UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE DESCONTINUIDADES BASEADA EM
TÉCNICAS DE *STRUCTURE FROM MOTION*: APLICAÇÃO EM
MINA A CÉU ABERTO**

Camila Duelis Viana

Orientador: Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

SÃO PAULO
2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Viana, Camila Duelis

Análise estrutural de descontinuidades baseada em técnicas de structure from motion: aplicação em mina a céu aberto / Camila Duelis Viana. - São Paulo, 2015.

111 p + anexos + CD-ROM

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP

Orient.: Campanha, Ginaldo Ademar da Cruz

1. Fotogrametria 2. Geologia estrutural 3. Grupo São Roque I. Título

*“Deep in the human unconscious is a pervasive need for a logical universe that makes sense.
But the real universe is always one step beyond logic.”*

*The Sayings of Muad'Dib by the Princess Irulan
Dune, 1965 – Frank Herbert*

RESUMO

No âmbito da caracterização geomecânica, medidas de atitudes de descontinuidades e seus parâmetros derivados são primordiais para o conhecimento do maciço, auxiliando na avaliação de estabilidade de cortes e no correto dimensionamento de soluções de estabilidade. Porém, a coleta deste tipo de dado é demorada e muitas vezes perigosa. Sendo assim, é de grande interesse o desenvolvimento de técnicas seguras, confiáveis e de baixo custo que forneçam a maior quantidade possível de informações. Os recentes avanços na geração de modelos digitais tridimensionais oriundos de fotografias fazem da fotogrametria, aliada a procedimentos clássicos de mapeamento estrutural, uma solução eficiente para o problema. O trabalho teve por meta utilizar e comparar técnicas de fotogrametria terrestre digital baseadas em *Structure from Motion* com os procedimentos clássicos de mapeamento de descontinuidades, de forma a criar modelos digitais rigorosos dos maciços escavados, que fornecessem uma definição detalhada e precisa dos taludes, permitindo a identificação de estruturas geológicas existentes, que pudessem, por exemplo, serem utilizadas para posterior análise de rupturas. Para isso, foram selecionadas duas frentes de escavação em uma mina de calcário a céu aberto do Grupo São Roque, pertencente a empresa Geocal, no município de Santana de Parnaíba. Nas frentes selecionadas, duas *scanlines* e alguns planos de referência foram amostrados no campo com o uso de bússola geológica convencional. Para a amostragem digital, foram gerados modelos tridimensionais das frentes selecionadas com o programa *Photoscan*. Desenvolveram-se rotinas computacionais em linguagem Python, com auxílio da biblioteca *NumPy* e do pacote *NetworkX*, para cálculo da atitude de planos de descontinuidade selecionados nos modelos tridimensionais e para cálculo de atitude de planos ao longo de uma linha de amostragem virtual, ambos realizados com auxílio do programa *MeshLab*. Foram calculados os desvios angulares entre os polos dos planos medidos com auxílio de bússola e aqueles resultantes da amostragem virtual, bem como entre as atitudes médias das famílias identificadas por cada método. Os resultados mostraram uma boa concordância entre as amostragens, reforçando que o uso da técnica é viável e confiável.

ABSTRACT

Within the geomechanical characterization, discontinuities attitudes and their derived parameters are essential to the rock mass knowledge, assisting in stability assessment and design. However, the acquisition of such data is time consuming and often dangerous. Therefore, it is of great interest the development of reliable, low cost and safe techniques to provide the greatest amount of information. Recent advances in the generation of three-dimensional digital models derived from photographs make photogrammetry, combined with classical procedures of structural mapping, an efficient solution to the problem. The main goal was to apply and compare digital terrestrial photogrammetry techniques based on Structure from Motion with classical discontinuities mapping, in order to generate accurate digital models of the excavated rock mass, to provide a detailed and precise slope definition, allowing identifying existing geological structures, which could be used for further stability analysis, for example. For testing, two rock slopes have been selected in a limestone open pit mine of São Roque Group, owned by Geocal Company in Santana de Parnaíba. In the selected areas, two scanlines and some reference plans were sampled in the field using conventional geological compass. For digital sampling, three-dimensional models of the areas were generated with Photoscan software. Computational algorithms were generated in Python programming language, with the aid of the NumPy library and NetworkX package, for calculating the attitude of selected discontinuity plans in three-dimensional models and plans along a virtual sampling line, both performed with MeshLab. The angular deviations between the poles of the plans measured with compass and those resulting from the virtual sampling, and between the means attitudes of the discontinuities sets identified by each method were calculated. The results showed a good agreement between sampling methods, reinforcing that the use of the technique is feasible and reliable.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Rose e Roberto, por sempre apoiarem e incentivarem minhas ideias, por mais malucas que elas me parecessem. Nunca poderei agradecer o suficiente por tudo.

Ao professor Ginaldo Campanha, por aceitar me orientar neste projeto, e mais do que isso, por me ensinar muito durante esta parceria. Agradeço a confiança, a atenção, a paciência e todo o apoio dedicado ao longo destes dois anos.

Ao Sr. Roberto Zanotto, Eng. Silviano Salazar, Eng. Auro Faccio e toda a equipe da mineradora Geocal, que me assistiram durante a execução do projeto e permitiram o acesso irrestrito à cava, inclusive aos finais de semana.

Ao Arthur Endlein, pela parceria que, a meu ver, não poderia ser mais bem sucedida. Obrigada por confiar em mim para ajuda-lo e por me ajudar a enfrentar minhas dificuldades.

Aos amigos: Renato Martinez e Dailson Bertassoli pelo apoio emocional, por todas as conversas sobre a vida, o universo e tudo mais, e por sempre estarem ali, muito obrigada; Luiz Urtiga, Mayko Oliveira, Eduardo Ribeiro, Bruno Salmoni, Caio Mello e Heloísa Dias pela companhia em campo e pelas conversas produtivas (ou não); Natália Leal e Bruno Cesar pelo apoio, amizade, compreensão, paciência e companheirismo, serei eternamente grata: *merci beaucoup, mes pains au chocolat!*; e Michel Miyazaki e Lucas Farnetane, que mesmo a um oceano de distância, sempre me aguentam e se dispõem a “ouvir sobre pedras”.

A todos os professores e funcionários do Instituto de Geociências, por todo apoio que venho recebendo ao longo destes anos.

Ao CNPq pela bolsa de pesquisa concedida e à FAPESP pelo auxílio financeiro concedido ao processo 2013/15862-8.

E finalmente, a todos aqueles que, mesmo que eu tenha esquecido de mencionar, fizeram a caminhada desta etapa ser mais leve e alegre.

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	7
AGRADECIMENTOS	9
SUMÁRIO	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	17
1. INTRODUÇÃO	19
1.1. APRESENTAÇÃO AO TEMA	19
1.2. OBJETIVOS E METAS	20
1.3. ÁREA DE ESTUDO	20
1.4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1. GEOLOGIA REGIONAL	24
2.1.1. Contexto histórico	25
2.1.2. Posicionamento tectônico e deformação	26
2.1.3. Litoestratigrafia	28
2.2. AMOSTRAGEM E TRATAMENTO DE DADOS ESTRUTURAIS	29
2.3. DADOS DIRECIONAIS	33
2.4. FOTOGRAMETRIA	37
2.4.1. Histórico	37
2.4.2. Fotogrametria Digital	38
2.4.3. Structure From Motion (SfM)	40
2.4.4. Georreferenciamento	46
3. CONTEXTO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL LOCAL	49
3.1. UNIDADES MAPEADAS	55
3.1.1. Solo coluvionar	55
3.1.2. Quartzito (Qz)	55
3.1.3. Metassiltito com intercalação de metarenito (Msa)	56
3.1.4. Brecha metadolomítica (Dol)	56
3.1.5. Metarritmito carbonático (Mrc)	57
3.1.6. Metassiltito homogêneo (Msh)	59
3.2. GEOLOGIA ESTRUTURAL	60
3.3. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	68
4. LEVANTAMENTO E ANÁLISE DAS DESCONTINUIDADES	70
4.1. DESCRIÇÃO DAS FRENTES SELECIONADAS	70
4.2. AMOSTRAGEM TRADICIONAL	77
4.3. GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS E AMOSTRAGEM VIRTUAL	79

4.3.1.	<i>Funcionamento das rotinas criadas.....</i>	82
4.3.2.	<i>Modelo de teste.....</i>	86
4.3.3.	<i>Frente 1</i>	88
4.3.3.1.	<i>Scanlines virtuais</i>	94
4.3.4.	<i>Frente 2</i>	97
4.4.	DISCUSSÃO.....	100
5.	CONCLUSÕES.....	103
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXO 1 – MANUAL DE USO DOS PROGRAMAS UTILIZADOS		113
ANEXO 2 – TRABALHO APRESENTADO NO 47º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA		127
ANEXO 3 – ARTIGO A SER SUBMETIDO AO PERIÓDICO INTERNACIONAL <i>COMPUTERS & GEOSCIENCES</i>		129
ANEXO 4 – DADOS DA LINHA DE AMOSTRAGEM COM BÚSSOLA (SCANLINE 1C)		143
ANEXO 5 – DADOS DA LINHA DE AMOSTRAGEM COM BÚSSOLA (SCANLINE 2C)		146
ANEXO 6 – DADOS DOS PLANOS EXTRAÍDOS DO MODELO VIRTUAL DA FRENTE 1		149
ANEXO 7 – DADOS DA LINHA DE AMOSTRAGEM VIRTUAL (SCANLINE 1V)		153
ANEXO 8 – DADOS DA LINHA DE AMOSTRAGEM VIRTUAL (SCANLINE 2V).....		155
ANEXO 9 – DADOS DOS PLANOS EXTRAÍDOS DO MODELO VIRTUAL DA FRENTE 2		157

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mapa de localização e acessos da área de estudo.	21
Figura 1.2 – Fluxograma da sequência de passos necessários para a seleção e extração de atitudes dos planos de descontinuidade no modelo tridimensional.	23
Figura 2.1 – Mapa geológico regional.....	25
Figura 2.2 – Exemplo do cálculo de espaçamento real de descontinuidades.	31
Figura 2.3 – Conjunto de perfis de referência para determinação do JRC.....	33
Figura 2.4 – Representação da decomposição da normal de um plano em seus cossenos diretores.....	34
Figura 2.5 – Diagrama triangular para classificação de forma.....	36
Figura 2.6 – Esquema de um estereopar, que possibilita a visão estereoscópica.	39
Figura 2.7 – Resultado após uso de SfM.....	41
Figura 2.8 – Exemplos de nuvem esparsa e densa geradas para a superfície de um talude em rocha.....	43
Figura 2.9 – Exemplos de atributos de pontos.....	44
Figura 2.10 – Fluxograma das etapas de trabalho necessárias para a geração de um modelo digital.	46
Figura 2.11 – Arranjo para os diferentes métodos de registro.	47
Figura 3.1 – Vista para NE do lado norte da cava em março/2014.....	49
Figura 3.2 – Vista para NE do lado norte da cava em dezembro/2014.	50
Figura 3.3 – Mapa de localização dos pontos de campo.	51
Figura 3.4 – Esboço geológico local.	53
Figura 3.5 – Contato tectônico a oeste da cava principal entre metassiltito com intercalação de metarenito e quartzito e detalhe do plano de falha.....	55
Figura 3.6 – Camadas de metassiltito intercaladas com camadas de metarenito fino.....	56
Figura 3.7 – Aspecto geral da brecha metadolomítica..	57
Figura 3.8 – Intercalação entre bandas cinza claro e escuro e dobras apertadas evidenciadas por nível de argila.....	58
Figura 3.9 – Foto e croqui do contato tectônico entre a unidade do metarritmito carbonático (Mrc) com a brecha metadolomítica (Dol)	59
Figura 3.10 – Detalhe do bandamento e foliações no metassiltito homogêneo e aspecto geral da unidade.....	60

Figura 3.11 – Estereograma de dados de acamamento e foliação do domínio norte. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 54 polos.	61
Figura 3.12 – Estereograma de dados de acamamento e foliação do domínio sul. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 147 polos.	62
Figura 3.13 – Zona de cisalhamento presente no lado sul do eixo principal da cava.	63
Figura 3.14 – Detalhe da zona de cisalhamento na bancada 680N.	64
Figura 3.15 – Dobra decamétrica com zona de charneira exposta no topo do talude na bancada 680N.	64
Figura 3.16 – Foto e croqui do empurrão localizado no fim da bancada 680N e foto e croqui do talude global do lado sul da cava principal.	65
Figura 3.17 – Plano de falha na bancada 680N.	66
Figura 3.18 – Falhas nas bancadas 680N e inferiores.	67
Figura 3.19 – Exemplo de falha oblíqua a estrutura geral na mina.	67
Figura 3.20 – Estereograma com 17 medidas de falhas, e 6 medidas de estrias. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior.	68
Figura 3.21 – Dobra aberta suave observada no ponto GC-005.	68
Figura 4.1 – Estruturação da cava.	70
Figura 4.2 – Vista geral para ENE da cava principal da mina Vau Novo.	71
Figura 4.3 – Mapa de localização das Frentes 1 e 2.	72
Figura 4.4 – Localização das linhas de amostragem na Frente 1.	73
Figura 4.5 – Exemplo de ponto de controle marcado no talude.	74
Figura 4.6 – Coleta das coordenadas dos pontos de controle locados no talude da Frente 1. .	74
Figura 4.7 – Posições das fotografias utilizadas na geração do modelo digital da Frente 1....	75
Figura 4.8 – Localização dos pontos de controle na Frente 1. Vista para S.	75
Figura 4.9 – Posições das fotografias utilizadas na geração do modelo digital da Frente 2....	76
Figura 4.10 – Localização dos pontos de controle na Frente 2. Vista para N.	76
Figura 4.11 – Estereogramas com os dados das linhas de amostragem 1c e 2c agrupados por família. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 88 polos.	79
Figura 4.12 – Fluxograma de trabalho para geração de modelo 3D no programa Agisoft Photoscan.	81
Figura 4.13 – Representação de dois grafos e representação de certo e errado na seleção de planos no modelo tridimensional.	83
Figura 4.14 – Estimativa da normal de um plano ajustado a um conjunto de pontos.	84

