foliada, menos frequente. Há ocorrência de veios aplíticos, pegmatíticos e micrograníticos, além dos veios de quartzo ricos em sulfetos, que representam os depósitos auríferos da região.

## GRANITO PASSA TRÊS

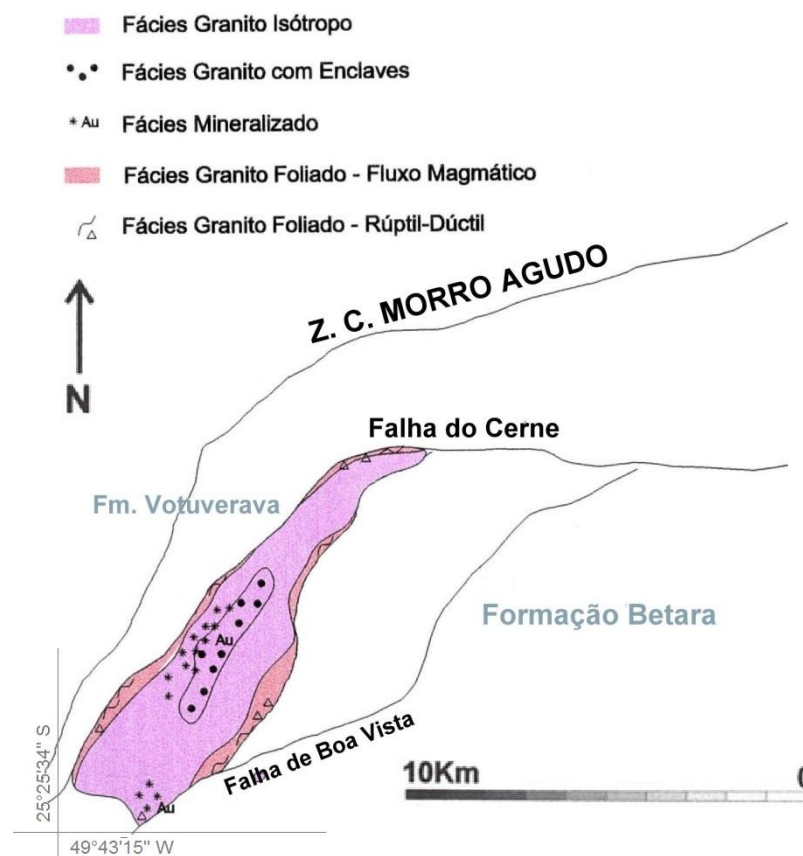


Figura 2: Mapa geológico esquemático mostrando os principais limites tectônicos e fácies do granito Passa Três. Modificados de Cury, 2003.

Na porção leste, o Granito Passa Três faz contato com as rochas metavulcanossedimentares da Formação Betara, constituídas por xistos, xistos ferruginosos, meta-margas, quartzitos e meta-básicas (CURY, 2003). Na região oeste, a intrusão faz contato com os metassedimentos da Formação Votuverava, onde afloram xistos e filitos muito deformados com duas foliações, uma de baixo e outra de alto ângulo, que transpõe totalmente a primeira foliação nas proximidades da Zona de Cisalhamento Morro Agudo (Figura 2).

O estudo faciológico do Granito Passa Três, realizado por Cury (2003), identificou cinco fácies: Fácies Granito Isótopo (predominante), Fácies Granito com Enclaves (porção central), Fácies Ouro Mineralizado, Fácies Granito Foliado – Fluxo Magmático e Fácies Granito Foliado – Rúptil-dúctil. As fácies foliadas estão restritas as bordas leste e oeste.

A fácies Granito Isótopo, constitui-se predominantemente por rochas de coloração cinza-rosada, compostas por K-feldspato (~45%), quartzo (~32%), plagioclásio (~16%), clorita e epidoto (<5%), com fluorita, apatita, titanita, zircão e allanita como acessórios.

A fácies mineralizada possui frequentes veios de quartzo com sulfetos, destaca-se a pirita com ouro disseminado, associados à fase hidrotermal e rocha com baixa porcentagem de máficos.

### 3.3.1 ASPECTOS ESTRUTURAIS

Quanto aos aspectos estruturais o granito Passa Três apresenta alta densidade de fraturas, normalmente preenchidas por argilominerais, sericita, clorita, carbonato, óxidos e sulfeto. (PIEKARS, 1989)

Piekars (op.cit.) observa que as feições de deformação microscópica indicam que o corpo granítico teve comportamento rígido durante as fases de cisalhamento transcorrente posteriores. A deformação possivelmente foi acomodada em feições rúpteis de juntas e falhas, embora haja registro de faixas miloníticas (dúcteis) pontuais. A análise estrutural apresentada no trabalho de Piekars (op. cit.) contém dados de 147 planos, com duas concentrações de polos principais NW e NE.

Outra consideração importante do trabalho de Piekars (1989) é a distribuição de veios associados às alterações hidrotermais. A sericitização, que ocorre controlada por falhas e juntas e a argilização que se desenvolve nestes mesmos planos, diminui o atrito interno favorecendo a percolação de água, que aumenta o risco de desestabilização e queda de blocos.

Os estudos estruturais desenvolvidos no granito Passa Três visam identificar o condicionamento estrutural dos veios mineralizados em Au. Nesta análise Piekars (op. cit.) identificou quatro conjuntos principais de direções de filões, coerentes com o modelo de Riedel: N57E/60SW; N55-62E/80SE-88NW; N26-32E/42SE-76NW e N82W-N82E/76NW.

O padrão de fraturamento apresentado pelo granito é muito complexo. Além das estruturas resultantes do modelo de Riedel,

acima relacionadas, devem ser esperadas fraturas dilatacionais causadas por pressão interna dos fluídos, resultando em aleatoriedade de posicionamento, bem como por outros fatores como a rotação de fraturas dada pela movimentação da zona de transcorrência, rotação externa variável, dilatação, entre outros. (PIEKARS, 1989, Pg. 146-147.)

Picanço (2000) apresentou 100 medidas de fraturas, realizadas no nível dois do veio norte da Mina do Morro e associa as principais concentrações N20-30W ao padrão de falhamento regional, associado à zona de cisalhamento transcorrente da Lancinha.

#### **4 ESTABILIDADE DE TALUDES EM ROCHA**

Este item abrange a revisão sobre estabilidade de taludes e as principais características definidas para haver escorregamentos ou queda de blocos por meio da análise estrutural a partir de diagramas estereográficos.

A análise de estabilidade se inicia com o tratamento e apresentação dos dados estruturais, que podem ser representados em diagramas estereográficos de igual-área de três maneiras. A) ciclograficamente por meio de um grande círculo representando o plano. B) por pólos, ponto que representa o plano e está localizado a 90° da sua representação ciclográfica. C) por rumo de mergulho: linha de máxima inclinação do plano, perpendicular a sua direção. No caso de um grande número de dados, os valores médios das descontinuidades podem ser determinados pelo ponto de maior concentração de polos (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

No caso de escavações subterrâneas os mecanismos de escorregamento podem ser o desprendimento de blocos do teto, por queda e/ou escorregamento e o escorregamento de blocos da parede. Para que um bloco de rocha se movimente é necessário que no mínimo três descontinuidades (fraturas, teto, parede) se intersectem (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

## 4.1 ESTABILIDADE DE BLOCOS NO TETO DE ESCAVAÇÕES

Existem três possibilidades na análise da estabilidade de blocos no teto das escavações, estas envolvem o traçado de uma linha vertical traçada a partir do ápice da cunha formada.

### 4.1.1 QUEDA DE BLOCO POR AÇÃO DA GRAVIDADE

Para que haja a queda de bloco por ação da gravidade, sem haver deslizamento, a linha vertical traçada, que representa o ponto central do diagrama, deve estar contida na base da cunha. Quando a cunha é formada por três descontinuidades, podendo, uma delas, ser o plano do teto horizontal, que é representado pela própria circunferência do diagrama, (ver esquema da Figura 3) existe o risco de queda de bloco pela ação da gravidade.

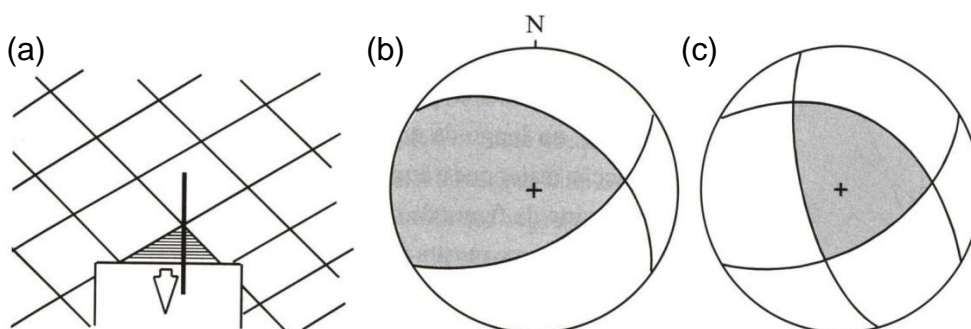


Figura 3: (a) Desenho esquemático de sistema de fraturas com risco de queda por ação da gravidade. A linha vertical traçada que passa pelo ápice e pela base do bloco indica a condição para a queda do bloco por gravidade. (b) Diagrama estereográfico representando o desenho (a), bloco formado por duas descontinuidades e o plano horizontal do teto do túnel (circunferência no diagrama), a linha vertical é representada pelo ponto central do diagrama. (c) Queda de bloco por gravidade, formado por três descontinuidades. Fonte: FIORI e CARMIGNANI, 2009.

### 4.1.2 QUEDA DE BLOCO COM DESLIZAMENTO

Caso a linha imaginária que cruza o ápice da cunha não atinja a base do bloco, o desprendimento do bloco ocorrerá somente por deslizamento ao longo de uma das descontinuidades. Neste caso é adicionada outra variável ao

problema, o ângulo de atrito ( $\phi$ ). Para que haja deslizamento, o rumo da linha ao longo da qual deverá ocorrer o deslizamento deve ter ângulo de inclinação maior que o ângulo de atrito ( $\phi$ ). Portanto se ao menos uma parte da cunha representada no diagrama cair dentro do círculo definido pelo ângulo de atrito ( $\phi$ ) existe risco de queda por deslizamento (Figura 4).

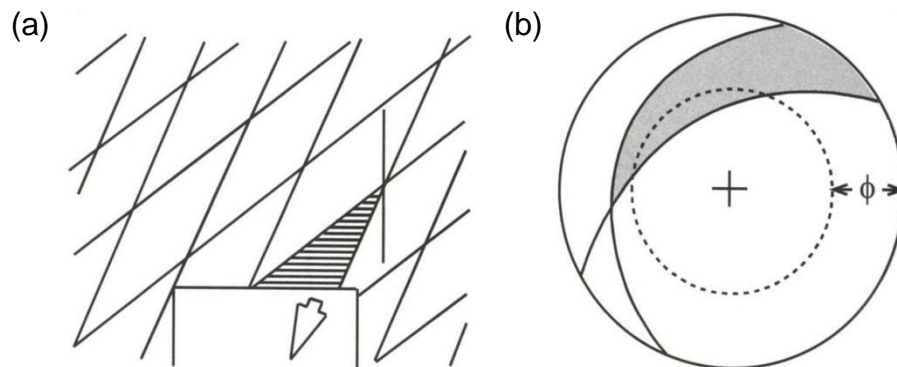


Figura 4: (a) Desenho esquemático do sistema de fraturas com risco de queda por deslizamento. A linha vertical traçada que passa pelo ápice do bloco e não passa pela base deste representa a condição para a queda do bloco por deslizamento. (b) Diagrama representando o desenho (a), onde parte da figura de interferência está dentro do cone do ângulo de atrito ( $\phi$ ). Fonte: FIORI e CARMIGNANI, 2009.

#### 4.1.3 BLOCO ESTÁVEL

Um bloco estará estável se a figura de intersecção, formada entre as descontinuidades que delimitam o bloco estiver completamente fora do cone de atrito, definido pelo ângulo de atrito ( $\phi$ ) (Figura 5).

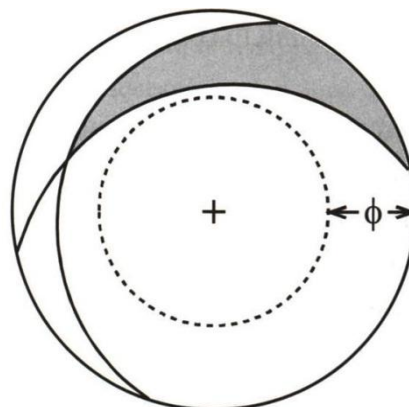


Figura 5: Diagrama representando a condição de bloco estável, a figura de interferência não secciona o cone do ângulo de atrito ( $\phi$ ). Fonte: FIORI e CARMIGNANI, 2009.

## 4.2 ESTABILIDADE DE BLOCOS EM PAREDES DE ESCAVAÇÕES

A análise da estabilidade de blocos na parede de túneis também é feita através da análise dos dados estruturais no diagrama estereográfico, mas, nesse caso, após plotar os planos de descontinuidades, ou planos representativos das concentrações máximas de pólos, deve-se plotar o eixo do túnel. Se considerarmos uma seção quadrada, a parede do túnel deve ser um plano vertical. Para determinar a figura de interseção, projetada em um plano vertical, lembrando que no caso do teto o plano é horizontal, os pontos de interseção das descontinuidades (A, B e C) devem ser rotacionadas  $90^\circ$  (Figura 6), para isso o eixo do túnel é colocado na posição NS e os pontos que representam a interseção (ab, ac e bc) são espelhados a  $90^\circ$  (ab', ac' e bc'). Somente após isso podemos inserir o cone do ângulo de atrito ( $\phi$ ) e verificar se alguma das posições rotacionadas (a', b' e c') caem dentro do cone, indicando possível deslizamento.

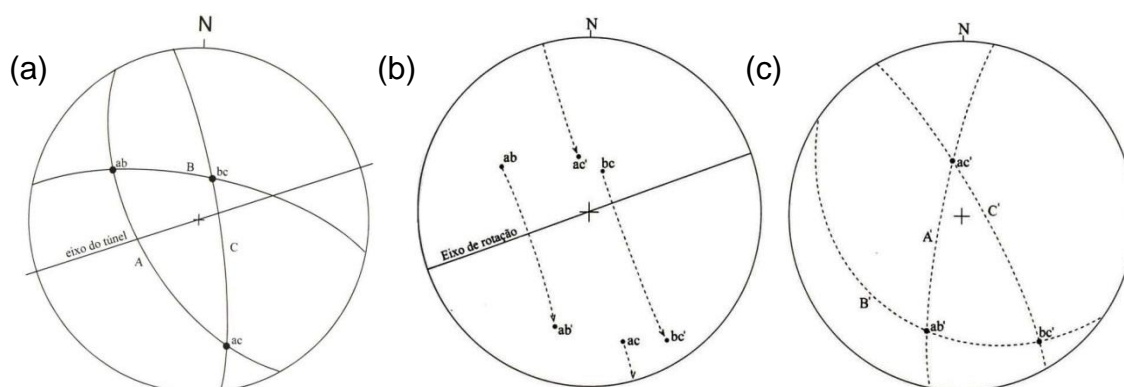


Figura 6: (a) Diagrama com a intersecção dos planos das descontinuidades que formam o bloco (ab, ac e bc). (b) Rotação das intersecções em  $90^\circ$  em torno do eixo do túnel. (c) Novo bloco formado pelas intersecções rotacionadas (ab', ac' e bc'). Fonte: FIORI e CARMIGNANI, 2009.

## 5 SISTEMA LASER SCANNER

O sistema Laser Scanner produz coordenadas tridimensionais (x, y, z) de pontos sobre uma superfície, através da emissão e captação de pulsos de laser gerados pelo sistema. Inicialmente os pulsos de laser são gerados e emitidos pelo sistema e com o auxílio de um espelho de varredura são direcionados, atingindo a superfície dos objetos em vários pontos. O laser incidente é refletido na superfície e parte deste pulso é capturada pelo sistema. Assim é possível determinar a distância entre o sensor e o objeto através do intervalo de tempo entre o pulso de laser incidente e seu retorno (DALMOLIN E SANTOS, 2004).

Existem dois tipos de sistemas de varreduras laser: os sistemas estáticos e os sistemas dinâmicos aerotransportados.

Os sistemas estáticos são classificados conforme o seu princípio de funcionamento, que pode ser “time-of-flight” (intervalo de tempo), diferença de fase ou princípio de triangulação. Já o sistema dinâmico utiliza um feixe ótico de alta potência direcionado com o auxílio de um sistema de posicionamento de alta precisão para medir a distância entre o ponto na superfície e o sensor (DALMOLIN E SANTOS, 2004).

O sistema laser scanner estático que funciona pelo princípio “time-of-flight” ou intervalo de tempo, também denominado LIDAR (Light Detection And Ranging) determina a distância através da medida do tempo de retorno do pulso laser incidente (Figura 7). Podemos determinar a distância (D) entre o sensor e o objeto utilizando a velocidade da luz ( $c=300 \times 10^3$  km/s<sup>2</sup>). A constante  $\frac{1}{2}$  é utilizada para restringir o tempo a uma distância, já que o sensor mede o tempo de ida e volta do sinal e o Dt obtido pelo sensor (WUTKE, 2006).

$$D = \frac{1}{2}.c.Dt$$



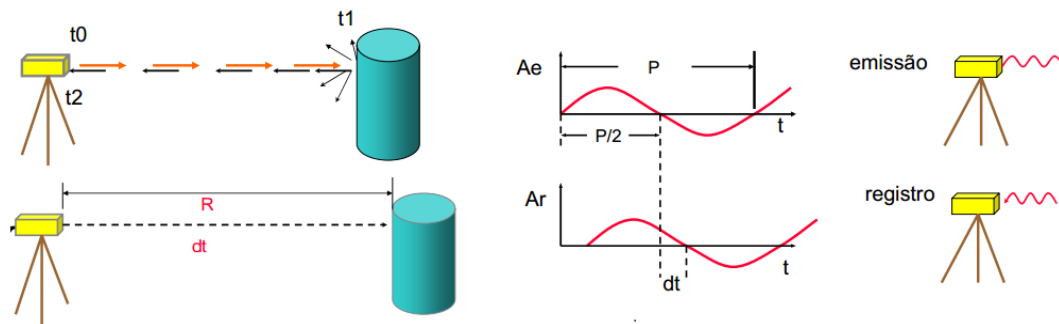


Figura 7: Funcionamento do Laser Scanner “time-of-flight” e medição do tempo por diferença de fase ou método da onda contínua. Fonte: VOSSSELMAN et al. Disponível em [Http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/pdf/curso10/Centeno/centeno.pdf](http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/pdf/curso10/Centeno/centeno.pdf).

Além do tempo de trânsito do laser, o sistema também registra a intensidade da energia refletida pelo objeto, esta intensidade pode ser utilizada para criar uma imagem associada à refletância da superfície no comprimento de onda utilizado (DALMOLIN E SANTOS, 2004). Alguns modelos de sistemas laser scanner possuem uma câmera digital acoplada, o que permite a captação do valor RGB para cada ponto com coordenada tridimensional obtido.

## 5.1 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 compõe 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 & SANTOS, 2004), que é responsável pelo estímulo do cristal, realizado através de um diodo semiconductor para a emissão da radiação amplificada da luz (LASER). O comprimento de onda utilizado depende do material que emite a luz, do sistema óptico e da forma de energizá-lo, mas a onda produzida é sempre monocromática, ou seja, com mesmo comprimento de onda. A maioria dos sistemas opera na faixa entre 0.8  $\mu\text{m}$  a 1.6  $\mu\text{m}$  do espectro eletromagnético (DALMOLIN & SANTOS, 2004).

O Laser Scanner utiliza o feixe de laser gerado para determinar a distância entre o objeto e o sensor, através da interação do Gerador de Pulsos com o Conjunto Ótico: Emissor e Receptor e uma Unidade de Registro de Medições.