Figura 4.15 – Exemplo de seleção de pontos para descontinuidades ao longo da linha de amostragem virtual.....	85
Figura 4.16 – Arranjo dos planos de referência no modelo de validação e localização dos pontos de controle.....	86
Figura 4.17 – Detalhe da falha de reconstrução do plano 3 no modelo de validação.	87
Figura 4.18 – Exemplo de foto da Frente 1 antes e depois do processo de masking.	88
Figura 4.19 – Exemplo de malhas triangulares de uma superfície de falha, derivadas da nuvem de pontos esparsa e processadas nas qualidades baixa, média e alta.	90
Figura 4.20 – Exemplo de malhas triangulares de uma superfície de falha, derivadas da nuvem de pontos densa e processadas nas qualidades baixa, média e alta.....	90
Figura 4.21 – Aspecto geral do modelo da Frente 1.....	91
Figura 4.22 – Estereogramas dos dados de planos extraídos do modelo digital da Frente 1 agrupados por família. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 115 polos.	93
Figura 4.23 – Estereogramas dos dados de planos extraídos das linhas de amostragem Scanline 1v e Scanline 2v, agrupados por família. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 43 polos.	95
Figura 4.24 – Estereograma com os polos das famílias de descontinuidades identificadas através da amostragem linear com bússola e da amostragem virtual. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 10 polos.	96
Figura 4.25 – Aspecto geral do modelo da Frente 2.....	98
Figura 4.26 – Estereogramas dos dados de planos extraídos do modelo digital da Frente 2 agrupados por família. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 86 polos.	99
Figura 4.27 – Estereograma dos dados de atitudes médias das famílias identificadas nos dados digitais e de campo das Frentes 1 e 2, agrupados em pequenos círculos de raio 20°. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 21 polos.....	102
Figura A2.3.1 – Posicionamento correto e incorreto da câmera em relação ao talude.	116
Figura A2.3.2 – Passos para a remoção de áreas indesejadas.	117
Figura A2.3.3 – Passos para a inserção de pontos de controle.....	118
Figura A2.3.4 – Passos para seleção dos planos.....	120
Figura A2.3.5 – Opções que devem ser marcadas/desmarcadas no momento da exportação do arquivo .ply no MeshLab.	120

Figura A2.3.6 – Passos para a seleção de traços no MeshLab.....	121
Figura A2.3.7 –Exemplo de carregamento de arquivo de pontos no programa CloudCompare.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros calculados para o conjunto de dados das scanlines 1c e 2c.	77
Tabela 4.2 – Dados das famílias obtidas a partir da análise de projeção estereográfica dos dados das linhas de amostragem 1c e 2c.	78
Tabela 4.3 – Coordenadas dos pontos de controle utilizados no modelo de validação e seus erros associados.	87
Tabela 4.4 – Atitude dos planos medidas com bússola em campo e extraídas do modelo de validação 3D.	88
Tabela 4.5 – Tempo de processamento por etapa para cada equipamento testado.	89
Tabela 4.6 – Coordenadas dos pontos de controle da Frente 1 obtidas com a estação total e erros associados.	91
Tabela 4.7 – Atitude dos planos medidas em campo e extraídas do modelo da Frente 1.	92
Tabela 4.8 – Atitude das famílias identificadas através da projeção estereográfica dos dados extraídos do modelo digital da Frente 1.	93
Tabela 4.9 – Parâmetros calculados para o conjunto de dados das scanlines 1v e 2v.	94
Tabela 4.10 – Atitude das famílias identificadas através da projeção estereográfica dos dados extraídos das linhas de amostragem virtual da Frente 1.	95
Tabela 4.11 – Tabela comparativa dos parâmetros calculados para as famílias similares identificadas pela amostragem virtual e com bússola.	97
Tabela 4.12 – Coordenadas dos pontos utilizados para georreferenciamento da Frente 2.	97
Tabela 4.13 – Atitude dos planos de referência medidas em campo e extraídas do modelo da Frente 2.	98
Tabela 4.14 – Atitude das famílias identificadas através da projeção estereográfica dos dados extraídos do modelo digital da Frente 2.	100

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação ao tema

Toda investigação geotécnica de maciços tem, em seus estágios iniciais, a análise e a caracterização estrutural, com medidas de atitudes das descontinuidades e suas frequências. A habilidade de identificar e medir corretamente estas descontinuidades é, por sua vez, essencial para a caracterização do maciço, auxiliando na avaliação de estabilidade do corte, e no dimensionamento de soluções de estabilidade (ancoragem, atirantamento etc.), evitando acidentes por subdimensionamento ou gastos excessivos por sobredimensionamento.

No caso de cavas de mineração a céu aberto, uma dificuldade encontrada por geólogos e engenheiros de mina é o acesso às bancadas, que muitas vezes tem de ser feito através de equipamentos de rapel ou com a ajuda de máquinas, com o risco de quedas e desmoronamentos associado. Normalmente são utilizadas apenas técnicas clássicas de levantamento de descontinuidades, que demandam muito tempo do profissional, muitas vezes na base de taludes com risco de ruptura, e podendo até mesmo resultar numa análise estatística deficiente ou viesada. Diante deste cenário é de grande interesse o desenvolvimento de técnicas seguras, confiáveis e de baixo custo que forneçam a maior quantidade de informações possível.

A fotogrametria analítica nunca encontrou uma aplicação efetivamente prática na análise de descontinuidades. Com o surgimento da fotografia digital, o aumento crescente do uso deste tipo de imagem e a melhora da capacidade de processamento dos computadores, o número de programas destinados à restituição fotogramétrica aumentou consideravelmente. Dentre os programas mais avançados e de simples manipulação, estão aqueles baseados em *Structure from Motion* (SfM). SfM é uma técnica que permite a reconstrução automática de uma cena tridimensional a partir de um conjunto de fotografias tiradas de diferentes posições, sem a necessidade da determinação de parâmetros externos da câmera *a priori*. Seu princípio permite que usuários sem familiaridade com a técnica possam aplicá-la de maneira satisfatória, e portanto, além de facilitar a utilização e reduzir o tempo gasto, aumenta o número de possíveis aplicações em diversas áreas.

A fotogrametria terrestre digital baseada em SfM, técnica ainda pouco explorada no Brasil, aliada a procedimentos consagrados de mapeamento estrutural, pode se apresentar como uma solução eficiente aos problemas supracitados, fornecendo dados que podem ser aplicados para a geração de modelos estruturais e geomecânicos mais completos e confiáveis. Em diversos países a utilização de fotogrametria terrestre digital para geotecnia é ampla,

envolvendo obras de engenharia como túneis e taludes em rodovias, além da aplicação em mineração a céu aberto e subterrânea. Dentre as vantagens mais significativas encontram-se a possibilidade de amostrar grandes áreas, que não possuem um limite de altura como no caso da amostragem convencional; a amostragem de áreas inacessíveis ou com risco associado; e a criação de um modelo de registro permanente.

1.2. Objetivos e metas

O trabalho teve por meta utilizar e comparar técnicas de fotogrametria terrestre digital através de *Structure from Motion* com os procedimentos clássicos de mapeamento de descontinuidades, de forma a criar modelos digitais rigorosos dos maciços escavados, que fornecessem uma definição detalhada e precisa dos taludes, permitindo a identificação de estruturas geológicas existentes que pudessem, por exemplo, ser utilizadas para uma posterior análise de estabilidade. Para isso, definiram-se quatro objetivos principais:

- ✓ Avaliar o programa utilizado para a restituição fotogramétrica quanto a sua confiabilidade e qualidade dos modelos e dados produzidos;
- ✓ Definir os métodos mais adequados para a extração de atitudes estruturais a partir dos modelos tridimensionais criados;
- ✓ Comparar os dados adquiridos através da amostragem convencional com bússola e os obtidos por meio digital;
- ✓ Discutir as possíveis fontes de erro e apresentar alternativas para desenvolvimento posterior.

1.3. Área de estudo

O projeto teve como área teste a mina a céu aberto de metacalcários do Grupo São Roque de propriedade da mineradora Geocal Mineração Ltda (Mina do Vau Novo), localizada no município de Santana de Parnaíba, região metropolitana de São Paulo (Figura 1.1). A escolha da área levou em consideração seu contexto geológico-geotectônico singular, que fornece condições extremas para a aplicação da técnica de fotogrametria, além da facilidade de acesso e a proximidade.

Figura 1.1 – Mapa de localização e acessos da área de estudo.

1.4. Materiais e métodos

Os trabalhos tiveram início com a compilação de dados em contexto regional, utilizando-se de mapas, imagens de satélite etc., além de dados disponíveis na literatura especializada. Na etapa seguinte realizou-se o reconhecimento geológico-estrutural da lavra. Nesta fase foram mapeados os litotipos, efetuando-se descrições de mineralogia e estruturas observadas ao longo das bancadas. Este levantamento serviu de subsídio para a escolha das frentes que melhor se adequavam aos objetivos propostos, nas quais se desenvolveram os estudos de levantamento de descontinuidades.

Nas frentes escolhidas (Frente 1 e Frente 2), a amostragem das descontinuidades foi conduzida de duas maneiras:

- ✓ Amostragem com bússola de diferentes planos de boa exposição no talude (planos de referência), e a amostragem virtual dos mesmos planos nas Frentes 1 e 2;
- ✓ Amostragem de duas linhas de varredura tradicionais, feitas em campo com uso de bússola e trena (Scanline 1c e Scanline 2c), e a amostragem virtual de suas linhas equivalentes (Scanline 1v e Scanline 2v) na Frente 1.

Para a amostragem de descontinuidades em campo utilizou-se uma bússola geológica de estrato COCLA e uma trena com 20 m de comprimento. Além disso, o registro dos planos de referência foi feito em fotografias com o uso de um Sony Xperia Tablet Z. A descrição das

descontinuidades baseou-se na classificação proposta pela *International Society of Rock Mechanics* (ISRM 1978). Todas as medidas apresentadas para estruturas planares encontram-se em notação do tipo Clar (*dipdir/dip*), e para estruturas lineares em *trend/plunge*.

A restituição fotogramétrica, feita por meio de técnicas de *Structure From Motion*, foi realizada com licença educacional da versão profissional do programa *Agisoft Photoscan*. As fotografias que serviram de base para a geração dos modelos 3D foram obtidas com o uso de uma câmera fotográfica digital Nikon D200 *single-lens* reflex com objetiva Nikkor 28mm f/2.8D AF. Para a obtenção de coordenadas de pontos de controle que serviram para posterior georreferenciamento, foi utilizada uma estação total modelo TOPCON GPT-3200N para a Frente 1, um GPS portátil Garmin eTrex 10 para a Frente 2, e uma bússola COCLA e trena para o modelo de validação.

A partir dos modelos tridimensionais gerados, deu-se o desenvolvimento de rotinas computacionais para a extração dos dados estruturais de planos de descontinuidade com superfície visível no modelo, e através de uma linha de amostragem virtual. O procedimento detalhado para obtenção e processamento dos dados dos modelos digitais por meio das rotinas desenvolvidas é apresentado no Anexo 1, e mais informações acerca do método proposto nos anexos 2 e 3. O fluxograma da Figura 1.2 apresenta a ordem das etapas necessárias para a seleção e extração dos planos de descontinuidade.

Para a seleção das descontinuidades nos modelos produzidos, utilizou-se o programa *MeshLab*, gratuito e de código aberto, destinado ao processamento e a edição de malhas triangulares não estruturadas.

Rotinas para extração de atitudes e cálculo de desvio angular entre as medidas foram escritas em linguagem *Python* com auxílio da biblioteca *NumPy* e do pacote *NetworkX*. A posterior identificação dos planos utilizados foi feita no programa *CloudCompare*, também gratuito e de código aberto, destinado a processamento de nuvens de pontos e malhas triangulares.

A diferença da atitude resultante da amostragem convencional e da virtual foi avaliada por meio do cálculo do desvio angular entre os polos dos planos medidos através das duas técnicas. Os dados produzidos pelos diferentes meios foram lançados em projeção estereográfica com o uso do programa *Dips 6.0* e separados em famílias.

Todo o processamento foi feito em um notebook Asus modelo G750JX-T4112H com Processador Intel i7 3,4 GHz, 32GB RAM, placa de vídeo NVIDIA Geforce GTX 770M e sistema operacional Windows 8.1.

Figura 1.2 – Fluxograma da sequência de passos necessários para a seleção e extração de atitudes dos planos de descontinuidade no modelo tridimensional.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho foram utilizados, para descrever todas as quebras do maciço rochoso, os termos sugeridos pela ISRM (1978), traduzidos pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE 1983) como seguem:

- ✓ *Descontinuidade*: é o termo geral para qualquer descontinuidade mecânica do maciço rochoso e que tenha nenhuma ou baixa resistência à tração. É o termo coletivo para a maioria dos tipos de juntas, planos de acamamento mais fracos, planos de xistosidade mais fracos, zonas de fraqueza e falhas.
- ✓ *Junta*: uma quebra de origem geológica na continuidade de um corpo de rocha ao longo da qual não houve nenhum deslocamento visível. Um grupo de juntas paralelas é chamado de família, e grupos de famílias que se intersectam são chamados de sistema de juntas.
- ✓ *Falha*: uma fratura ou zona fraturada ao longo da qual houve um deslocamento reconhecível, desde alguns centímetros até alguns quilômetros. As paredes são normalmente estriadas e polidas (espelho de falha), resultado dos deslocamentos cisalhantes. Frequentemente a rocha em ambos os lados de uma falha apresenta-se esmigalhada, alterada ou intemperizada, resultando em preenchimentos. A espessura de uma falha pode variar, de alguns milímetros até centenas de metros.

2.1. Geologia regional

A mina estudada encontra-se em rochas pertencentes ao Grupo São Roque, de idade proterozoica, como mostra a Figura 2.1. O Domínio São Roque pertence ao Cinturão Ribeira, ao norte da Falha de Taxaquara, e abrange sequências de rochas metavulcanossedimentares geradas em diferentes ambientes tectônicos e possivelmente de idades distintas (Henrique-Pinto *et al.* 2015). O significado tectônico do Cinturão Ribeira na evolução do sudeste brasileiro ainda é controverso e possui muitas questões a ser estudadas. A seguir é apresentado um panorama acerca das discussões sobre a região.

Figura 2.1 – Mapa geológico regional: 1 - Rochas sedimentares fanerozoicas e rochas intrusivas mesozoicas associadas (Bacia do Paraná); 2 - Granitos tardi a pós-orogênicos neoproterozoicos; 3 - (granada)-(muscovita)-biotita granitos; 4 - Biotita granitos porfiríticos; 5 - (hornblenda)-biotita granitos porfiríticos; 6 - Domínio Socorro-Guaxupé (predominância de migmatitos com granada); 7 - Domínio Embu: embasamento gnáissico paleoproterozoico; 8 - Domínio Embu: cobertura metasupracrustal; 9 - Domínio São Roque-Apiaí: grupos São Roque e Açungui; 10 - Grupo Serra do Itaberaba; 11 - Complexo Costeiro. Extraído de Henrique-Pinto et al. (2015).

2.1.1. Contexto histórico

Em 1925, Euzébio Paulo de Oliveira introduz a Série São Roque ao descrever na literatura os metacalcários de São Paulo, porém o termo “camadas de São Roque”, já havia sido consagrado como unidade litoestratigráfica por Gonzaga de Campos (1889) com o objetivo de diferenciá-las do cristalino aflorante no estado (Henrique-Pinto 2008). Em alusão ao termo, Moraes Rêgo (1930) faz a primeira referência a “Série de São Roque”. Derby (1878) faz uso do termo “Série Assunguy”, se referindo à faixa de rochas epimetamórficas da Bacia do Paraná, em continuidade com a faixa paranaense, levando alguns autores a fazerem uso do termo “Série São Roque-Assunguy”, enquanto a maioria ainda utilizava o termo “Série São Roque” para se referir à faixa de rochas a norte e oeste da cidade de São Paulo (Bergmann 1988).

Nas décadas seguintes, diversos estudos específicos mineralógicos e petrológicos descritivos, recursos minerais e metamorfismo foram realizados na região do Pico do Jaraguá (Coutinho 1955, Cordani *et al.* 1961, Gomes 1962) e de Mairiporã (Ellert 1964). Além destes,

são feitos detalhamentos da unidade nas folhas Jundiá e Itu, em escala 1:100 000, ambas publicadas pelo Instituto Geográfico e Geológico do Estado de São Paulo (IGG 1954, 1964).

O uso da categoria de “Grupo” para as rochas de São Roque foi iniciado em 1963 com a publicação do Mapa Geológico do Estado de São Paulo pelo IGG, passando a ser utilizado em trabalhos posteriores o termo “Grupo São Roque”. A ideia de uma descontinuidade física entre os metassedimentos São Roque e Açungui foi introduzida por Hennies *et al.* (1967) com o mapeamento das falhas transcorrentes de Taxaquara e Pirapora. Dois anos depois, Hasui *et al.* (1969) apresentam uma síntese do Grupo São Roque, admitindo que as rochas metassedimentares estariam incluídas no chamado bloco São Roque, posicionado entre as falhas de Taxaquara e Jundiuvira. O predomínio do termo “Grupo Açungui” sobre o termo “Grupo São Roque” persistiu durante alguns anos, sendo adotado por autores como Coutinho (1972), Cordani e Kawashita (1971) e Hasui (1973).

Hasui *et al.* (1975), ao descrever uma macrozona de movimentação aparentemente destrai localizada entre os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, propõem o nome Zona de Transcorrência São Paulo. Nesta zona são descritas diversas falhas e estruturas com direções NE-SW/ENE-WSW, e sugere-se que a transcorrência inicia-se após o metamorfismo regional e segue até o fim do Ciclo Brasileiro. Ainda neste trabalho, os autores sugerem que o Grupo São Roque ocorreria de forma restrita a esta zona de transcorrência, sendo assim parte de outro sistema de dobramentos, paralelo ao Sistema Apiaí, porém não simplesmente uma continuidade do Grupo Açungui.

2.1.2. Posicionamento tectônico e deformação

O Domínio São Roque é um bloco tectônico que se encontra inserido na Província Estrutural Mantiqueira (Almeida *et al.* 1981), pertencendo à Faixa de Dobramentos Ribeira (Almeida *et al.*, 1973, Hasui *et al.*, 1975). A norte são encontradas rochas de alto grau metamórfico da Nappe Socorro-Guaxupé, interpretada atualmente como parte da Faixa de Dobramentos Brasília, e a sul o Domínio Embu, relacionado com a Faixa de Dobramentos Ribeira (Henrique-Pinto 2012). O modelo proposto por Campos Neto (2000) apresenta o Grupo São Roque como parte de um bloco composto por sequências metavulcanossedimentares com metamorfismo de baixo a médio grau (Domínio Apiaí-São Roque), e este bloco juntamente com o Domínio Socorro-Guaxupé corresponde a um arco magmático desenvolvido nas margens de um antigo núcleo cratônico.

A Falha de Taxaquara é descrita por Hennies *et al.* (1967) como um importante limite entre os blocos Cotia a sul - separado por Hasui (1975) nos complexos Pilar e Embu - e São Roque a norte, com movimentação transcorrente destral e rejeito superior a 100 km. Campos Neto (2000) propõe que a Falha de Caucaia divide o Bloco Cotia em duas porções, e pode corresponder a uma estrutura de maior relevância, separando a Faixa de Dobramentos Ribeira a sul e a borda retrabalhada do Cráton Paranapanema a norte.

Com relação à deformação das rochas da região, Bistrichi (1982) posiciona a mina Vau Novo entre o núcleo e a parte interna do flanco sul do Sinclinório de Pirapora, uma estrutura com traço axial N60-70E e caimento para E-NE. Segundo Bergmann (1988), as rochas encontradas na região do Sinclinório de Pirapora são afetadas por dobras anticlinais recumbentes, que controlam a geometria dos contatos entre as unidades e gerando sua repetição aparente. Além disso, a posição dos estratos, em relação às macrodobras, modifica a qualidade da foliação S_2 , sua relação com o acamamento e a foliação S_1 , além da preservação de estruturas sedimentares. Sendo assim, segundo a autora, este arranjo estrutural é base fundamental para uma proposta litoestratigráfica.

A primeira sequência deformacional, proposta por Bistrichi (1982), reconhece três fases de deformação: F1 caracterizada por dobras fechadas a cerradas, desenhadas pelo acamamento reliquiar com clivagem plano-axial; F2 (principal) com dobras de diversas escalas e estilos, com eixos sub-horizontais e planos axiais orientados segundo direções que variam de N60E a E-W, que seria relacionada ao sinclinório; e uma F3 local, superposta ao dobramento da F2, com eixos sub-horizontais e dobras abertas. A segunda hipótese é apresentada por Bergmann (1988), que propõe cinco fases de dobramentos superimpostas, sendo três delas *sin a tardi* metamórficas e duas pós metamórficas: a primeira seria identificada pela clivagem ardosiária paralela ao acamamento dos metapelitos; a segunda consiste em uma articulação de dobras anticlinais recumbentes, com vergência NW, onde a posição dos estratos em relação a estrutura maior modifica a qualidade da foliação S_2 ; uma terceira fase tardia ao metamorfismo, com eixos caindo para NE e W, desenvolvendo clivagem plano-axial espaçada; e duas fases pós metamórficas, sendo uma responsável pelo Sinclinório de Pirapora, com eixo caindo entre N60-70E, e outra com eixo NS-NNW.

2.1.3. Litoestratigrafia

A primeira proposta estratigráfica apresentada para o sudeste brasileiro é feita por Derby (1878). Moraes Rego (1933) realiza a primeira proposta de paleoambiente para os metassedimentos encontrados no sudeste, sugerindo uma origem marinha, que mais tarde é compartilhada por Almeida (1944) ao descrever quartzitos com estratificações preservadas na região de Itapeva. Almeida (1957) propõe a estratigrafia da Formação Itaiacoca, composta por quartzitos intercalados com filitos na base e mármore calcíticos e dolomíticos no topo, e sugere que os metassedimentos da Série São Roque encontram-se em discordância erosiva com os gnaisses, xistos e quartzitos da Serra do Mar. Esta proposta recebe o apoio de Coutinho (1955) que descreve a presença de seixos de quartzitos nos metaconglomerados basais, indicativos de sedimentação em ambiente marinho profundo, e também de Cordani *et al.* (1961).

A primeira subdivisão do Grupo São Roque em formações é apresentada por Hasui *et al.* (1976). Coutinho *et al.* (1982) descrevem uma sequência vulcanossedimentar na região de Serra do Itaberaba, composta por rochas vulcânicas a subvulcânicas básicas e seus tufos, camadas argilosas, margas e intercalações com sedimentos químicos silicosos, que teria sua deposição iniciada possivelmente por erupções submarinas. Esta sequência é descrita no ano seguinte por Campos Neto *et al.* (1983) como sendo a base do Grupo São Roque, composta, da base para o topo, por anfíbolitos finos e bandados, seguidos por metarritmitos, metarcóseos rítmicos e filitos com intercalações quartzíticas no topo. Esta sequência é individualizada sob a denominação de Grupo Serra do Itaberaba por Juliani *et al.* (1986), recebendo a nomenclatura, da base para o topo, de Formação Morro da Pedra Preta, Formação Nhanguçu e Formação Pirucaia, além da descrição de corpos graníticos pós tectônicos.

Para a área de estudo, Bergmann (1988) propõe o empilhamento constituído, da base para o topo, pela Formação Pirapora do Bom Jesus, composta de um pacote metavulcânico na base e metacalcários e metadolomitos no topo; Formação Estrada dos Romeiros, constituída de metarritmitos, metarenitos e camadas conglomeráticas com restritas intercalações de filitos e metamáficas; e a Formação Boturuna, composta por quartzitos, metarenitos e metassiltitos. Já em seu trabalho de 1991, a autora usa as nomenclaturas Unidade Vulcanossedimentar Basal, Unidade Clástica Turbidítica Superior e Unidade Clástica Alóctone para designar as formações anteriormente citadas.

Dados litoestratigráficos e geocronológicos recentes, contradizem a estratigrafia original do agrupamento das sequências no Grupo São Roque, e sugerem a presença de três

principais sequências metavulcanossedimentares no Domínio São Roque: uma estereotípica inferior de rift (Formação Boturuna); uma vulcanossedimentar calimiana intermediária, com magmatismo do tipo MORB interpretado como retro arco ou margem passiva (Grupo Serra do Itaberaba e possivelmente a Formação Pirapora do Bom Jesus); e uma superior de turbiditos plataformais (Formação Piragibu) (Henrique-Pinto *et al.* 2015)

2.2. Amostragem e tratamento de dados estruturais

A atitude de estruturas planas é talvez o dado estrutural mais comum em geologia. No caso de projetos de engenharia, poucas são as situações onde o espaçamento das estruturas supera as dimensões do projeto e, portanto, a descrição das estruturas de forma tridimensional é primordial. Porém, muitas vezes, as fontes de dados limitam-se a furos de sondagem e frentes escavadas, permitindo a coleta de informações de forma uni ou bidimensional, no caso de mais de uma orientação de corte. Sendo assim, é necessário que haja extrapolação das propriedades tridimensionais obtidas nas amostragens uni e bidimensionais (Hudson e Harrison 1997). Dentre estas propriedades estão a média do espaçamento entre as descontinuidades e seus índices associados: frequência e *Rock Quality Designation* teórico (RQD*), persistência, irregularidade e rugosidade da superfície, abertura e preenchimento.

Segundo a ISRM (1978), existem duas maneiras principais de amostragem de dados: a primeira, descrita como subjetiva (viesada), consiste na descrição apenas das descontinuidades que parecem ter importância para o projeto, dependendo, assim, do julgamento do profissional responsável; a segunda, definida como objetiva (aleatória), consiste na descrição de todas as descontinuidades que interceptarem uma determinada linha ou área. Apesar do primeiro método ser mais rápido, em casos onde não é possível identificar claramente os domínios estruturais, a segunda alternativa é a mais recomendada.