O sistema de varredura ótico constitui-se de espelhos controlados por servomotores encarregados de direcionar o feixe de laser emitido, denominado espelho de varredura, permitindo, assim, uma cobertura de 360° da superfície. Este espelho também atua recebendo os sinais de retorno e redirecionando para o receptor. O sinal recebido passa por um filtro que verifica se o sinal recebido possui a mesma frequência do sinal emitido (DALMOLIN E SANTOS, 2004). O resultado é um conjunto de pontos com coordenadas tridimensionais que refletem a superfície scannerizada dos objetos (Figura 8). Esses dados são chamados 'nuvem de pontos', devido à alta concentração de pontos gerados. A resolução na 'nuvem de pontos', que determina a distância entre os pontos medidos, depende do tamanho do menor objeto que se deseja imagear, da distancia deste objeto e atualmente da acurácia do equipamento, este parâmetro pode ser fixado antes do inicio da varredura (WUTKE, 2006). O avanço da tecnologia tem permitido equipamentos com resolução maior e menor tempo de varredura.

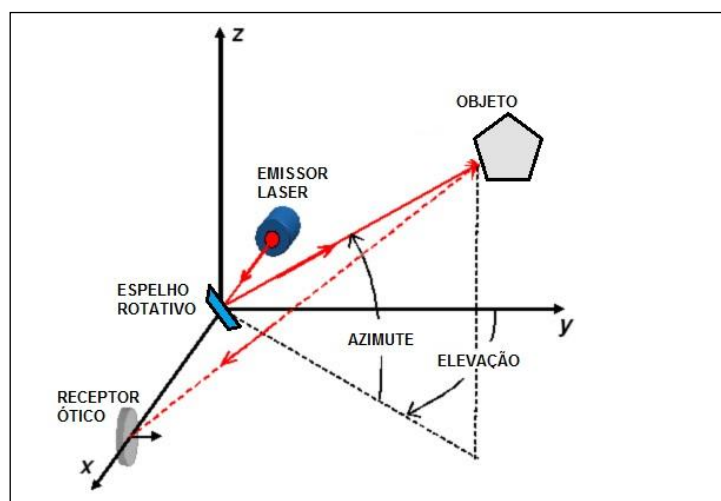


Figura 8: Diagrama da concepção das coordenadas dos pontos obtidos pelo Laser Scanner. Modificado de: <http://dev.nsta.org/evwebs/2017/future.html>.

Os pontos obtidos pelo sistema estão referenciados a um sistema local de GPS ou ponto de amarração com coordenadas conhecidas (Figura 8). O posicionamento 3D destes pontos pode ser determinado conhecendo-se a posição e orientação do pulso emitido, em relação a um sistema de referência.

## 5.2 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO EQUIPAMENTO UTILIZADO

O equipamento utilizado durante o levantamento foi cedido pela FARO (Figura 9) e apresenta as seguintes especificações, sintetizadas na Tabela 1.



Figura 9: Equipamento FARO Laser Scanner Focus3D X 330. Fonte: FARO.

Tabela 1: FARO Laser Scanner Focus3D X 330

<b>RANGING UNIT</b>	
Alcance (indoor ou outdoor)	0,6 - 330 metros
Velocidade (pontos/segundo)	122000/244000/488000/976000
Precisão	+/-2mm
<b>COLOR UNIT</b>	
Resolução	Maior que 70 megapixel
<b>DEFLECTION UNIT</b>	
Range Vertical	300°
Range Horizontal	360°
Step size Vertical	0.009°
Step Size Horizontal	0.009°
Velocidade máxima do scanner na vertical	5820 rpm ou 97 Hz
<b>LASER (TRASSMISSOR ÓTICO)</b>	
Laser	Classe 1
Comprimento de onda	1550 nm
Divergência	0,19 mrad (0,011°)
Posicionamento	GPS integrado
<b>ESPECIFICAÇÕES DE HARDWARE</b>	
Fonte de Energia	14.4V (Bateria Interna)
Duração da Bateria	4,5 horas
Temperatura Ambiente	5° - 40°C
Umidade	Atmosfera não condensada
Interface com o usuário	Tela Touchscreen e controle remoto por WLAN (Wifi)
Peso	5,2 Kg
Dimensões	240 x 200 x 100 mm
<b>ACESSÓRIOS</b>	
Tripé	
Alvos esféricos	6 unidades

## **6 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **6.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A etapa inicial deste trabalho constituiu-se da revisão bibliográfica e incluiu a leitura sobre o funcionamento do Laser Scanner, aplicações deste equipamento, manual de funcionamento dos softwares utilizados no processamento dos dados, geologia do granito Passa Três e revisão de estabilidade de taludes e túneis.

### **6.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS DE IMAGEAMENTO**

Para a aquisição dos dados de imageamento foi utilizado o equipamento Focus 3D X330, cedido pela empresa FARO. O equipamento foi manuseado pelo técnico Sr. Adriano Scheuer, que estabeleceu os parâmetros de aquisição.

A aquisição foi feita no quarto nível da mina da Tabiporã – Campo Largo/PR, denominado TB-04 (túnel base 4) (Figura 10). Este nível, TB-04, está atualmente ativo para mineração, e nele são realizados frequentes controles de ‘chocos’ e convergência da seção das galerias.

A equipe de campo foi formada pela estudante de geologia Gabriela Reis Piazzetta, pela professora orientadora Barbara Trzaskos, pelo geólogo responsável pela mina Sandro Villanova e pelo profissional da FARO, Sr. Adriano Scheuer. Além do equipamento de proteção individual (EPI) de uso obrigatório nas dependências da mina, também foram utilizados para a aquisição dos dados: um tripé para suporte do equipamento Laser Scanner, o equipamento Laser Scanner, seis alvos esféricos ou esferas de marcação brancas com diâmetro de 139mm, bússola de geólogo do tipo Clark e caderneta de campo para anotação das medidas.

A aquisição dos dados foi feita em um dia (17/05/2014), no período de seis horas equivalente ao turno de trabalho, com início as 08:30 e término as

14:30. O acesso ao túnel foi feito pelo plano inclinado de 30° (Figura 10), por onde a gaiola de transporte de trabalhadores transita nos horários de início/fim dos turnos de 6 em 6 horas.

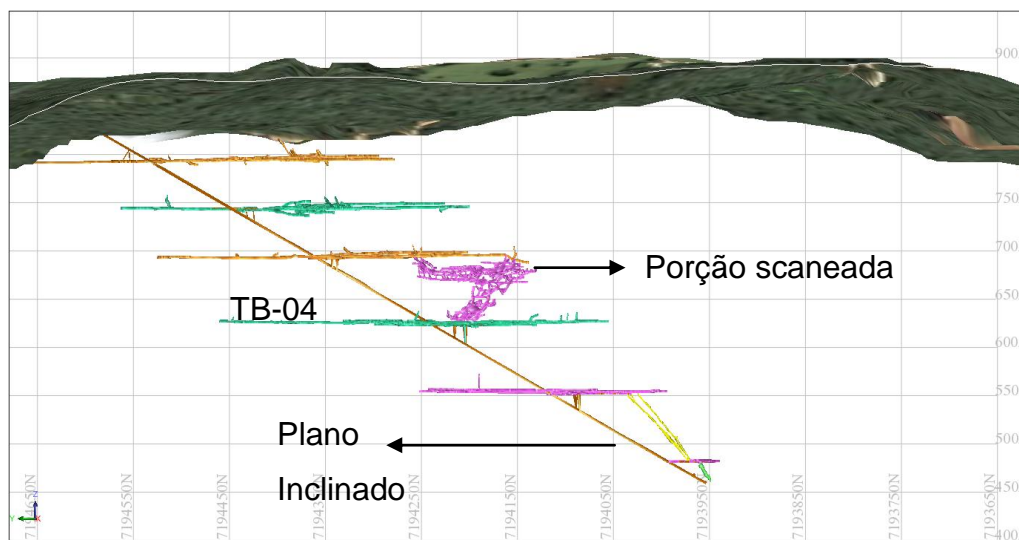


Figura 10: Seção N-S da mina Tabiporã, para visualização do plano inclinado utilizado para acesso e retirada de minério, e os seis túneis base. Destaque em rosa a porção do TB-04, selecionada para aquisição de dados com o Laser Scanner. Imagem SURPAC cedida pela Mineração Tabiporã, fonte: Geólogo Sandro Villanova.

A porção do TB-04 scaneada foi selecionada pela equipe da Mineração Tabiporã levando em conta critérios como estar inativa (sem atividade de mineração durante o levantamento), com pouco trânsito de trabalhadores, vias de acesso desobstruídas e estabilidade parcial consolidada. Ao todo foram realizadas 37 varreduras com o equipamento Laser Scanner, cobrindo a área de cerca de 140m x 70m (Figura 11).

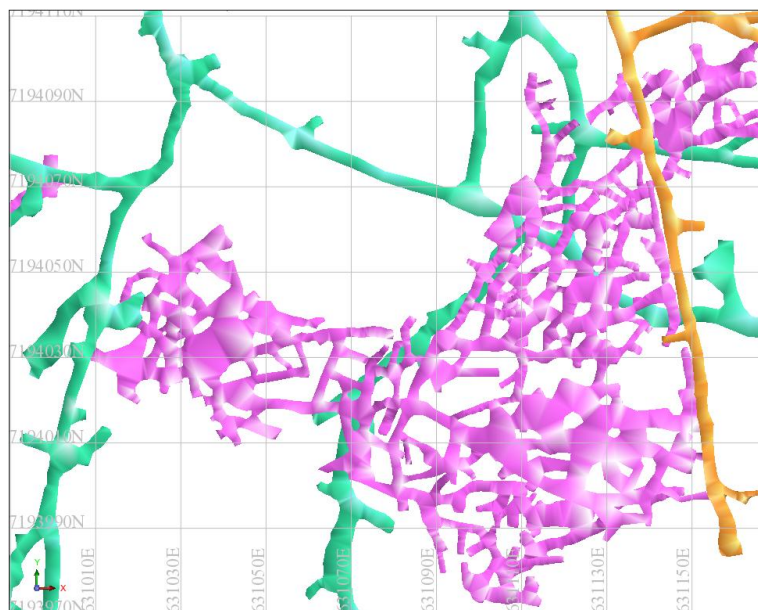


Figura 11: Vista em planta da porção selecionada para aquisição de dados pelo Laser Scanner. Imagem SURPAC cedida pela Mineração Tabiporã, fonte: Geólogo Sandro Villanova.

Cada varredura foi realizada a partir da montagem do tripé e fixação do equipamento Laser Scanner (Figura 12). Em cada estação foram posicionados os alvos esféricos para posterior correspondência entre imagens. Na primeira base/estação, um alvo esférico foi colocado sob ponto de coordenadas conhecidas (Figura 12), previamente levantado pela equipe de topografia da mina. Desta forma foi possível ajustar o levantamento ao sistema de coordenadas da mina, em datum South American Datum (SAD) 1969. Antes da primeira varredura foram determinadas as características do levantamento, com definição da densidade de pontos a serem amostrados, estabelecendo espaçamento de 7 mm entre pontos. Os dados adquiridos foram salvos em cartão de memória inserido no equipamento. Neste trabalho foram realizadas 9 varreduras, que foram posteriormente integradas em arquivo digital único.



Figura 12: Fotografias do levantamento de campo. a) Colocação do alvo esférico no ponto de coordenadas conhecidas. b) Equipamento Laser Scanner em funcionamento.

### 6.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS

Para fins comparativos do estudo de estabilidade nas galerias scaneadas foram adquiridas medidas de **112** planos de fraturas. As atitudes estruturais foram adquiridas, tanto nos pilares de sustentação quanto nas paredes, chão e teto.

### 6.4 PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS

A etapa inicial de processamento, que corresponde à etapa de junção dos pontos imageados pelas nove varreduras, foi realizada através da amarração dos alvos esféricos (Figura 12). Este processamento inicial foi feito pelo profissional da FARO, Sr. Adriano Scheuer, que amarrou os dados ao sistema de coordenadas utilizado pela mineradora. O arquivo foi disponibilizado em formato “.Isproj” que contém a nuvem de pontos, com coordenadas x, y e z, adquirida em cada base do Laser Scanner e a união de todas estas leituras resultando na nuvem de pontos em 3D (Figura 13). O software de manipulação



da FARO permite a visualização do levantamento integrado, assim como a identificação individual de cada uma das nove estações (Figura 14). Além disto, o software permite a visualização tridimensional do levantamento, simulando uma navegação virtual pelo conjunto de pontos (Fig. 6). Esta ferramenta permite a identificação de planos de fraturas, assim como a identificação de rochas com diferentes texturas e cores. O levantamento total apresenta 228 milhões de pontos com espaçamento de 7mm.

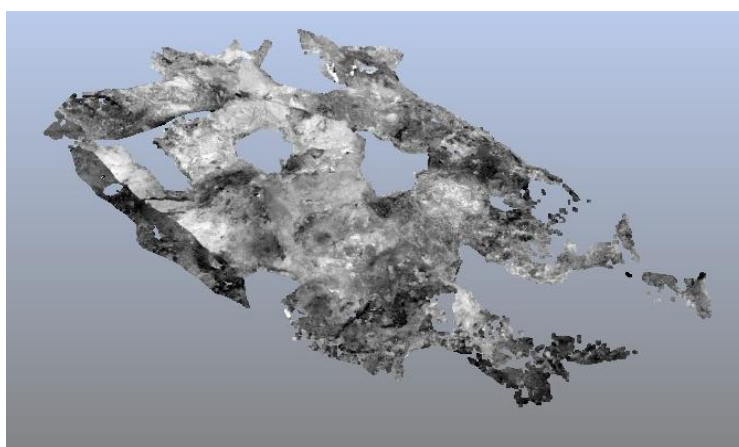


Figura 13: Imagem da nuvem de pontos resultado do levantamento no TB-04 – Mina Tabiporã – Campo Largo/PR. Visualização no software FARO SCENE.

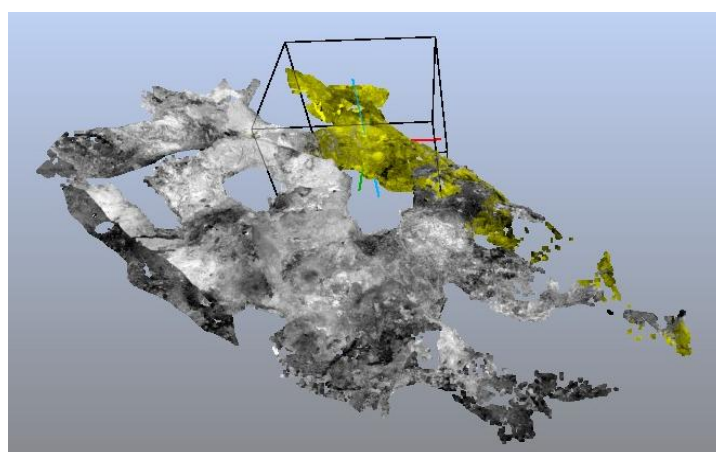


Figura 14: Imagem da nuvem de pontos do levantamento com o destaque em amarelo dos pontos pertencentes à primeira estação de varredura (Scan001). Visualização no software FARO SCENE.

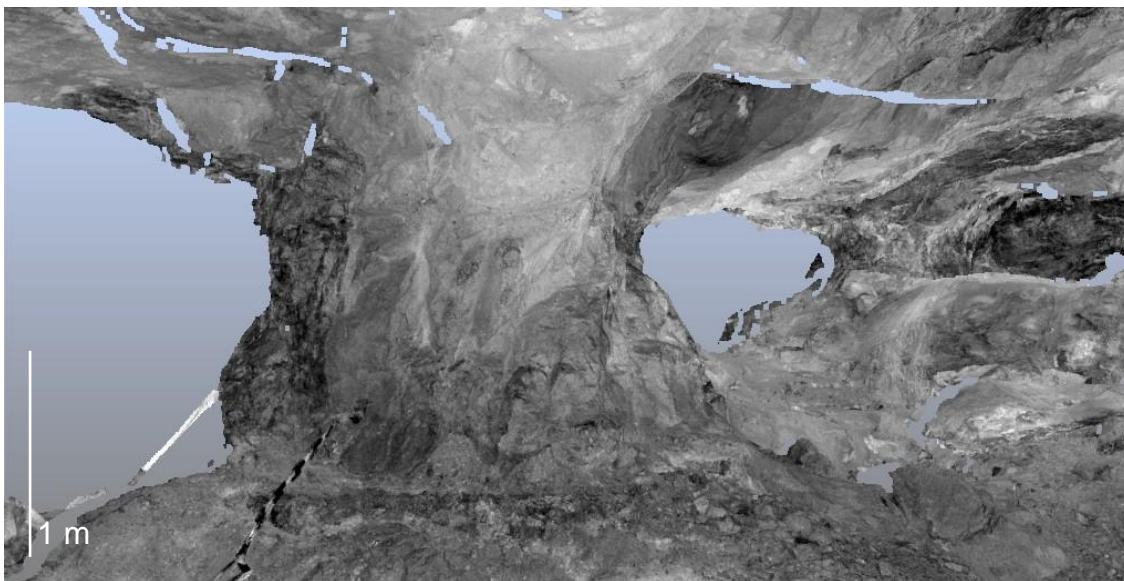


Figura 15: Vista 3D de dentro da galeria com a visualização de um pilar de sustentação scaneado na base 4. Visualização no software FARO SCENE.

O arquivo disponibilizado foi processado primeiramente pelo Software FARO SCENE 5.3.3.38662, disponibilizado para download da versão teste, com licença gratuita de 30 dias (<http://www.faro.com/download-centre>). Nesta etapa foram selecionados e delimitados os planos de fratura para aquisição de atitudes no software Geo01. Através da visualização dos planos no modo de 'visualização em planta' do software FARO SCENE, a delimitação dos pontos que correspondem à superfície das fraturas foi realizada com a ferramenta de 'seleção de plano' (Figura 16). Os pontos de varredura selecionados foram posteriormente exportados em arquivo ".ptx".

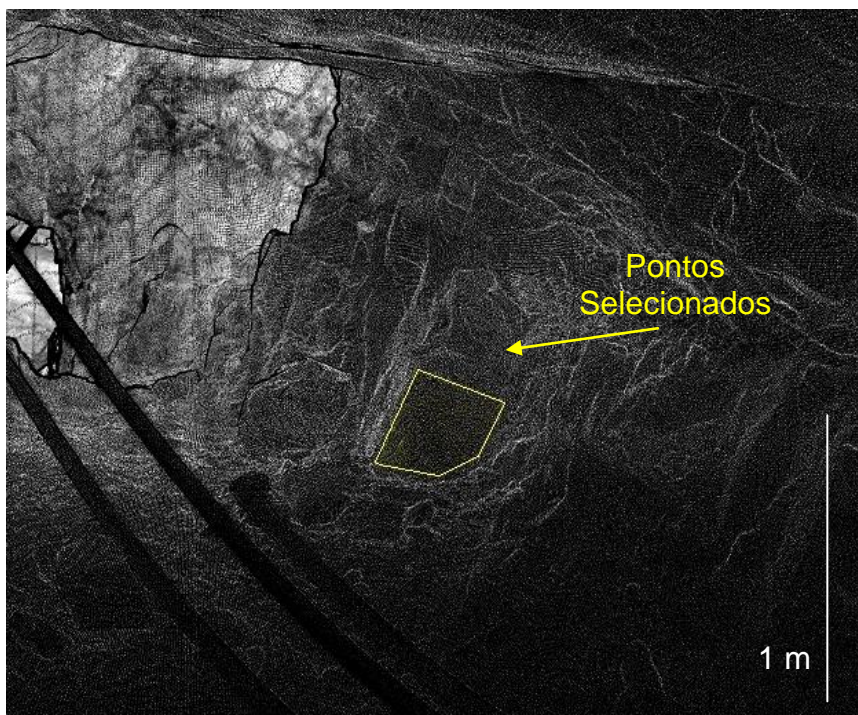


Figura 16: Seleção do plano de fratura no modo visualização planar, destacado em amarelo. Os pontos selecionados (cerca de 12 mil pontos) dentro do polígono foram exportados separadamente para posterior análise estrutural. Visualização no software FARO SCENE.

Foram selecionados 110 conjuntos de pontos, que representam planos de fraturas, estes conjuntos foram exportados separadamente gerando um novo conjunto de 110 arquivos ".ptx". Os arquivos neste formato contém principalmente os valores das coordenadas x, y e z de cada ponto, e podem também ter valores de RGB e intensidade de sinal, organizados em uma tabela.