Uma técnica de amostragem com ampla utilização no estudo de compartimentação de maciços rochosos é chamada de *scanline*, também conhecida como *detail-line*, linha de varredura ou, ainda, amostragem linear. Este é um método sistemático no qual é colocada uma fita graduada paralela a face exposta do maciço, onde são medidas as atitudes de todas as descontinuidades que a intersectam, além da descrição de suas características. Outro método, conhecido como amostragem por área ou amostragem em janela, envolve a coleta de todos os dados estruturais acima de um determinado tamanho em uma área delimitada, que pode ser quadrada ou circular. Em uma mina a céu aberto, normalmente um número de janelas é posicionado nas unidades mapeáveis reconhecidas ao longo das bancadas em intervalos

regulares, sendo este espaçamento decidido em campo. Estruturas maiores que ocorram entre as janelas devem ser mapeadas individualmente (Read e Stacey 2009).

O método de amostragem linear possui vantagens em relação aos de área por ser mais rápido, e precisar de pouco ou nenhum julgamento na coleta dos dados. A linha de varredura normal é horizontal, e isso pode trazer um problema se as discontinuidades não intersectarem a linha horizontal, como planos horizontais ou com direções paralelas ao talude. Uma maneira de contornar este problema é posicionar linhas verticais ou perpendiculares a direção do talude (Nicholas e Sims 2001). Os dados levantados são, então, lançados em projeção estereográfica e têm suas frequências corrigidas de acordo com a orientação da linha de amostragem.

Os valores de espaçamento e frequência são obtidos segundo Priest e Hudson (1981). Para uma linha de amostragem de comprimento L , intersectada por N discontinuidades, o espaçamento médio x das estruturas é dado por:

$$x = L/N$$

e a frequência (λ) expressa segundo:

$$\lambda = \frac{N}{L} = 1/x$$

Ainda de acordo com os autores, a média dos espaçamentos medidos ($\bar{x}$) é dada segundo:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

onde x_i é o i ésimo valor de espaçamento medido, e n o número de espaçamento encontrado. Para uma distribuição normal de fraturas ao longo da linha de amostragem, os valores de x e $\bar{x}$ devem ser próximos.

Como exemplificado na Figura 2.2, o espaçamento medido pela linha de amostragem é dependente de sua direção e, portanto, o espaçamento real pode ser calculado segundo:

$$S = d_m \sin \alpha$$

onde d_m é a distância média medida ao longo de uma linha de amostragem e α é o ângulo entre a linha de amostragem e família amostrada.

Figura 2.2 – Exemplo do cálculo de espaçamento real de descontinuidades. Traduzido de ISRM (1978).

O RQD (Deere *et al.* 1967) foi desenvolvido como um índice de qualidade da rocha para aplicação em projetos de design e construção, e foi introduzido mais tarde nos sistemas classificadores de maciço de Bieniawski (1973) e Barton *et al.* (1974). Consiste numa modificação da porcentagem de recuperação de sondagem, sendo definido como a porcentagem de um furo de sondagem que corresponde a somatória dos comprimentos dos fragmentos intactos do testemunho maiores ou iguais a 100 mm (Deere e Deere 1989). Matematicamente é expresso por:

$$RQD = 100 \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L} \%$$

onde x_i são os comprimentos dos fragmentos maiores ou iguais a 100 mm e n é o número destes fragmentos em uma sondagem de comprimento L . Por meio dos valores obtidos é possível então classificar a rocha em qualidade muito ruim (< 25%), ruim (25 – 50%), razoável (50 – 75%), boa (75 – 90%) e muito boa (> 90%).

Analogamente, pode ser definido um valor de RQD “teórico” (RQD*) para uma linha de amostragem, utilizando os valores de espaçamento obtidos na amostragem no lugar do comprimento de fragmentos. Deere e Deere (1989) ressaltam que uma correlação direta ou completamente apropriada entre a frequência obtida através de uma linha de amostragem e o

RQD não é possível, uma vez que o RQD é uma medida muito mais geral do maciço. Esta correlação é descrita por inúmeros autores, sendo que a apresentada por Priest e Hudson (1976) é considerada a mais adequada por Deere e Deere (1989). O cálculo do então denominado RQD “teórico” segue a seguinte expressão:

$$RQD^* = 100(0,1\lambda + 1)e^{-0,1\lambda}$$

Esta fórmula se aplica a valores de espaçamento com distribuição exponencial negativa e para um valor de corte de 100 mm, como na proposta inicial de Deere e seus colaboradores. Porém estes autores observaram ainda que o RQD* apresenta uma falta de sensibilidade para valores altos de espaçamento e, portanto, introduzem uma variável de corte t para que o cálculo possa ser feito para valores diferentes de 100mm, seguindo a equação:

$$RQD^* = 100(\lambda t + 1)e^{-t\lambda}$$

A persistência é definida pela ISRM (1978) como a extensão ou tamanho exposto do plano de descontinuidade e pode ser grosseiramente identificada pela observação do comprimento de seu traço ao longo do plano de exposição. Apesar de ser um dos parâmetros mais importantes para a caracterização do maciço, sua quantificação é muito difícil.

A irregularidade e rugosidade da superfície de uma descontinuidade têm influência direta na estabilidade de taludes, já que interferem na resistência ao cisalhamento dos planos, especialmente nos casos de juntas não preenchidas. Quanto menor for a abertura dos planos de descontinuidade, maior será sua influência. Segundo a ISRM (1978), a rugosidade pode ser dividida em primeira ordem - relacionadas aos fenômenos de dilatação durante o cisalhamento e que influenciam a direção inicial do deslocamento (ondulação) - e de segunda ordem, rompidas durante o processo de cisalhamento e que influenciam diretamente a resistência ao cisalhamento obtida em laboratório (“aspereza”). Na determinação da rugosidade das fraturas, o método mais utilizado na caracterização de descontinuidades é o descrito por Barton (1973), no qual um número que representa o coeficiente de rugosidade de junta (JRC) pode ser estimado a partir de testes de inclinação (*tilt test*) ou por comparação visual com um conjunto padrão de perfis de rugosidade, sendo que o de maior utilidade é apresentado no trabalho de Barton e Choubey (1977) (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Conjunto de perfis de referência para determinação do JRC. Extraído de Barton e Choubey (1977).

Por fim, a abertura e preenchimento de uma descontinuidade representam, respectivamente, a distância que separa as paredes de rocha de uma descontinuidade aberta onde o espaço é preenchido por água ou ar, e a designação do material que separa as paredes de uma descontinuidade, por exemplo calcita, argila etc. Neste caso, a distância entre as paredes da descontinuidade é descrita como espessura ao invés de abertura. Esta descrição é importante, pois a presença de materiais de preenchimento leva a uma variedade de comportamentos físicos, principalmente quando são considerados deformabilidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento

2.3. Dados direcionais

Atitudes de planos em geologia são, na maioria das vezes, representadas pelos seus polos. Estes, por sua vez, são dados direcionais, e podem ser representados como vetores unitários, em duas ou três dimensões. O tratamento deste tipo de dado por meio de vetores facilita sua manipulação em ambiente computacional, já que sua representação pode ser feita através de matrizes. Segundo Priest (1993), qualquer linha ou vetor u pode ser representada por suas coordenadas cartesianas u_x, u_y, u_z . A magnitude ou comprimento deste vetor é dada por:

$$|u| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$$

Se $|u| = 1.0$ o vetor é referido como unitário, e então u_x, u_y, u_z são seus cossenos diretores. Para a conversão da atitude geológica de um plano em cossenos diretores, utiliza-se a sua normal como representação vetorial. Por exemplo, pode-se adotar os eixos x, y e z referindo-se, respectivamente, ao Leste, Norte e vertical para cima (Figura 2.4). Sendo assim, é válida a seguinte fórmula:

$$u = \begin{bmatrix} \text{sen}(dipdir) \text{sen}(dip) \\ \cos(dipdir) \text{sen}(dip) \\ \cos(dip) \end{bmatrix}$$

Figura 2.4 – Representação da decomposição da normal de um plano em seus cossenos diretores, onde $\alpha = dipdir$ e $\beta = dip$.

onde u é um vetor unitário, paralelo ao polo do plano, representado por uma matriz coluna. A conversão de volta a atitude geológica se dá calculando-se o arcocosseno do componente vertical, o arcotangente da razão entre os componentes x e y e comparando-se os sinais para a determinação do quadrante do rumo do mergulho.

Da mesma maneira, é possível obter a orientação de um plano que se ajuste a três pontos quaisquer. Considerando os pontos a, b e c , não colineares, no espaço, o produto vetorial das

diferenças $b - a$ e $c - a$ tem como resultante um vetor perpendicular d , que deve ser normalizado segundo $d/|d|$. A atitude resultante é expressa segundo

$$\begin{aligned} dip &= \text{acos}(d_z) \\ dip_{dir} &= \text{atan2}(d_x, d_y) \end{aligned}$$

A função atan2 é utilizada para determinar o arcotangente com dois argumentos. Sua finalidade é a de obter os sinais dos dados de entrada para retornar o quadrante do ângulo computado. Como não existe nenhum marcador que determine se o plano está orientado para baixo ou para cima, é preciso verificar se d_z possui valor positivo ou negativo. Em caso de valor negativo, é preciso transformá-lo em positivo e multiplicar os argumentos x e y por -1 .

Ainda tratando dados de atitudes de planos como vetores unitários, podem ser efetuadas operações entre os vetores para, por exemplo, calcular o ângulo (θ) entre os polos dos planos, que consiste no desvio angular entre eles. O cálculo é feito através do produto escalar dos vetores, segundo a equação:

$$u \cdot v = u_x v_x + u_y v_y + u_z v_z = \cos \theta$$

Pode-se também calcular o produto vetorial entre dois vetores, que resulta em um terceiro vetor, perpendicular aos originais e com magnitude igual ao produto entre o seno do ângulo entre os dois vetores e suas magnitudes. Para o caso de polos de planos, esta operação resulta na linha de intersecção entre os planos.

O tratamento estatístico deste tipo de dado pode ser feito de algumas maneiras. Fisher (1953) apresenta a “distribuição de Fisher” para modelagem de vetores tridimensionais em uma esfera, que descreve a distribuição angular de orientações ao redor de um vetor de orientação média. A constante K de Fisher representa a dispersão ou agrupamento dos dados ao redor deste vetor de orientação média. Seu valor para conjuntos de dados maiores que 30 pode ser expresso por:

$$K \cong \frac{N - 1}{N - R}$$

onde N é o número de dados e R a magnitude do vetor resultante. Valores baixos de K implicam em maior dispersão dos dados ao redor do vetor médio, e valores altos em maior concentração dos dados.

Outra propriedade importante no tratamento de dados estruturais é a extração de autovalores e autovetores de uma matriz. O autovetor u de uma matriz A é aquele vetor que, quando multiplicado por ela, não altera sua direção, podendo ter apenas seu comprimento modificado. O autovalor λ é então o fator multiplicativo aplicado pela matriz ao vetor

$$Au = \lambda u$$

Considerando uma matriz X composta pelas coordenadas dos vetores de um conjunto de dados, é possível obter sua matriz de covariância S , que consiste na variância das coordenadas ao longo da diagonal principal e na covariância entre cada par de variáveis nas demais posições da matriz. De maneira simplificada tem-se:

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})'$$

Os autovalores e autovetores extraídos desta matriz S descrevem a forma da distribuição espacial destes dados: os autovetores representam os eixos do elipsoide de melhor ajuste ao conjunto, e os autovalores seus comprimentos relativos. Sendo $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ os autovalores, são esperadas três formas extremas: esférica para $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$; oblata ou planar para $\lambda_1 = \lambda_2 \gg \lambda_3$; prolata ou linear para $\lambda_1 \gg \lambda_2 = \lambda_3$. Numericamente, estas formas são descritas por Vollmer (1990) através de quatro razões:

$$P = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)}{N} \quad G = \frac{2(\lambda_2 - \lambda_3)}{N} \quad R = \frac{3(\lambda_3)}{N} \quad C = \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_3}\right)$$

que representam, respectivamente, a proximidade do conjunto de dados à distribuição pontual (P), em guirlanda (G) ou aleatória (R), além do parâmetro C de cilindridade. Estes valores são então plotados em um diagrama triangular (Figura 2.5). No caso de planos de descontinuidade, a distribuição esperada dos dados é pontual.

Figura 2.5 – Diagrama triangular para classificação de forma. Traduzido de Vollmer (1990).

2.4. Fotogrametria

O uso da fotogrametria para fins de geotecnia data do início dos anos de 1960. Porém, a técnica não teve uma aplicação muito disseminada, já que o processo para a obtenção dos dados era complicado e tedioso, limitando a sua aplicação. Com o desenvolvimento de computadores mais potentes e, conseqüentemente, programas mais avançados, a criação de modelos digitais tridimensionais por meio de fotografias digitais tornou-se mais simples e acessível. Com processos mais automatizados, a fotogrametria voltou a ser explorada para fins geotécnicos (Deb *et al.* 2008, Sturzenegger e Stead 2009a, Sturzenegger e Stead 2009b, Fernandes 2010, Sturzenegger *et al.* 2011, Assali *et al.* 2014) e geológicos-estruturais (Javernick *et al.* 2014, Tavani *et al.* 2014, Vasuki *et al.* 2014), além das aplicações que encontrou em diversas áreas, como arqueologia, arquitetura e construção civil.