A segunda parte do processamento foi feita no software Geo01, um aplicativo desenvolvido na linguagem de programação Delphi para o projeto IMAGE, realizado pelo LABAP/UFPR (Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica) e PETROBRAS em 2006. A base de cálculo deste aplicativo consiste no uso da triangulação Delaunay, onde cada ponto é o vértice de um triângulo. Esta triangulação tem a propriedade de que 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 17), que pode ser interpretado com um plano. A determinação da direção deste plano é feita a partir dos três pontos.

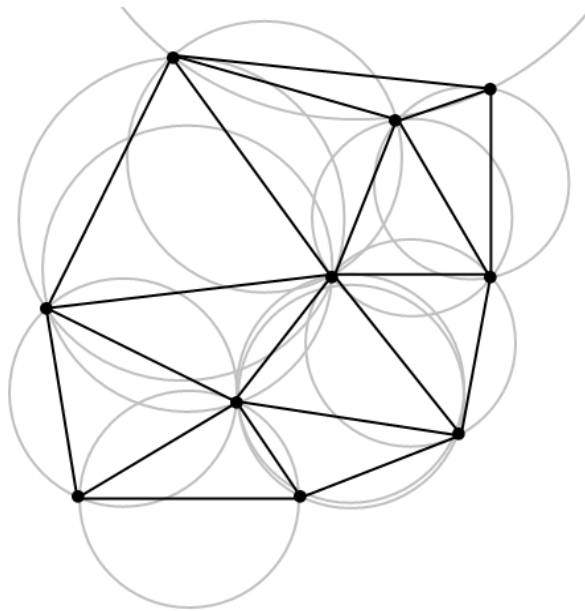


Figura 17: Representação da triangulação Delaunay.

Fonte: <http://sao-paulo.pm.org/artigo/2011/InfografiaemDadosGovernamentais>

Dados três pontos com coordenadas:  $P1 = X_1; Y_1; Z_1$ ;  $P2 = X_2; Y_2; Z_2$  e  $P3 = X_3; Y_3; Z_3$  equação do plano que passa por estes pontos é dada por:

$$A \cdot X + B \cdot Y + C \cdot Z = D$$

Onde

$$A = (Y_2 - Y_1) \cdot (Z_3 - Z_1) - (Y_3 - Y_1) \cdot (Z_2 - Z_1)$$

$$B = (X_3 - X_1) \cdot (Z_2 - Z_1) - (X_2 - X_1) \cdot (Z_3 - Z_1)$$

$$C = (X_2 - X_1) \cdot (Y_3 - Y_1) - (X_3 - X_1) \cdot (Y_2 - Y_1)$$

$$D = A \cdot X_1 + B \cdot Y_1 + C \cdot Z_1$$

Assim cada triângulo formado por pontos com coordenadas  $x, y, z$  é representado por um plano. Através de conversões do ângulo trigonométrico em ângulo azimutal temos um plano com direção e mergulho determinados, na notação geológica CLAR.

O arquivo de saída do software Geo01 é um “.txt” com duas colunas, que representam o mergulho e a direção de cada plano triangulado, a quantidade de atitudes dos planos variam conforme a quantidade de pontos

selecionados inicialmente. Neste estudo a planilha de saída contém entre 200 e 12.000 atitudes.

A terceira etapa do processamento consistiu em inserir os dados da planilha do arquivo ".txt" em um software de análise estrutural. Para isto foram utilizados os softwares Dips (Rocscience) e Stereo32. Os polos de cada plano foram plotados em diagrama estrutural de igual-área, gerando diagramas de contorno que foram analisados separadamente e comparados com os diagramas obtidos na análise dos dados medidos em campo.

Os arquivos de saída do Geo01 não são declinados, para efeito de comparação os dados do campo foram corrigidos e os dados do software também, as comparações são apresentas a seguir.

## **7 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS DADOS MEDIDOS EM CAMPO – DADOS DIRETOS**

Durante o levantamento de campo foram feitas **112** medidas de fraturas, com o objetivo de compará-las com as atitudes obtidas de forma indireta nas imagens scaneadas. As atitudes foram tratadas em diagrama estereográfico como polos, em diagrama de contorno (Figura 18). O diagrama de contorno mostra cinco concentrações máximas, representando os polos de quatro famílias de fraturas principais (A, B, C e D) e uma secundária (E).

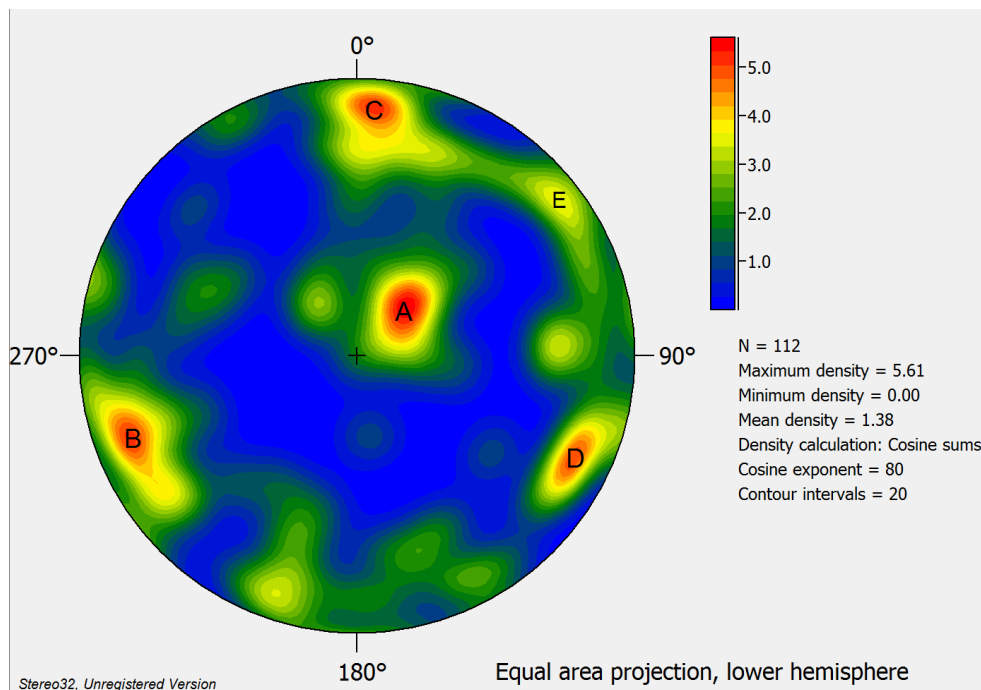


Figura 18: Diagrama estereográfico de contorno destacando cinco concentrações máximas (A, B, C, D e E) que representam as principais famílias de fraturas, dados não declinados. Visualização software Stereo32.

## 7.1 QUEDA DE BLOCOS POR AÇÃO DA GRAVIDADE

Para a análise de estabilidade de blocos no teto da escavação, as famílias de fraturas foram analisadas em conjuntos de três unidades, resultando em quatro possíveis combinações de famílias de fraturas: A-B-C; A-B-D; A-C-D e B-C-D.

Em todas as análises há condições para a queda de blocos por gravidade. Somente na condição apresentada na Figura 19 **c**, um dos planos formados é a superfície horizontal do teto do túnel, representada pelo círculo do diagrama. Nesta condição em particular, por se tratar de túnel, existe também o risco de queda, conforme apresentado no item 4.1.1, desta monografia. Nas outras análises o bloco, em cunha, é formado por 3 descontinuidades. Todas as figuras de interseção contém o ponto central do diagrama, que representa a linha imaginária vertical traçada entre o ápice do bloco e contida na base deste, atendendo a condição de queda de bloco por gravidade (Figura 19).



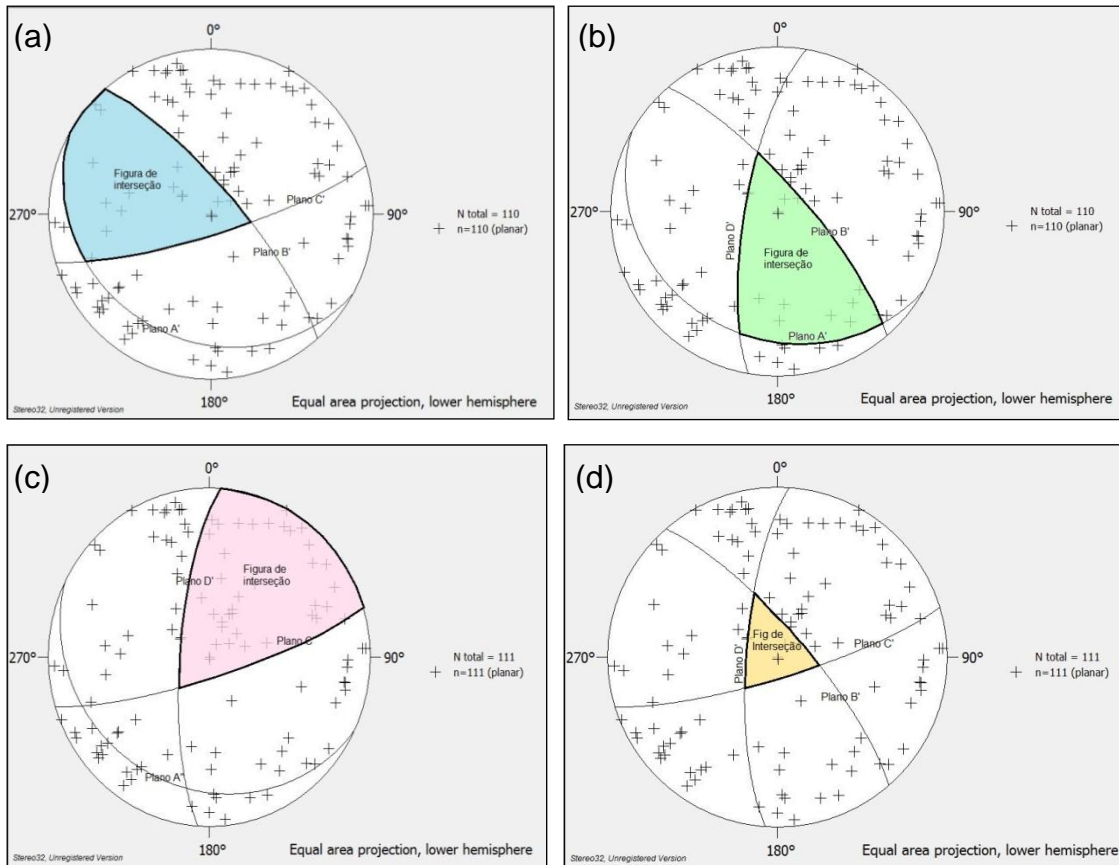


Figura 19: Diagramas de análise de estabilidade de queda de bloco com três descontinuidades, em todas as análises há ocorrência de queda de blocos, uma vez que a figura de interferência formada inclui a linha imaginária vertical representada pelo ponto no centro do diagrama. (a) Plano A' representa a concentração de polos A (Figura 18), Plano B' representa a concentração de polos B (Figura 18) e o Plano C' representa a concentração de polos C (Figura ). (b) Planos: A', B' e D'. (c) Planos: B' e D'. (d) Planos: B', C', D'.