Atualmente, uma grande quantidade de publicações acerca do tema está disponível, e novas aplicações e investigações são divulgadas constantemente em periódicos.

2.4.1. Histórico

A palavra fotogrametria deriva das palavras gregas *fotos*, que significa luz, *gramma*, que denota “o que é desenhado ou escrito” e *metron*, que significa medir (Whitmore e Thompson 1966).

Pode-se dizer que a fotogrametria iniciou antes mesmo do desenvolvimento da fotografia. Leonardo da Vinci, em 1429, já utilizava princípios geométricos sobre desenhos feitos à mão. Em 1826 o oficial francês Joseph Niépce conseguiu imprimir a primeira imagem, do quintal de sua casa. A partir daí, começou a evolução da fotografia. Doze anos depois o físico inglês Charles Wheatstone é o primeiro a descrever o fenômeno da estereoscopia, colocando em seu trabalho um desenho do primeiro estereoscópio de espelhos projetado por ele. A partir daí desenvolvem-se novos equipamentos topográficos, e em 1846 Carl Zeiss funda sua oficina de precisão, que inicia fazendo equipamentos para universidade e mais tarde se torna um importante fabricante de equipamentos topográficos e fotogramétricos (CPT 2008).

De modo a encerrar o primeiro ciclo, o oficial engenheiro francês Aimé Laussedat dá o primeiro passo qualitativo e quantitativo, utilizando fotografias para gerar mapas. Mais tarde ele apresentaria o primeiro fototeodolito. Este acontecimento foi seguido do uso militar das fotografias e do estudo aprofundado de seu uso em levantamentos topográficos (CPT 2008).

Em 1901 o alemão Carl Pulfrich constrói o estereocomparador, permitindo o traçado preciso da planimetria e altimetria. Sobre estas bases é formada a *International Society for Photogrammetry*, atualmente *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Nesta época surge o avião, e em 1909 os irmãos Wright tiram as primeiras fotos a partir de um avião, dando início a fotogrametria aérea de aplicação mais ampla. Com o advento dos computadores, começaram a se desenvolver modelos para processamento dos dados e, no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), os modelos numéricos de terreno mais complexos. No início da década de 1970 surgiram os primeiros satélites orbitais de imageamento, sendo o principal a série LANDSAT, e dez anos mais tarde a fotogrametria analítica começa a tomar espaço no mercado cartográfico e órgãos de pesquisa (Loch e Lapolli 1998).

A fotogrametria digital surgiu no fim dos anos de 1980, tendo como grande inovação a utilização de imagens digitais como fonte primária de dados. Nos anos de 1990, o surgimento dos *scanners* e das câmeras digitais permitiu que o processamento e aquisição dos dados fossem feitos de maneira mais simples, utilizando modelos mais complexos ainda e rotinas de automação de dados fotogramétricos, reduzindo o tempo de processamento (Coelho e Brito 2007).

2.4.2. Fotogrametria Digital

Fotogrametria, de maneira geral, pode ser entendida como a ciência e tecnologia de se obter informação confiável por meio de imagens adquiridas por sensores (Coelho e Brito 2007). Ela tem por objetivo principal reconstruir um espaço tridimensional através de um conjunto de imagens bidimensionais, sendo que a criação deste espaço é possível graças ao fenômeno de estereoscopia (Figura 2.6), que permite a visão tridimensional (visão estéreo) quando as imagens possuem uma sobreposição de pelo menos 60% lateralmente e 30% longitudinalmente (Coelho e Brito 2007).

Figura 2.6 – Esquema de um estereopar, que possibilita a visão estereoscópica.

Inicialmente, a fotogrametria era feita através de fotografias tiradas com câmeras de filme, onde o mesmo objeto era fotografado de ângulos diferentes, formando o chamado par estereoscópico. Dentre os métodos de aquisição de dados estão os aerotransportados, mais conhecidos no Brasil e utilizados principalmente para mapeamento e topografia, e os de curto alcance (*close range photogrammetry*) objeto de estudo do presente trabalho.

Em uma imagem bidimensional, cada ponto pode ser representado por suas posições em dois eixos. Aplicando trigonometria no mesmo ponto em duas fotografias tiradas em paralaxe, é possível obter a posição deste ponto no espaço. Na análise de discontinuidades, essa propriedade pode ser utilizada para determinar comprimentos relativos e ângulos aparentes do traço das estruturas. A reconstituição de pontos a partir de fotografias de câmeras de filme é lenta, e nunca encontrou aplicação na caracterização de maciços, apesar de ter sido descrita em trabalhos como os de Linkwitz (1963), Rengers (1967), Vieten (1970), Ross-Brown *et al.* (1973), Hagan (1980), Rorke e Brummer (1985), Franklin *et al.* (1988) e Crosta (1997).

A utilização de dados primários de fontes digitais surgiu nos anos de 1980 e vem sendo aperfeiçoada desde então. Atualmente a reconstituição dos espaços em três dimensões é feita de maneira automática, através de processamento computacional mais ou menos elaborado. A fotogrametria digital segue os mesmos princípios da fotogrametria tradicional, com adição das peculiaridades do meio digital, possibilitando que a técnica obtenha larga aplicação na geologia de engenharia, pois permite a aquisição combinada da imagem e dos dados geométricos do meio (Pötsch 2011).

A aplicação da fotogrametria na aquisição de dados geológicos e geotécnicos utiliza de requisitos diferentes daqueles necessários às aplicações tradicionais. Essa diferença se deve a natureza dos dados coletados. No caso tradicional, o objetivo é a obtenção de um ponto no espaço com uma determinada precisão, já nas aplicações em geologia e geotecnia, o foco é a identificação e levantamento de estruturas relevantes do maciço e sua relação espacial com as faces livres, sendo assim, neste caso não se sabe exatamente onde está a estrutura de interesse durante a coleta, o que configura a principal diferença entre as duas aplicações (Pötsch 2011).

2.4.3. *Structure From Motion* (SfM)

Structure from Motion (SfM) é uma técnica de imageamento de intervalo (*range imaging*) estudada nos campos da visão de máquina e percepção visual, e refere-se ao processo de obtenção de uma cena tridimensional a partir de uma série de imagens em duas dimensões adquiridas por um sensor em movimento. Seu processo é similar ao da visão estéreo de modo que nos dois casos a correspondência entre as imagens e a reconstrução do objeto 3D precisa ser encontrada. No caso de SfM, para encontrar a correspondência entre as imagens, características como pontos de canto (bordas com gradientes em múltiplas direções) precisam ser rastreadas de uma imagem para a outra. As trajetórias destas características entre as imagens são utilizadas para reconstruir sua posição no espaço tridimensional e o movimento da câmera, ou seja, suas posições relativas (Dellaert *et al.* 2000). Para isso, podem ser utilizadas imagens de uma única câmera em movimento (*frames* extraídos de um vídeo ou fotos tiradas de diversos pontos) ou de várias câmeras em posições distintas.

Porém, o problema tratado em SfM é mais complexo que o dado pela visão estéreo, pois a informação disponível para o sistema não determina a estrutura tridimensional. Em visão estéreo, a estrutura é inerentemente determinada dada a correspondência entre as duas imagens e a orientação das câmeras que é fornecida ao sistema (Webb e Aggarwal 1982). A diferença

fundamental entre SfM e a fotogrametria tradicional está no fato de que em SfM a geometria da cena, a posição das câmeras e suas orientações são resolvidas automaticamente sem a necessidade de especificar *a priori* uma série de dados com coordenadas 3D conhecidas. Estes dados são resolvidos simultaneamente através de um procedimento iterativo altamente redundante de ajuste de conjunto (*bundle adjustment*) fundamentado em uma base de dados extraída automaticamente de um conjunto de imagens sobrepostas (Figura 2.7). O método tem melhor funcionamento em conjuntos de imagens com grandes áreas de sobreposição que capturem toda a estrutura tridimensional da cena vista de uma variada ordem de posições, ou como o nome sugere, de um sensor em movimento (Westoby *et al.* 2012).

Figura 2.7 – Resultado após uso de SfM. A projeção de um ponto P_j do objeto 3D na imagem da câmera no tempo/posição k resulta no ponto 2D rastreado $p_{j,k}$. Traduzido de Kurz, Thormählen e Siedel (2011).

Ullman (1979), em seus estudos sobre a interpretação monocular – ou seja, imagens que não possuem paralaxe e, portanto, perdem as propriedades de tamanho relativo e profundidade da cena – de objetos rígidos em movimento, mostrou que visadas de alguns pontos rigidamente conectados (fixos), em geral, determinam a estrutura destes pontos. A premissa da projeção paralela (ortográfica) permitiu encontrar esta estrutura de maneira fechada quando quatro pontos eram vistos de quatro vistas distintas. Como consequência da premissa da projeção paralela, a estrutura deduzida poderia ser refletida em profundidade e produzir a mesma imagem. O desenvolvimento de algoritmos para correspondência automática teve início nos anos de 1980 (e.g. Förstner 1986, Harris e Stephens 1988), sendo que a técnica desenvolveu-se

na visão computacional na década seguinte (Spetsakis e Aloimonos 1991, Boufama *et al.* 1993, Szeliski e Kang 1994). O método teve sua popularização com uma gama de ferramentas de processamento de nuvem, mais notavelmente o Microsoft Photosynth (Westoby *et al.* 2012). Essas ferramentas podem fazer uso direto de fotos carregadas pelo usuário ou de diferentes fontes para criar a cobertura necessária de um determinado alvo, e podem gerar automaticamente nuvens 3D esparsas desse conjunto de fotografias. As aplicações deste método parecem ilimitadas, mas seu uso nas Geociências ainda é raro (Niethammer *et al.* 2012) e existem poucos trabalhos quantitativos acerca da qualidade dos produtos de terreno derivados desta abordagem.

Nuvens de pontos

Como citado anteriormente, o primeiro passo para a resolução da cena tridimensional é o rastreamento de pontos notáveis entre as diversas imagens. Uma vez rastreados estes pontos, suas coordenadas relativas são computadas e estes passam a integrar a chamada nuvem esparsa, que nada mais é do que a distribuição espacial dos pontos identificados pelo sistema no conjunto de imagens fornecido. A partir daí, o sistema pode então utilizar estas localizações iniciais para iterar outros pontos nas vizinhanças, gerando uma segunda nuvem (nuvem densa), que tem sua densidade definida pelo usuário do programa (Figura 2.8).

Figura 2.8 – Exemplos de nuvem esparsa (sup.) e densa (inf.) geradas para a superfície de um talude em rocha.

A densidade de pontos é caracterizada como a quantidade de pontos no espaço por unidade de área. O seu limite é função da distância do objeto ao sensor imageador, e valores intermediários podem ser obtidos através de melhora da qualidade do processamento. Este valor é importante pois determina o nível de detalhe da investigação: um maior número de pontos fornece uma melhor precisão na medição de orientações espaciais. Cabe ressaltar que uma nuvem de pontos de maior densidade também implica em maior tempo de processamento, portanto, é importante conhecer o nível de detalhe ideal para o projeto, a fim de minimizar o tempo de pós processamento.

Cada ponto da nuvem pode conter diferentes informações a respeito do objeto imageado. Quando a imagem não contém nenhum atributo atrelado, a superfície pode ser representada apenas de maneira sombreada, preservando, assim, os seus aspectos geométricos, mas tornando difícil a identificação visual de estruturas. A estas imagens pode-se atribuir aos pontos seus valores de intensidade, que corresponde às propriedades refletivas da rocha, e indicam, por exemplo, a variação de umidade do maciço. Outra informação que pode ser atribuída é a cor, o mais comum em fotogrametria, representada em 24 ou 48 bit, que permite uma reprodução fiel do objeto. A combinação entre a geometria e a cor é chamada de imagem 3D. Por fim, as

imagens podem apresentar atributos multiespectrais, como no caso de imagens de satélite, onde o sensor captura a radiação eletromagnética emitida pelo objeto (Pötsch 2011). A Figura 2.9 mostra os diversos produtos obtidos a partir de imagens com diferentes atributos atrelados.

Figura 2.9 – Superior esquerda: Superfície irregular sombreada de uma face rochosa sem atributos; Superior direita: Imagem laser de intensidade; Inferior esquerda: Imagem 3D de frente rochosa em RGB; Inferior direita: Imagem ASTER da mina de Escondida, Chile. Extraído de Pötsch (2011).

Precisão relativa e absoluta dos pontos

A precisão relativa dos pontos descreve a variação espacial de cada ponto em relação à nuvem, também conhecido como ruído. Isto se deve ao fato que a nuvem de pontos real de uma superfície plana não é planar. Juntamente com a densidade da nuvem, esta precisão influencia diretamente, por exemplo, na orientação e rugosidade de uma junta.

Já a precisão absoluta descreve o desvio da orientação espacial de um ponto em relação a um determinado sistema de coordenadas. Estas posições são definidas a partir dos chamados pontos de controle, que são pontos de coordenadas conhecidas no espaço, mas que mesmo por medição direta também carregam erros associados (precisão do GPS, adequação de projeção). A precisão da posição absoluta no espaço é calculada pela média dos desvios individuais dos pontos de controle. A influência desta precisão na medida de atitudes geológicas é mínima (Pötsch 2011).

Resolução espacial e intervalo de trabalho

Cada sensor pode representar o espaço até certo limite. O intervalo de trabalho corresponde às distâncias aplicáveis entre o sensor e a frente rochosa que geram resultados satisfatórios, e a resolução espacial é a área quadrada do terreno que corresponde a um pixel da imagem, sendo então responsável pelo nível de detalhe da imagem. Quanto maior o intervalo permitido pelo sistema, maior sua aplicabilidade em geotecnia. Algumas limitações no intervalo de trabalho podem ser supridas pela melhora do equipamento (maior resolução) ou do sistema de processamento.

A resolução espacial adotada deve atender ao propósito do produto final, por exemplo: imagens para medição de rugosidade de uma superfície devem ter maior resolução espacial do que fotos aéreas para mapeamento geológico regional.

Geração de superfície

A partir da nuvem de pontos, o sistema é então capaz de gerar uma superfície (malha ou *mesh*) do objeto utilizando as coordenadas relativas dos pontos no espaço.

Mesh é definido por Patias (2001) como um conjunto de faces contíguas, triangulares ou quadriláteras, não sobrepostas e unidas por suas bordas (arestas). Uma malha, portanto, é composta por vértices, arestas e faces. No caso de faces triangulares, por vezes estas superfícies são chamadas de TIN (*Triangulated Irregular Network*) ou malha triangular. Geralmente a geração destas superfícies se dá através de métodos de elementos finitos.

A superfície gerada pode então ser apresentada de diversas maneiras. As mais comuns são a visualização do *wireframe*, que consiste apenas nos vértices e arestas da superfície, com as faces transparentes; superfície sombreada, onde é atribuída a cada face uma intensidade de cor de acordo com a sua orientação; e texturizada, onde é atribuída a cada face a textura do objeto, extraída das fotografias. Esta última, apesar de utilizar menos pontos que a superfície sombreada, é a que consome maior memória, porém é a que permite uma visão realista do objeto reconstruído.

Após a definição do sistema mais adequado aos objetivos propostos, o sistema de aquisição e processamento das imagens até a obtenção do modelo digital pode ser resumido em um fluxograma como o apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Fluxograma das etapas de trabalho necessárias para a geração de um modelo digital.

Como pode ser observado no fluxograma, a maior parte do processo se dá em ambiente computacional. Atualmente existem diversos programas no mercado destinados a reconstituição fotogramétrica como *PhotoScan*, *Sirovision*, *iWitness*, *Trimble*, *PhotoModeler*, *Topcon Imagemaster Photo* entre outros. A desvantagem desta variedade é que cada *software* utiliza um método de restituição, e portanto é indicado para um devido fim. Sendo assim, é importante que, para a geração de resultados confiáveis, haja um conhecimento mínimo do sistema adotado.

2.4.4. Georreferenciamento

O posicionamento de pontos de controle no objeto a ser imageado é uma etapa opcional na geração de modelos tridimensionais por SfM. Os pontos podem ser alvos com o intuito de gerar mais feições facilmente reconhecíveis para o programa, no caso de objetos muito homogêneos e sem variação de cor, ou podem servir para dar escala e/ou orientação para o modelo gerado. No caso da aplicação para extração de atitudes estruturais, é necessário que o modelo esteja corretamente orientado segundo o norte geográfico.

Georreferenciamento ou registro de imagens é o processo de colocar as coordenadas de uma imagem, mapa ou modelo em um determinado sistema de referência, sendo este de coordenadas locais ou geográficas. No caso de modelos tridimensionais de computador para

fins geotécnicos, Sturzenegger e Stead (2009b) descrevem cinco maneiras de se obter um modelo corretamente orientado (Figura 2.11).

Figura 2.11 – Arranjo para os diferentes métodos de registro. Os quadrados representam o posicionamento da câmera e as estrelas os pontos de controle. O preenchimento em vermelho e as linhas indicam locais de medição. Traduzido de Sturzenegger e Stead (2009b).

O método 1 consiste na medição da direção da linha de visada da câmera com uma bússola e na medição da distância entre a posição de duas câmeras. Para isso, a câmera deve estar nivelada, o que requer o uso de um tripé com nível de bolha. As principais vantagens deste método é a rapidez e o baixo custo, sendo muito útil quando não há possibilidade de acesso direto à frente de estudo. Porém, por não contar com coordenadas geográficas, não é possível obter sua posição espacial. Além disso, a medida obtida com a bússola pode ser afetada em áreas com presença de corpos magnéticos.

No método 2, três conjuntos de fotografias são tirados de três posições conhecidas de câmeras. A precisão do modelo 3D é um pouco menor (cerca de 0,3 pixel). O motivo é que todas as fotografias obtidas são consideradas como tiradas destas três posições conhecidas. Estes locais devem representar as posições do centro de perspectiva da câmera e do centro de rotação do tripé. Existe, porém, uma diferença desconhecida entre o centro ótico medido e o real, levando a uma pequena diferença na sua posição real quando a câmera é rotacionada para cobrir toda a face exposta, formando um leque de imagens, procedimento que não é recomendado para o processamento em programas de SfM. A posição das câmeras é obtida por GPS diferencial ou estação total. Assim como o primeiro método, este apresenta-se muito útil quando não há acesso a frente, porém o uso de tripé é obrigatório e o fato de as coordenadas

serem extrapoladas a partir da posição da câmera para a frente rochosa pode gerar imprecisão e propagação de erros de medida.

O método 3 requer que haja acesso ao talude. Nele, pelo menos três alvos são colocados na face rochosa e suas coordenadas são obtidas com auxílio de estação total. Um maior número de alvos aumenta a confiança e a distribuição espacial. É o método ideal, porém requer mais esforço e tempo para colocação dos alvos e aquisição das coordenadas. Como principal vantagem está a flexibilidade do uso da câmera, já que nesse caso o uso de tripé é dispensável. Em contrapartida, é necessário o uso de uma estação total e que existam condições de acesso à frente.

O método 4 requer a locação de um ponto de controle, o mais próximo possível da frente rochosa de acordo com as condições de segurança, com coordenadas conhecidas no campo de visão, além da posição de duas câmeras. As coordenadas podem ser obtidas através de DGPS ou estação total. Neste método são necessários apenas três pontos, porém a câmera deve ser utilizada com o auxílio de um tripé.

Por fim, no método 5, é montado um sistema o mais próximo possível da frente, respeitando as condições de segurança, onde três alvos são locados com ângulos retos, indicando dois eixos do sistema de referência local. Um dos eixos é alinhado com o norte com o auxílio de uma bússola. Para a escala, é medida a distância entre dois alvos. Em termos de custo e tempo este é o arranjo mais eficiente, já que necessita apenas de uma bússola, porém sua precisão pode ser afetada pela presença de corpos magnéticos no local.

Sturzenegger e Stead (2009b) concluem ainda que o método que apresenta maior precisão, tanto na posição dos pontos da nuvem como nas medidas estruturais de descontinuidades é o método 3. Os métodos 3 e 4 fornecem a melhor precisão espacial, da ordem de centímetros, e são recomendados principalmente nas situações em que o modelo gerado será usado em outra base de dados, como, por exemplo, a disponibilização no Google Earth, permitindo o correto posicionamento geográfico. No entanto, para fins geotécnicos, nos casos onde o modelo não será integrado a uma base de dados espaciais, não é prioritário alta precisão e exatidão, já que os parâmetros de atitude a serem medidos possuem uma variação espacial natural inerente. Sendo assim, qualquer um dos métodos apresentados promove medidas de atitudes estruturais adequadas, cabendo ao usuário definir aquela mais adequada à situação da área.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL LOCAL

Durante os trabalhos de campo, as exposições da cava principal e do seu entorno imediato foram investigadas em levantamentos de campo e com base em informações da mineradora. O lado norte esteve em processo de decapeamento durante a execução do projeto, tendo sua geometria alterada do primeiro levantamento de campo até a conclusão da dissertação (Figura 3.1 e Figura 3.2). Optou-se pela utilização da topografia inicial para a confecção do esboço geológico, visto que esta era a geometria da mina durante a fase de mapeamento.

Figura 3.1 – Vista para NE do lado norte da cava em março/2014.

Figura 3.2 – Vista para NE do lado norte da cava em dezembro/2014.

Foi possível individualizar cinco litotipos, sendo eles: quartzito (Qz), metassiltito com intercalação de metarenito (Msa), brecha metadolomítica (Dol), metarritmito carbonático (Mrc) e metassiltito homogêneo (Msh). Por não ser foco deste trabalho, as ocorrências de solo residual e coluvionar foram descritas de maneira sucinta. O mapa com a localização dos pontos de campo é apresentado na Figura 3.3. O esboço geológico produzido é apresentado na Figura 3.4.

A seguir são descritos em detalhe as unidades mapeadas, os dados estruturais levantados e a interpretação dos mesmos. Para facilitar a compreensão, as bancadas são identificadas pela sua cota média seguida da letra S ou N representando, respectivamente, o lado sul ou norte da cava em relação ao seu eixo principal. Os pontos de campo são identificados pela sigla GC seguida de seu número de identificação.

Figura 3.3 – Mapa de localização dos pontos de campo.

Figura 3.4 – Esboço geológico local.

3.1. Unidades mapeadas

3.1.1. Solo coluvionar

O colúvio ocorre de forma restrita nas bordas da cava principal, sendo caracterizado como solo mal selecionado, silto-areno a areno-siltoso de coloração marrom avermelhada que ocorre em camadas de poucos metros acima das demais unidades. Apresenta fragmentos angulosos das demais unidades.

3.1.2. Quartzito (Qz)

O quartzito aflora em duas faixas, uma a norte e uma a sul da cava principal, perfazendo uma área total de 175.200 m². Apresenta-se bandado em sua maioria, com algumas porções maciças, e coloração variando de branco esverdeado, branco acinzentado e vermelho alaranjado quando alterado. É a unidade de topo no perfil da mina, em contato inferior com o metassiltito com intercalação de metarenito, onde é possível observar também a presença restrita de camadas de espessura decimétrica a métrica de metarenito em meio ao metassiltito. Localmente o contato entre o quartzito e o metassiltito com intercalação de metarenito se dá por falha (Figura 3.5). De maneira geral, essa unidade apresenta-se muito fraturada, sendo que a sua melhor exposição encontra-se nas bancadas médias e superiores da parte norte da cava.

Figura 3.5 – Contato tectônico a oeste da cava principal entre metassiltito com intercalação de metarenito e quartzito (esq.) e detalhe do plano de falha (dir.).

3.1.3. Metassiltito com intercalação de metarenito (Msa)

A unidade do metassiltito com intercalação de metarenito ocorre em uma faixa delgada a sul da cava principal, e na forma de duas lentes: uma de aproximadamente trezentos e cinquenta metros de extensão em meio ao metarritmito na área sul e outra de aproximadamente quatrocentos e trinta metros na área norte. No total, ela abrange uma área de 35.764 m². A rocha apresenta intercalação milimétrica a decimétrica de níveis de areia fina (Figura 3.6) a média com níveis de silte, localmente constituindo metapelitos. Possui coloração cinza escura a clara quando são e coloração vermelha alaranjada, verde acinzentada e marrom amarelada quando alterada.

Figura 3.6 – Camadas de metassiltito intercaladas com camadas de metarenito fino.

3.1.4. Brecha metadolomítica (Dol)

A brecha metadolomítica é a principal unidade explorada na mina, e encontra-se em uma faixa de aproximadamente 100 metros de largura na parte central da cava principal e em uma outra mais estreita, cerca de 20 metros de largura, na cava secundária. Ao todo, encontra-se exposta em 93.878 m². Apresenta-se como uma rocha de coloração cinza escura, maciça, frequentemente com vênulas de calcita. O tamanho dos fragmentos da brecha varia de um local para outro (Figura 3.7). Próximo aos planos de falha, a rocha apresenta foliação incipiente.

Figura 3.7 – Aspecto geral da brecha metadolomítica. Pode apresentar fragmentos maiores (esq.) ou menores (dir.).

3.1.5. Metarritmito carbonático (Mrc)

A unidade do metarritmito carbonático ocorre em uma faixa espessa no eixo central da mina, sustentando a maior parte do talude global do lado sul. Apresenta potencialidade de minério, e atualmente é dosada juntamente com a brecha metadolomítica. Em sua maioria apresenta coloração cinza claro a escuro quando são e marrom quando alterada, estrutura maciça com bandamento local e intercalações com camadas milimétricas a centimétricas de metapelitos, onde é possível observar a presença de duas foliações, sendo uma delas plano axial de pequenas dobras apertadas (Figura 3.8). A unidade é exposta em uma área de 167.670 m².

Figura 3.8 – Intercalação entre bandas cinza claro e escuro (esq.) e dobras apertadas evidenciadas por nível de argila (dir.).

Dentro da unidade, foi identificada ainda uma faixa restrita com maior contribuição de silte, em contato com a unidade da brecha metadolomítica, de coloração cinza esverdeada, com intercalação de bandas cinza claro a escuras. Seu contato com a unidade adjacente é tectônico, evidenciado pelo truncamento do bandamento na superfície de contato (Figura 3.9) e seu faturamento é intenso.

Figura 3.9 – Foto (esq.) e croqui (dir.) do contato tectônico entre a unidade do metarritmito carbonático (Mrc) com a brecha metadolomítica (Dol) na cava secundária da bancada 850S. Vista para E.