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

Através da análise da nuvem de pontos, gerada pelo imageamento realizado com o equipamento Laser Scanner, foi possível visualizar e identificar planos de descontinuidades, podendo ser falhas ou juntas. A partir desta análise foram selecionados 110 conjuntos de pontos de varredura que representam planos de descontinuidades em toda a área da galeria: teto, chão, paredes e colunas de sustentação. Estes subconjuntos de pontos selecionados foram triangulados gerando o conjunto de dados de Azimute/Mergulho de cada triângulo. Este conjunto de dados de Azimute/Mergulho de cada conjunto de pontos do plano foi plotado em diagrama estereográfico de igual-área. Desta

forma, a determinação da direção de mergulho dos planos foi realizada através da construção de diagrama estereográfico individual para cada conjunto de pontos de varredura.

Como resultado parcial para cada plano foi construído diagrama estereográfico, visando a determinação da orientação principal. Nos planos analisados observou-se que o diagrama pode apresentar única concentração de polos (Figura 20), que foi interpretada como a superfície de um plano relativamente liso. Em outros casos observou-se a dispersão ao longo do eixo EW (Figura 21) e em outros mais de uma concentração de polos (Figura 22), interpretado como irregularidades do plano ou resultado do efeito de borda gerado pelo Laser Scanner.

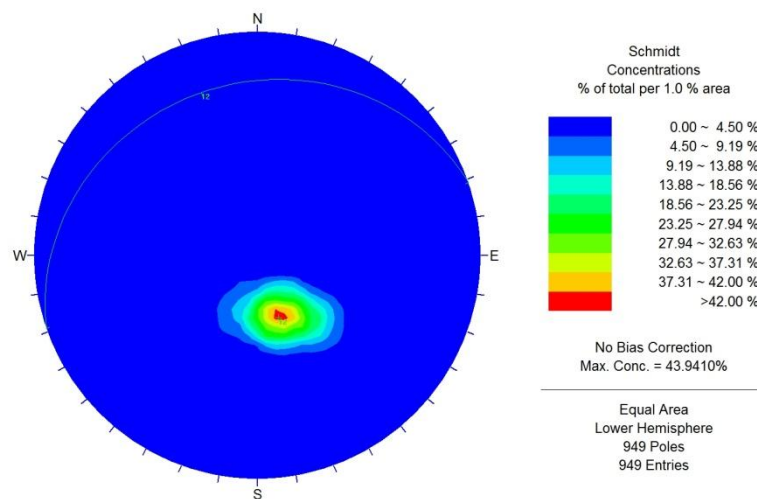


Figura 20: Diagrama estereográfico de contorno, com a concentração de polos, representando a direção preferencial do plano. Visualização: Software Dips – Rocscience Inc.



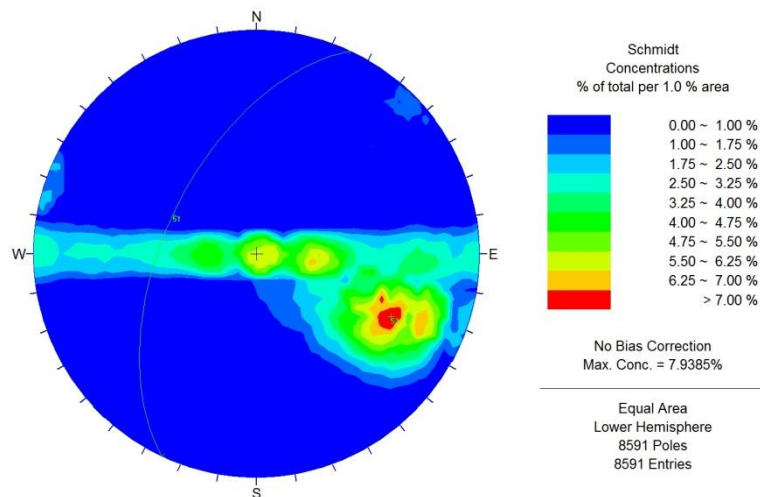


Figura 21: Diagrama estereográfico de contorno, com dispersão de medidas ao longo do eixo E-W e concentração de polos única. Visualização: Software Dips – Rocscience Inc.

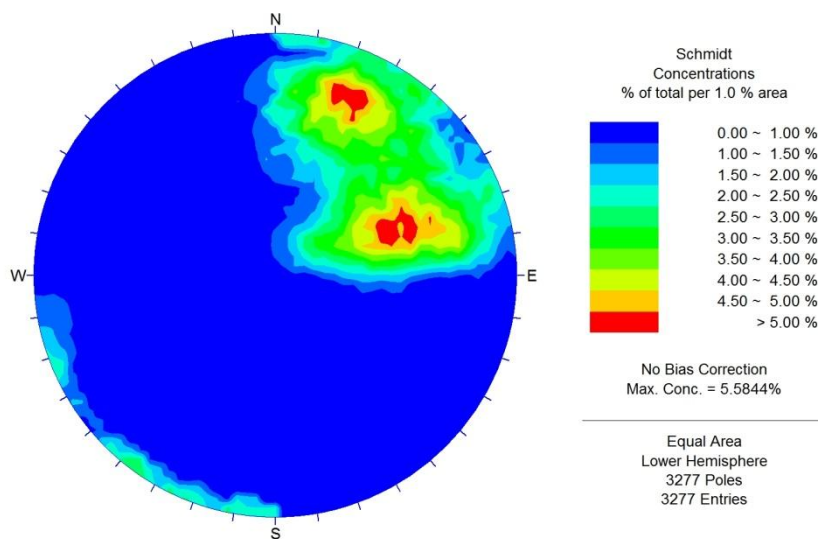


Figura 22: Diagrama de contorno com duas concentrações de polos, que representam irregularidades no plano ou que mais de um plano foi selecionado. Visualização: Software Dips – Rocscience Inc.

Dos 110 diagramas estereográficos confeccionados, aproximadamente 73% (80 diagramas) apresentaram única concentração de polos com pouca ou nenhuma dispersão e foram interpretados como a representação de planos definidos, possivelmente lisos e/ou com poucas irregularidades.

Dezessete diagramas apresentam dispersão E-W (15%) bem evidenciada, com ou sem polo de concentração máxima definida. Avaliando a consistência destes planos em novo diagrama de contorno observamos a concentração de polos no centro do diagrama, representando plano horizontal, e outra concentração secundária, indicando plano próximo a vertical (Figura 23).

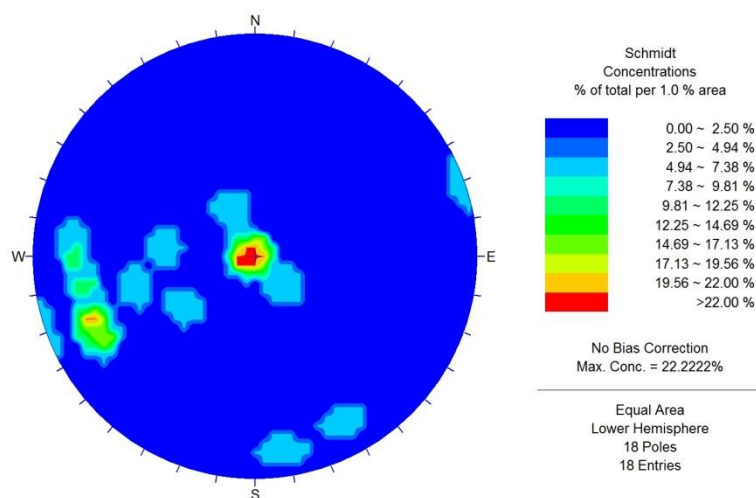


Figura 23: Diagrama de contorno com 17 planos que apresentaram dispersão ao longo do eixo E-W. A concentração de polos no centro do diagrama representa planos horizontais. Visualização: Software Dips – Rocscience Inc.

Alguns diagramas apresentam mais de uma concentração de polos ou concentração com grande dispersão, totalizando treze planos (12%), sendo que dez planos apresentam concentrações de polos próximas, que muito possivelmente indicam irregularidades nos planos. Somente três planos apresentaram concentrações de polos muito diferenciadas, indicando planos com diferentes direções.

O diagrama final apresenta 124 medidas, uma vez que nos casos onde foi identificada mais de uma concentração de polos, os dois planos médios foram inseridos na análise final (Figura 24).

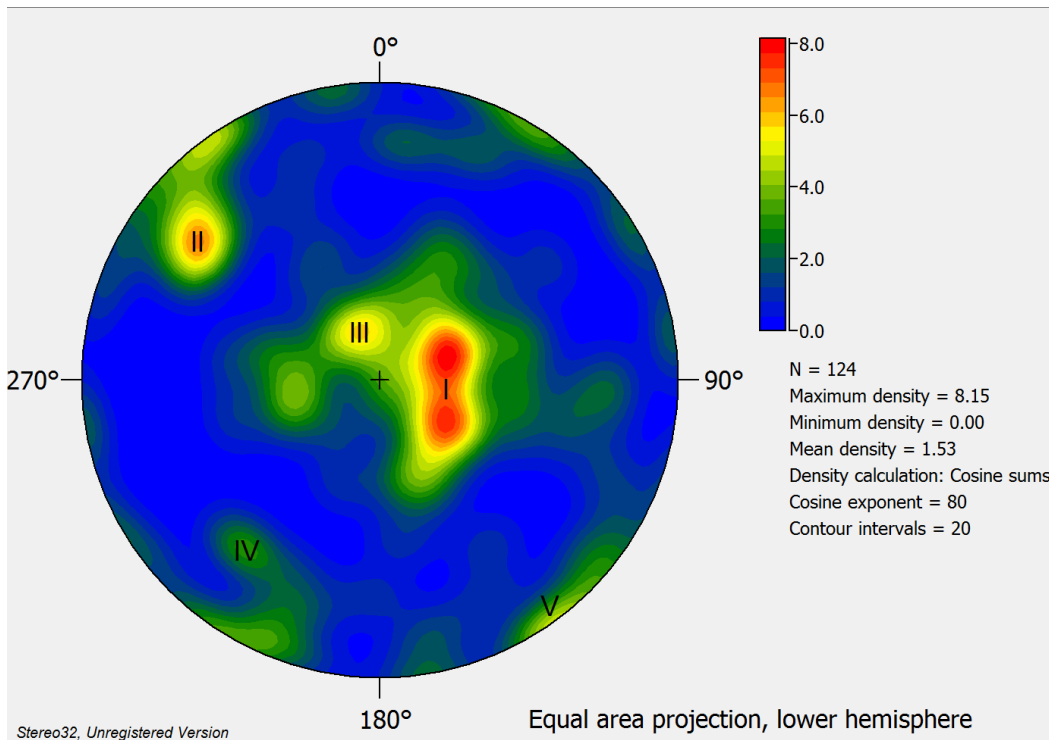


Figura 24: Diagrama estereográfico de contorno das atitudes obtidas de forma indireta, destacando três concentrações máximas (I, II e III) que representam as principais famílias de fraturas, dados não declinados. Visualização software Stereo32

## 8.1 ANÁLISE DE QUEDA DE BLOCOS

As incertezas geradas na obtenção dos dados indiretos podem ser refletidas na análise geotécnica realizada (Figura 25), no entanto a análise foi realizada com o intuito de comparação de resultados. Pretende-se desta forma avaliar se mesmo com a não identificação de algumas direções de fraturas pelo método indireto, fica caracterizado o risco de queda de blocos por gravidade ou deslizamento.

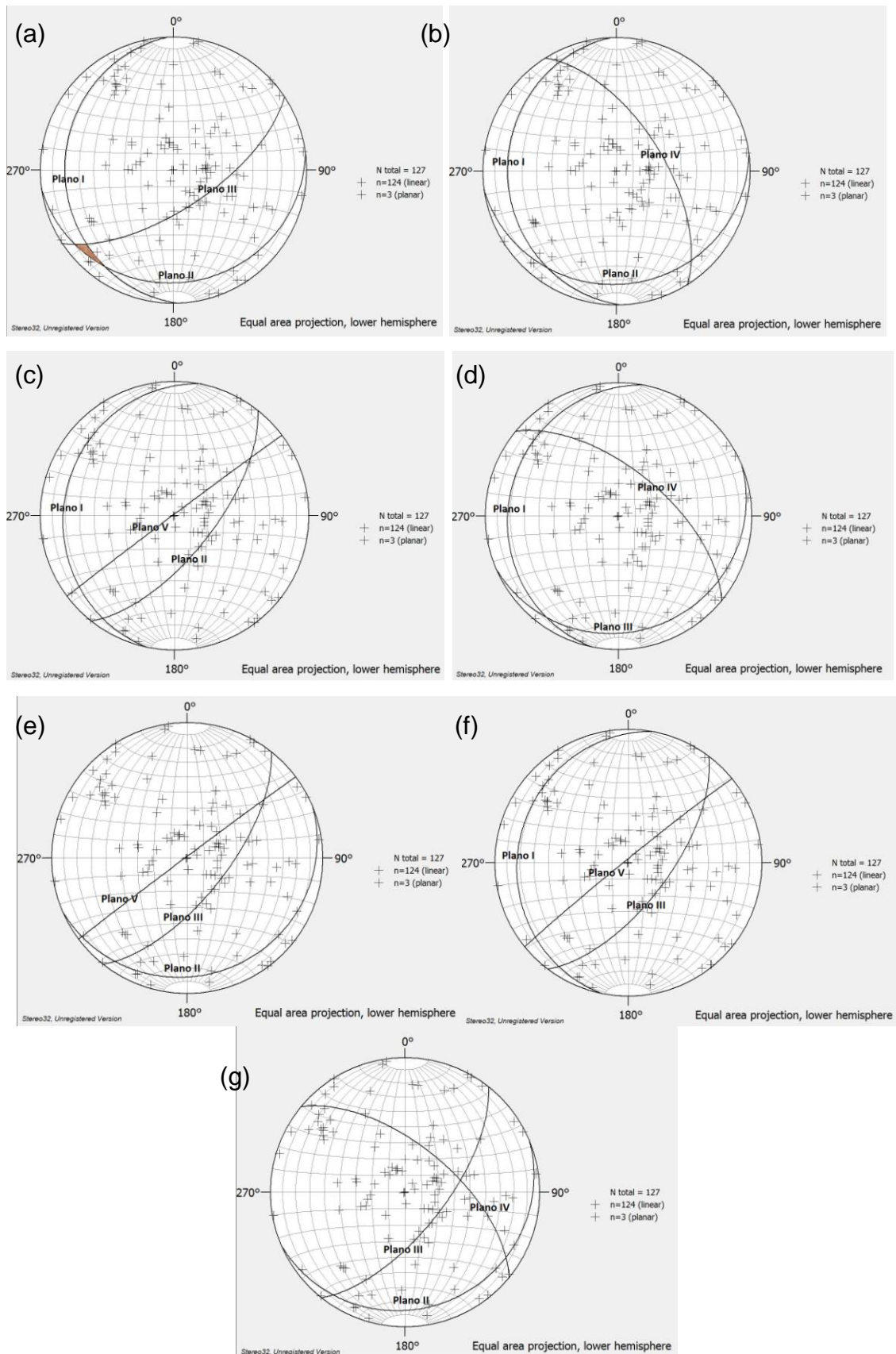


Figura 25: Diagramas de análise de estabilidade, os planos representam famílias de fraturas obtidas pela análise de dados indiretos. (a) Plano I representa a concentração de polos I

(Figura 20), Plano II representa a concentração de polos II (Figura 20) e plano III representa a concentração de polos III (Figura 20). (b) Planos I, II e IV (c) Planos I, II e V (d) Planos I, III e IV (e) Planos I, III e V (e) Planos II, III e IV (f) Planos II, III e V (g) Planos III, IV e V. Visualização no software Stereo32.

Nos diagramas das análises b, c, d, e, e g, da Figura 25, há ocorrência de queda de bloco por ação da gravidade. Na análise f há queda de bloco com deslizamento em um dos planos, como demonstrado na Figura 26 a, sendo que foi o ângulo de atrito estipulado de  $30^\circ$ . Apenas a análise da Figura 25a mostrou-se estável quanto ao deslizamento, como mostra a Figura 26 b.

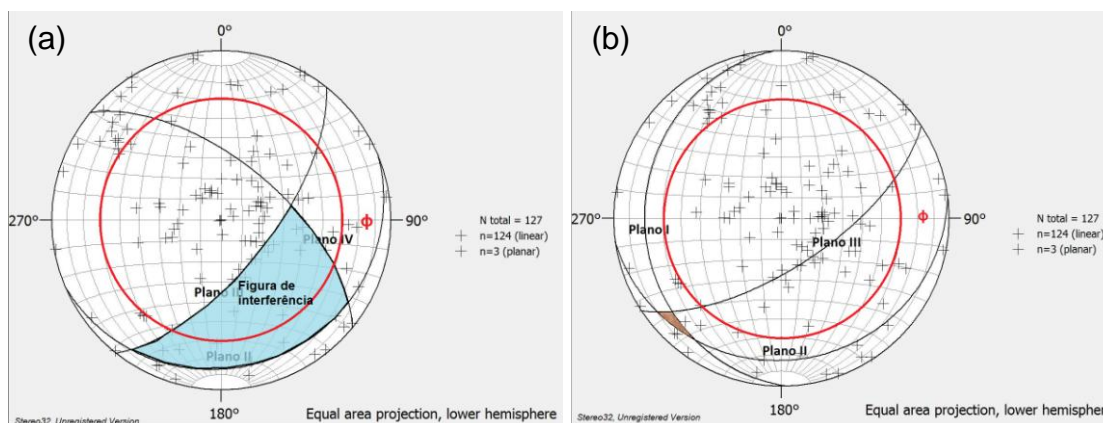


Figura 26: (a) Análise de estabilidade  $f$  (Figura 25f) resulta em queda de bloco com deslizamento em um dos planos. (b) Análise de estabilidade  $a$  (Figura 25a) resulta em bloco estável.

## 9 COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO ENTRE OS DADOS DIRETOS E INDIRETOS

A comparação entre os dados diretos e indiretos é feita com base no diagrama estereográfico de contorno gerado na análise final de cada um dos métodos.

As primeiras comparações foram realizadas entre os dados com e sem a correção da declinação magnética, tanto dos dados diretos (Figura 27) quanto dados indiretos (Figura 28). O ângulo de declinação magnética para



17/05/2014, dia do levantamento, é de  $-19^{\circ}11'$  (Observatório Nacional Brasileiro).