3.1.6. Metassiltito homogêneo (Msh)

A unidade do metassiltito homogêneo encontra-se em uma faixa de aproximadamente 20 metros de largura na bancada superior do setor sul da cava, compreendendo uma área de 11.565 m². É uma rocha quase sempre alterada a muito alterada, de coloração roxa avermelhada, muito foliada, com presença restrita de níveis milimétricos de areia fina. Seu fraturamento é mais sistemático e pronunciado que nas demais unidades mapeadas (Figura 3.10).

Figura 3.10 – Detalhe do bandamento e foliações no metassiltito homogêneo (esq.) e aspecto geral da unidade (dir.).

3.2. Geologia estrutural

De maneira geral, as rochas mapeadas encontram-se estruturadas na direção ENE-WSW, com mergulhos altos. A maioria das unidades apresenta preservação da estrutura sedimentar em diferentes níveis, sendo possível observá-la através do bandamento composicional das rochas, principalmente nas unidades Msa e Mrc. É possível reconhecer a presença de uma foliação tectônica paralela ao bandamento (S_0/S_1), identificada por minerais micáceos orientados nas porções pelíticas.

A análise dos dados estruturais coletados levou a separação da mina em dois domínios estruturais: domínio norte e domínio sul, que são separados pela zona de cisalhamento principal, presente no eixo da cava principal.

O setor norte apresenta concentração unimodal dos dados, com tendência 249/29 (rumo do mergulho/mergulho). A dispersão dos dados sugere um círculo mínimo de abertura 38° e eixo aproximado 324/76 (Figura 3.11). Já no setor sul, os dados podem ser ajustados a uma guirlanda, sugerindo uma fase de dobramento afetando a superfície S_0/S_1 com eixo construído 080/17 (Figura 3.12). No ponto GC-016 foi descrita uma dobra em m , isoclinal fechada com eixo 268/34 e plano axial 346/71, possivelmente pertencente a mesma fase de deformação.

Figura 3.11 – Estereograma de dados de acamamento e foliação do domínio norte. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 54 polos.

Figura 3.12 – Estereograma de dados de acamamento e foliação do domínio sul, atitude média (gm) e plano de melhor ajuste (bm). Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 147 polos.

Três principais zonas de cisalhamento dúctil-rúptil foram identificadas. A primeira, localizada no eixo central da mina, lado sul do *bottom pit*, possui direção ENE-WSW, e coloca a unidade da brecha metadolomítica, a norte, em contato com o metarritmito carbonático a sul. No contato entre as unidades é possível observar a presença de uma faixa de pouco mais de dez metros de largura com foliação milonítica de alto ângulo (Figura 3.13). A segunda zona de cisalhamento localiza-se na cava secundária, bancada 850S, e possui aproximadamente 6 metros de largura. Também é caracterizada pela presença de uma foliação ENE-WSW milonítica de alto ângulo, de perfil ondulado, e separa a brecha metadolomítica a sul, do

metassiltito com intercalação de metarenito a norte. Esta faixa constitui a unidade descrita anteriormente como metarritmito carbonático (Figura 3.9).

Figura 3.13 – Zona de cisalhamento presente no lado sul do eixo principal da cava (bottom pit). Vista para ENE (esq.) e para WSW (dir.).

A terceira zona de cisalhamento está localizada no lado norte da mina, na bancada 680N. Ela coloca em contato a brecha metadolomítica a sul com o quartzito a norte. É caracterizada por uma zona de dano de aproximadamente 20 cm de largura composta por material fino de coloração cinza (Figura 3.14). Ainda nesta bancada, foi possível identificar a presença de uma dobra decamétrica, com eixo paralelo à orientação da mina (Figura 3.15). A análise desta zona de cisalhamento sugere um movimento de empurrão de sul para norte. Outra estrutura, localizada no talude global do lado sul da cava principal, apresenta a mesma sugestão de movimentação (Figura 3.16), porém encontra-se em uma área inacessível.

Figura 3.14 – Detalhe da zona de cisalhamento na bancada 680N.

Figura 3.15 – Dobra decamétrica com zona de charneira exposta no topo do talude na bancada 680N.

Figura 3.16 – Foto e croqui do empurrão localizado no fim da bancada 680N (sup.) e foto e croqui do talude global do lado sul da cava principal, com indicação de possível empurrão (inf.), ambos com movimentação de sul para norte.

Nas bancadas do lado norte foram também observadas diversas falhas, em sua maioria paralelas a estruturação geral. São caracterizadas por grandes planos estriados, irregulares e ondulados, geralmente aflorantes por toda a altura da bancada e de extensão superior a 50 m, sem a presença de crescimento mineral na superfície (Figura 3.17 e Figura 3.18). Alguns planos de falha menores, oblíquos a estrutura geral, também são observados nas bancadas inferiores do lado norte, como mostrado na Figura 3.19.

Figura 3.17 – Plano de falha na bancada 680N. Relação com a zona de cisalhamento (sup.) e extensão ao longo da bancada (inf.)

Figura 3.18 – Falhas nas bancadas 680N e inferiores.

Figura 3.19 – Exemplo de falha oblíqua a estrutura geral na mina, no lado sul do bottom pit.

O estereograma da Figura 3.20 mostra uma maior tendência de falhas com direção ENE e mergulhos superiores a 45 graus para NNW. A maioria dos planos observados não possuía indicadores confiáveis de sentido do movimento e nem uma direção consistente de estrias, o que leva a crer que o movimento pode ter sido oblíquo ou que as falhas podem ter sofrido reativação.

Figura 3.20 – Estereograma com 17 medidas de falhas, e 6 medidas de estrias, sendo que 3 delas apresentam indicação de movimentação sinistral. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior.

Por fim, dobras abertas suaves foram observadas em cortes de saprolito nas estradas do entorno da mina, com eixo deduzido pela atitude dos flancos de 016/28.

Figura 3.21 – Dobra aberta suave observada no ponto GC-005.

3.3. Interpretação dos dados

A descrição das rochas observadas no mapeamento da cava sugere que a exposição apresenta o contato entre o topo da Formação Pirapora (Membro Carbonático) e a base da Formação Estrada dos Romeiros (Membro Arenoso) descritos por Bergmann (1988). A

orientação geral E-W das rochas é consistente com a esperada no flanco sul do Sinclínório de Pirapora. Foram observadas três superfícies metamórficas: S_0/S_1 , S_2 (superfície principal) e S_3 oblíqua, observada localmente. A partir dos dados apresentados, a proposta de Bistrichi (1982) é a que mais se adequa às estruturas observadas em campo, com três fases de dobramento sobrepostas – responsáveis pela geração da superfície S_1 com dobras fechadas desenhadas pelo acamamento (F1), sua deformação em dobras de diversas escalas formando a superfície principal S_2 (F2), e um dobramento superposto com dobras abertas suaves (F3) – e afetadas por deformações rúpteis tardias, relacionadas às falhas em escala de bancada descritas em diversos pontos da cava.

4. LEVANTAMENTO E ANÁLISE DAS DESCONTINUIDADES

4.1. Descrição das frentes selecionadas

A Mina Vau Novo possui formato alongado com eixo da cava principal orientado na direção ENE-WSW (Figura 4.1 e Figura 4.2). A cava principal tem sua menor cota em 630 metros e a mais alta em 820 m. No lado sul, tem-se a presença de uma cava secundária, extensa, com menor cota em 820 m e a mais alta em 880 m, que serviu de área teste para a aplicação da técnica.

Figura 4.1 – Estruturação da cava.

Figura 4.2 – Vista geral para ENE da cava principal da mina Vau Novo.

A partir do levantamento de campo preliminar e da avaliação das condições de acesso a longo prazo, foram selecionados dois taludes localizados na cava secundária para a aplicação da técnica (Figura 4.3).

O primeiro (Frente 1) ocorre na unidade da Brecha metadolomítica, localiza-se na bancada 850S, possui aproximadamente 130 metros de comprimento, 40 m de altura e orientação 353/60. Sua seleção para área teste inicial levou em consideração as condições de acesso, área de exposição e disponibilidade de mais de uma altura de bancada para a coleta de fotografias. Na Frente 1 foram amostradas em campo duas linhas (Figura 4.4). A primeira (Scanline 1c), feita simultaneamente à aquisição das fotografias, possui direção 175 e 106,25 metros de comprimento e 40 dados (Anexo 4). A segunda linha (Scanline 2c), feita posteriormente, possui 17,46 metros de comprimento e rumo 075, com seus 48 dados apresentados no Anexo 5. Além disso, 12 planos foram selecionados para posterior comparação com as medidas obtidas no modelo digital.

Embora seja conhecido o fato de que a amostragem linear não é a melhor maneira de lidar com dados em modelos digitais (Sturzenegger *et al.* 2011), este ainda é o modo mais simples de ser realizada em campo. Seu emprego neste trabalho teve por função, além da utilização na caracterização do maciço, servir de comparação para os dados obtidos por meio digital. Apesar da variabilidade natural de dados geológicos e do viés provocado, o uso desta amostragem como meio de validação do método é justificado pelo seu largo emprego bem sucedido na caracterização geotécnica de maciços.

Figura 4.3 – Mapa de localização das Frentes 1 e 2, selecionadas para a geração de modelos digitais por fotogrametria, e seus respectivos pontos de controle, utilizados para georreferenciamento.

Figura 4.4 – Localização das linhas de amostragem na Frente 1.

Para a orientação do modelo digital gerado para a Frente 1, foi selecionado o método 3 descrito na seção Georreferenciamento. Primeiramente os pontos de controle foram marcados na forma de oito cruzeiros de aproximadamente cinquenta centímetros na base do talude com tinta spray na cor laranja (Figura 4.5), com espaçamento médio de 23 metros. Posteriormente, foram localizados os dois marcos topográficos mais próximos do local para zerar a estação total (pontos MC31 e MC32), seguido da locação de um ponto intermediário (ponto C1) e do ponto de estacionamento da estação na cava secundária (ponto PC1_E), de onde é possível visualizar completamente o talude (Figura 4.6). A localização dos pontos da estação total e pontos de controle pode ser visto na Figura 4.3. Por fim, 175 fotos foram tomadas de duas alturas diferentes: uma na base do talude e outra na sua altura intermediária (Figura 4.7).

Figura 4.5 – Exemplo de ponto de controle marcado no talude.

Figura 4.6 – Coleta das coordenadas dos pontos de controle locados no talude da Frente 1.

Figura 4.7 – Posições das fotografias utilizadas na geração do modelo digital da Frente 1.

Os pontos obtidos foram identificados e suas coordenadas anotadas. A distribuição dos pontos de controle no talude pode ser observada na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Localização dos pontos de controle na Frente 1. Vista para S.

O segundo talude (Frente 2) ocorre na unidade do Metarritmito carbonático, também localiza-se na bancada 850S (cava secundária), é oposto à Frente 1, possui aproximadamente 15 metros de comprimento, 6 metros de altura e orientação 001/85. Sua seleção levou em consideração a diferença de litologia e de padrão de fraturamento, mais sistemático e pronunciado que na Frente 1. Foram amostrados 9 planos de referência com auxílio de bússola. Foram tiradas e utilizadas 48 fotos, de uma mesma altura, para a geração do modelo digital (Figura 4.9). Seu georreferenciamento baseou-se no método 5 e no cálculo de coordenadas por azimute e distância utilizado em topografia. Primeiramente foi localizado um marco fora da

face do talude (PC2_R) que serviu de amarração para os outros pontos. As coordenadas deste ponto foram adquiridas com GPS portátil e sua cota aproximada pela topografia da mina. A utilização do GPS portátil para esta tarefa se justifica no fato de que para a obtenção de orientação de planos, não há necessidade de grande precisão espacial. Adicionalmente, foram localizados três marcos na forma de cruces laranjas na face do talude (PC2_1, PC2_2 e PC2_3). A localização dos marcos pode ser vista na Figura 4.10.

Figura 4.9 – Posições das fotografias utilizadas na geração do modelo digital da Frente 2.

Figura 4.10 – Localização dos pontos de controle na Frente 2. Vista para N.

Para o cálculo das coordenadas adotou-se um ponto como base (PC2_R) e sua distância aos demais pontos foi medida com auxílio de trena e seu azimute e inclinação com auxílio da bússola. Esses dados foram então utilizados para o cálculo das coordenadas relativas dos demais. Os incrementos nos eixos norte e leste são obtidos multiplicando-se a distância horizontal entre os pontos pelo cosseno e seno, respectivamente, do azimute medido:

$$\Delta N = d_h \cos Az \qquad \Delta E = d_h \sin Az$$

Já o incremento em Z (cota) é calculado pela multiplicação do seno da inclinação entre os dois pontos (α) pela distância inclinada medida mais a altura do marco de referência, que no caso é de 0,8 m:

$$\Delta Z = d \sin \alpha + 0,8$$

4.2. Amostragem tradicional

A partir dos dados obtidos nas linhas de amostragem Scanline 1c e Scanline 2c da Frente 1, foram calculados a frequência, o espaçamento médio, a média dos espaçamentos medidos e o RQD* para os valores 0,1 m, 0,3 m e 1,0 m para o conjunto de dados de cada linha de amostragem (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Parâmetros calculados para o conjunto de dados das scanlines 1c e 2c.