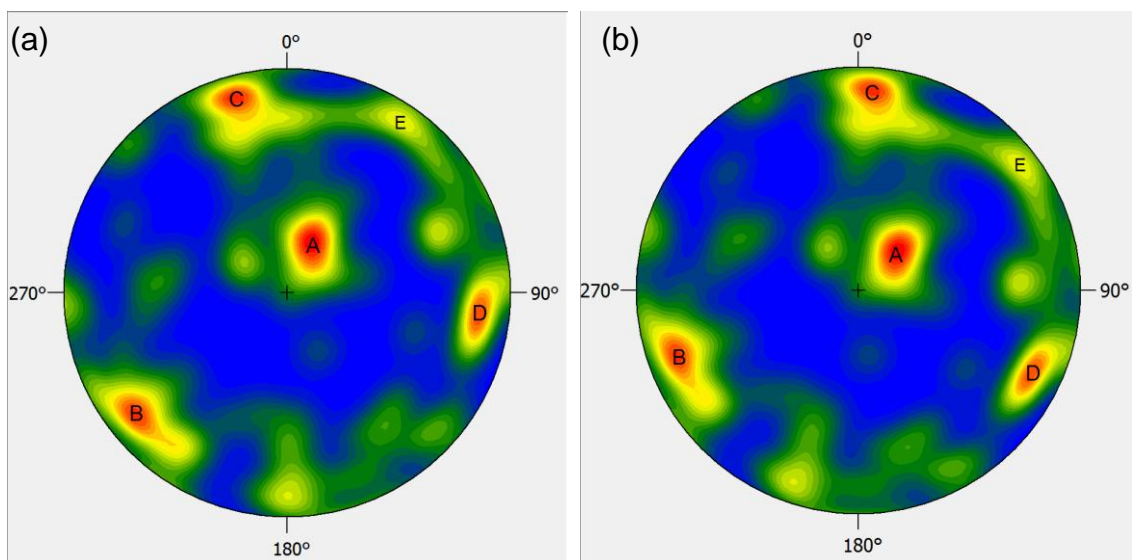


Figura 27: Comparação entre os diagramas de dados diretos (a) dados declinados (b) dados não declinados. Visualização: Software Dips – Rocscience Inc.

As modificações mais notáveis são das concentrações localizadas nas bordas do diagrama, representantes dos planos mais inclinados, destaca-se a mudança de quadrante da família C, de NW para NNE (Figura 27).

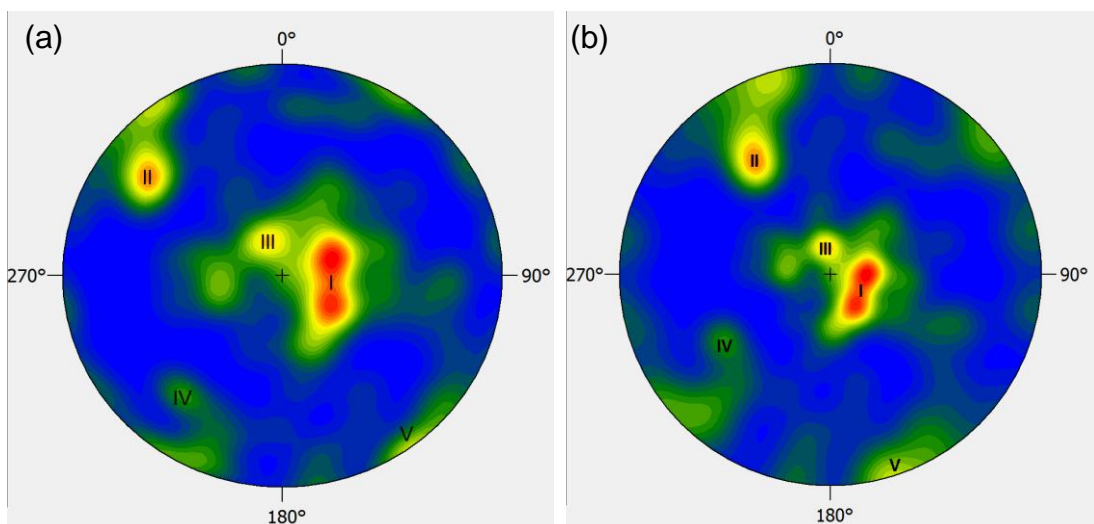


Figura 28: Comparação entre os diagramas de dados indiretos (a) dados declinados (b) dados não declinados. Visualização: Software Dips – Rocscience Inc.

No caso dos dados indiretos também podemos perceber uma rotação das concentrações de polos, onde o espalhamento da concentração II aproxima-se mais da concentração C, no caso dos dados diretos.

Comparando os resultados obtidos em campo, diagrama estereográfico de contorno dos dados diretos, e os resultados obtidos pela aquisição e processamento por Laser Scanner, diagrama estereográfico de contorno dos dados diretos, observamos que alguns máximos estruturais podem ser correlacionados. A figura 29 mostra a comparação entre os diagramas, destacando as principais concentrações obtidas pelos métodos.

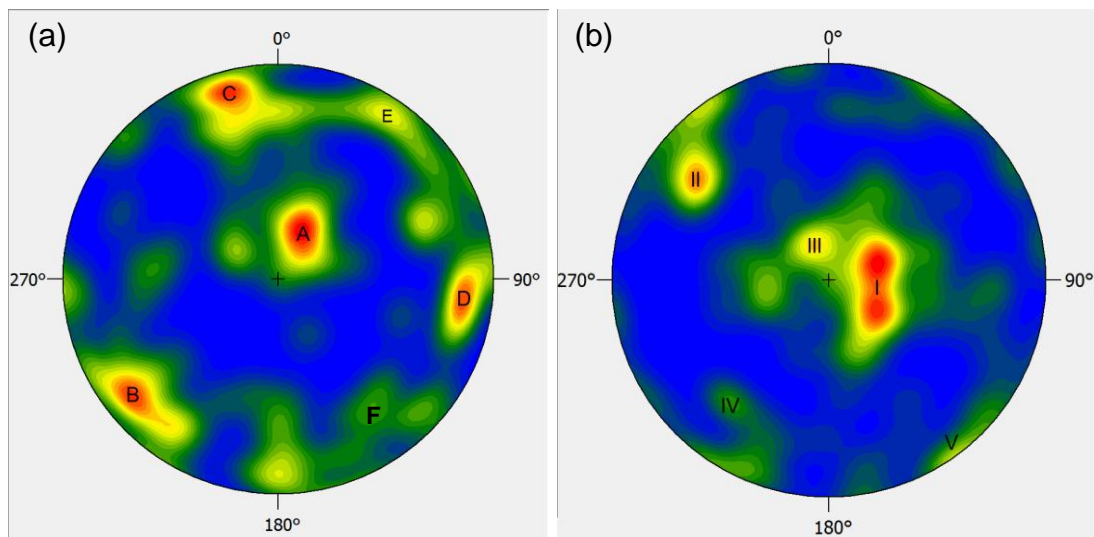


Figura 29: Comparação entre os diagramas de dados obtidos em campo (a) e dados obtidos de forma indireta (b) por aquisição com Laser Scanner e processamento. Visualização: Software Dips – Rocscience Inc.

As duas principais famílias de fraturas A e I são correlacionáveis, assim como B e IV. A concentração C e II podem estar associadas a alguma dispersão maior de medidas. As concentrações D e E não foram correlacionadas a nenhuma concentração significativa do diagrama de dados indiretos. A concentração V tende a ter correlação com a F, apesar de ambas terem baixa densidade.

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, enquanto no método indireto obteve-se grande densidade de planos na concentração I (Figura 27b). A máxima concentração de fraturas em I pode indicar vícios na manipulação da imagem 3D. A correlação parcial os dados obtidos pode indicar vícios na seleção de planos no método indireto.

## 10 CONCLUSÃO

O estudo comparativo entre a obtenção de dados diretos e indiretos para a análise de estabilidade em escavações mostrou conclusões dispersas e parciais neste etapa, embora a técnica se mostre interessante e aplicável ao objetivo. Porém, algumas observações são pertinentes:

- O avanço na tecnologia Laser Scanner permite a aquisição de dados rápida, precisa e com boa representação da superfície, devido ao espaçamento entre os pontos de 7mm;
- 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 no software.
- Os dados estruturais obtidos em campo mostraram-se mais consistentes e permitiram a visualização de mais planos de fraturas. Desta 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 não definiu de maneira clara os principais planos de fraturas.

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

- Desenvolvimento de método para rápida aquisição de planos e formação de superfícies a partir da nuvem de pontos;



- Simplificação do método de determinação da atitude dos planos;
- Desenvolver método para a seleção de pontos em modo de visualização 3D para melhor dimensionamento e seleção dos planos de fratura.

## 11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. ABELLÁN, A.; VILAPLANA, J.M.; MARTÍNEZ, J. Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). 2006. *Engineering Geology* 88 (2006) 136 – 148. Disponível em [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

ASSALI, P.; GRUSSENMEYER, P.; VILLEMIN, T.; POLLET, N.; VIGUIER, F. Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. 2014. *Journal of Structural Geology* 66 (2014) 102 – 104.

CHIODI FILHO, C.; SANTOS, J.F.; SOARES, P.C.; MORETZOHN, J.S. Estudo de elementos Terras Raras para caracterização e avaliação metalogenética de granitóides no escudo paranaense. 1989. In: *Anais do II Congresso Brasileiro de Geoquímica*, Rio de Janeiro, 1989. P. 487 – 498.

CURY, L.F. Geocronologia e Litogeoquímica dos stocks graníticos da porção Sudeste da Faixa Apiaí, Estado do Paraná. 2003. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D.R. Sistema Laserscanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento. 3ª Edição- UFPR – Curitiba/PR – Brasil. 97 pg. 2004.

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

PICANÇO, J. L. Composição isotópica e processos hidrotermais associados aos veios auríferos do maciço granítico Passa Três, Campo Largo, PR. 2000. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 166 p.

PIEKARS, G.L.F. O granito Passa Três – PR e as mineralizações auríferas associadas. 1992. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

RONDON, T. São Paulo Perl Mongers [Internet]. Disponível em <http://sao-paulo.pm.org/artigo/2011/InfografiaemDadosGovernamentais>

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. E RAMIRO, A. P. Relatório Final do Projeto: Imageamento 3D e arquitetura de elementos essenciais de sistemas petrolíferos. Realização: LABAP, UFPR e PETROBRAS. Coordenação: Sidnei Pires Rostirolla.

STURZENEGGER, M.; STEAD, D. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. 2009. Engineering Geology 106 (2009) 163 – 182.

VOSELMAN, G.; HELLMAYER, A.; CENTENO, J.; MITISHIDA, E.; PHILIPS, J. Curso Sensoriamento remoto por LIDAR (LIDAR Remote Sensing). XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2007. Disponível em <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/pdf/curso10/Centeno/centeno.pdf>. Acessado em 20 de setembro de 2014.

WUTKE, J.D. Métodos para a avaliação de um sistema Laser Scanner terrestre. 2006. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.