	Scanline 1c	Scanline 2c
Frequência (fratura/ m)	0,273	2,749
Espaçamento médio (m)	3,664	0,364
Média dos espaçamentos (m)	3,795	0,359
RQD* 0,1 m (%)	99,963	96,847
RQD* 0,3 m (%)	99,682	79,987
RQD* 1,0 m (%)	96,888	23,988
Número total de dados	40	48

Os dados das duas amostragens foram então corrigidos de acordo com a orientação das linhas, lançados em projeção estereográfica de igual área e contornados segundo a frequência para agrupamento por famílias por *cluster*, com raio de busca de 30°. Os resultados podem ser observados na Figura 4.11. Os dados das discontinuidades apresentam uma grande dispersão, o que dificulta seu agrupamento. Foram definidas seis famílias de discontinuidades e suas descrições e parâmetros calculados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados das famílias obtidas a partir da análise de projeção estereográfica dos dados das linhas de amostragem 1c e 2c.

Família	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Atitude média	063/88	321/76	175/71	002/62	276/56	092/39
Número de dados	22	18	18	11	6	7
Frequência (Fratura/ m)	0,179	0,147	0,147	0,090	0,049	0,057
Espaçamento médio (m)	5,568	6,805	6,805	11,136	20,417	17,500
Média dos espaçamentos (m)	5,452	6,800	8,670	11,944	17,130	18,817
Persistência	1-3 m	1 - 3 m	<1 m	<1 m	1-3 m	<1 m
Terminação	1 ou 2	2	1 ou 2	2	1 ou 0	1 ou 2
Abertura	<0,1 mm	0,1-2,5 mm	0,1-2,5 mm	0,1-2,5 mm	0,1-2,5 mm	0,1-2,5 mm
Preenchimento	limpo	limpo - manchas superficiais	limpo	manchas superficiais	limpo	limpo
Rugosidade	suave - áspero	suave - áspero	polido - áspero	suave	polido - áspero	suave
Forma	planar	planar	planar - ondulado	planar	ondulado	planar - ondulado
JRC	8 - 10	6 - 10	8 - 10	6 - 8	10 - 12	10 - 12
Fluxo d'água	seco	seco	seco	seco	seco	seco

Observa-se que a amostragem das linhas indica um maciço de qualidade muito boa segundo a classificação de Deere *et al.* (1967), com RQD* acima de 95%. As fraturas, no geral, apresentam persistência menor que 3 m, abertura menor que 2,5 mm, sem preenchimento, superfícies planas a onduladas de rugosidade polida (planos de falha) a áspera, e secas.

Figura 4.11 – Estereogramas com os dados das linhas de amostragem 1c e 2c agrupados por família. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 88 polos.

4.3. Geração de modelos digitais e amostragem virtual

Para a amostragem virtual de descontinuidades, foram gerados três modelos tridimensionais: um modelo teste foi montado utilizando planos de madeira arranjados em um sistema de coordenadas locais para avaliação dos programas desenvolvidos; além disso, foram gerados 2 modelos digitais de frentes escavadas na área de estudo, descritas anteriormente.

Como já explicado, o uso de *software* baseados em SfM facilita a geração de modelos digitais, mesmo quando executados por pessoas sem treinamento em fotogrametria. Porém,

algumas recomendações são importantes para que o modelo gerado obtenha a maior qualidade possível, como posicionamento da câmera, uso de lentes adequadas etc. O programa utilizado para a construção do modelo 3D, *Agisoft Photoscan*, possui um manual que descreve os cuidados que deve-se ter ao fotografar o alvo (Agisoft 2014). Além disso, algumas sugestões são apresentadas no Anexo 1. O fluxograma da Figura 4.12 mostra a ordem geral de operações utilizada para a geração de modelos digitais fotogramétricos no programa *Photoscan*.

Os modelos tridimensionais gerados são apresentados em formato digital (PDF e OBJ) no CD em anexo.

Figura 4.12 – Fluxograma de trabalho para geração de modelo 3D no programa Agisoft Photoscan. Os quadrados representam operações necessárias e os paralelogramos as operações opcionais

4.3.1. Funcionamento das rotinas criadas

A partir da base teórica de tratamento de dados direcionais apresentada, foram desenvolvidas três rotinas computacionais (códigos disponíveis no CD em anexo) para extração e tratamento dos dados oriundos do modelo tridimensional gerado pelo programa *Photoscan* (arquivo *.obj*):

- ✓ **ply2atti**: responsável por extrair a atitude dos planos com superfície visível no modelo. Adicionalmente fornece coordenadas do centroide do plano, persistência, número de faces utilizadas para o cálculo do plano médio e parâmetros de forma dos dados.
- ✓ **scanline**: realiza medidas de descontinuidades com base em uma linha de amostragem virtual, retornando além da atitude dos planos, sua posição na linha, persistência e ângulo em relação a linha de amostragem.
- ✓ **angulo**: calcula o desvio angular entre dois dados direcionais.

Inicialmente foi realizado o método para extração de atitude de planos que tem sua superfície visível no modelo (**ply2atti**). A seleção destes é feita de forma manual no programa *MeshLab*, permitindo ao usuário utilizar critérios geológicos na seleção, agrupando-os com diferentes cores por exemplo. O modelo é então exportado no formato *.ply*, que contém as seguintes informações:

- ✓ Coordenadas x, y, z de cada ponto da malha triangular (vértices);
- ✓ Coordenadas nx, ny, nz correspondentes à normal associada ao ponto, que é calculada através da média das normais das faces as quais o vértice compartilha;
- ✓ Os valores dos canais de cor RGB de cada vértice;
- ✓ Lista contendo o índice dos três pontos que compõem cada face da malha.

A partir disso, a rotina desenvolvida pode extrair as atitudes ajustando um plano para os vértices pintados no passo anterior. Para isso o programa considera cada plano pintado como um grafo (conjunto de vértices e arestas) (Figura 4.13), composto pelos vértices da malha triangular como nós e as arestas dos triângulos como conexões. Dada essa premissa, deve-se

ter cuidado na seleção de planos para que não haja conexão entre dois planos diferentes, o que levará o sistema a considera-lo como uma única feição (Figura 4.13).

Figura 4.13 – Representação de dois grafos: um preto, composto por seis vértices e sete arestas, e um vermelho, composto por cinco vértices e quatro arestas (sup.) e representação de certo e errado na seleção de planos no modelo tridimensional (inf.).

Posteriormente, para cada grafo é feito o cálculo de sua atitude. Obtendo-se a matriz de dispersão espacial dos dados contidos no grafo, os autovetores (v) e autovalores (λ) desta representarão os eixos e seus comprimentos do elipsoide de melhor ajuste aos dados. Para feições planares, o ajuste dos autovetores se dá com os dois maiores eixos no plano (v_1 e v_2) e o terceiro (v_3), de menor magnitude, ortogonal ao plano, representando então a normal do plano de melhor ajuste, ou seja, seu polo (Figura 4.14). Sendo assim, seu uso diminui o efeito de ruídos no cálculo da atitude do plano.

Figura 4.14 – Estimativa da normal de um plano ajustado a um conjunto de pontos segundo a orientação dos autovetores calculados para a matriz de dispersão espacial dos dados. Na figura, n e $-n$ representam a natureza ambígua da orientação em um modelo tridimensional. Extraído de Sun (2013).

A escolha manual, se executada com pouco cuidado, pode levar à seleção de planos inadequados, ou mesmo de mais de um plano. Para isso, optou-se também pelo cálculo dos parâmetros de forma propostos por Vollmer (1990) e o Fisher K (Fisher 1953), descritos anteriormente, para certificar-se que a distribuição dos vértices é planar.

Adicionalmente o programa também calcula as coordenadas do centroide de cada plano, para que o usuário possa associar as medidas obtidas com os planos dos quais elas tiveram origem e o comprimento aproximado do plano (persistência), calculado pela distância entre os pontos extremos do plano.

São retornados dois arquivos de texto: um composto apenas pela orientação dos planos (rumo do mergulho/mergulho) e outro composto pelas coordenadas x , y , z do centroide, rumo do mergulho, mergulho, comprimento do plano, número de faces da malha que pertencem ao plano, K de Fisher e parâmetros de forma de Vollmer.

Posteriormente, para que os resultados obtidos nas *scanlines* levantadas em campo fossem diretamente comparáveis com as atitudes do modelo, também tomou-se o cuidado de desenvolver um método para a extração de dados ao longo de uma linha de amostragem virtual (**scanline**). Este método tem como vantagem a possibilidade de calcular também a atitude de planos visíveis apenas através de seu traço no modelo (planos ortogonais à face do talude). Considerando que o traço de uma descontinuidade no modelo digital possui pontos não colineares, já que um deslocamento entre eles é conferido pela textura da superfície, a atitude

de um plano visível através de seu traço pode ser calculada por meio do produto vetorial dos vetores diferença entre três pontos.

De maneira geral, a amostragem virtual segue as seguintes etapas:

1. Localização da linha de amostragem e obtenção das coordenadas de seu começo e fim;
2. Seleção de três pontos para cada traço de descontinuidade ou plano que intercepta a linha;
3. Processamento.

A seleção dos pontos da linha de amostragem e dos traços é feita utilizando-se o mesmo modelo *.ply* carregado no *Meshlab*. O usuário deve selecionar os pontos do começo e fim da linha de amostragem desejada, e posteriormente os pontos do começo, meio e fim de cada plano que intercepta a linha com a ferramenta *PickPoints*. As coordenadas dos pontos são então salvas em um arquivo em formato *.pp*, exportado pela própria ferramenta (Figura 4.15). Com essas coordenadas, a rotina **scanline** é capaz de calcular, além da orientação dos planos amostrados, a orientação da linha de amostragem e realizar operações de intersecção linha/plano, dando a posição da descontinuidade na linha, que pode ser então usada para cálculo de espaçamento e seus parâmetros derivados, como RQD* e frequência. Além disso, é calculado também o ângulo entre a linha e os planos, informação utilizada para posterior correção de viés.

Figura 4.15 – Exemplo de seleção de pontos para descontinuidades ao longo da linha de amostragem virtual. Índices iguais representam um mesmo plano. S1 e S2 indicam, respectivamente, o início e fim da linha de amostragem.

Por fim, para a obtenção do ângulo entre os planos medidos em campo e os extraídos nos modelos digitais, criou-se a rotina **angulo** que realiza o produto escalar entre os vetores paralelos as normais das medidas de planos fornecidas em dois arquivos de entrada, e retorna o ângulo entre seus polos.

4.3.2. Modelo de teste

Para a validação do programa desenvolvido para extração e cálculo de atitude de planos de descontinuidade (**ply2atti**), foi criado um modelo simples composto por quatro planos construídos em madeira com diferentes inclinações, que são utilizados para fins didáticos. Estes planos foram distribuídos de maneira aleatória em uma superfície plana ao ar livre, com boas condições de luminosidade, dentro de um sistema de referência local criado orientando-se o eixo Y paralelo ao norte e o eixo X paralelo a leste, com o auxílio de uma bússola e fita adesiva. As distâncias foram tomadas com o auxílio de uma trena e identificadas na fita adesiva com o uso de marcador permanente. As atitudes dos planos foram obtidas com auxílio da bússola e anotadas em um croqui para posterior correlação com as medidas obtidas pelo modelo. Ao todo foram tomadas 58 fotografias que foram processadas em alta qualidade, gerando um modelo tridimensional formado por 971.040 vértices e 1.936.500 faces (Figura 4.16).

Figura 4.16 – Arranjo dos planos de referência no modelo de validação e localização dos pontos de controle.

Para o georreferenciamento foram fornecidas ao sistema as coordenadas de cinco pontos, como mostra a Tabela 4.3, com erros associados da ordem de milímetros e erro total de 0,004881 m.

Tabela 4.3 – Coordenadas dos pontos de controle utilizados no modelo de validação e seus erros associados.

Ponto	N(m)	E(m)	Z(m)	Erro (m)	Projeções
PCV_1	0,00	0,00	0,00	0,006987	21
PCV_2	0,00	-1,00	0,00	0,002240	24
PCV_3	0,00	-1,50	0,00	0,002995	10
PCV_4	1,00	0,00	0,00	0,004232	40
PCV_5	1,50	0,00	0,35	0,006196	17

A cena foi restituída de forma satisfatória, sendo que apenas o plano com maior inclinação (70°) não teve sua superfície completamente reconstruída, possivelmente devido a uniformidade de cor, seu tamanho reduzido e a criação de sombra por causa de sua inclinação.

No modelo gerado foram selecionados os quatro planos de madeira, além do plano vertical onde foi marcado o eixo Z. Os resultados obtidos no processamento podem ser observados na Tabela 4.4.

Figura 4.17 – Detalhe da falha de reconstrução completa do plano 3 no modelo de validação.

Tabela 4.4 – Atitude dos planos medidas com bússola em campo e extraídas do modelo de validação 3D, com desvio angular entre as medidas e número de faces utilizadas para o cálculo da atitude e seus parâmetros de forma.

Plano	Medida campo	Medida modelo	Desvio angular (°)	Número de faces	K	P	G	R
1	183/10	182/08	2,006	4733	579,77	0,99	0,01	0,00
2	235/20	232/20	1,026	7885	1042,81	1,00	0,00	0,00
3	040/70	035/71	4,818	338	44,53	0,93	0,02	0,05
4	133/20	135/17	3,066	9903	530,44	0,99	0,00	0,00
5	180/90	179/88	2,236	29024	100,01	0,96	0,02	0,02

A partir destes dados, é possível observar que a diferença entre as medidas fica entre 1° e 4°. A maior diferença está associada ao plano 3, que não teve sua reconstrução completa, como citado anteriormente. Os parâmetros de forma também indicam distribuição pontual dos dados, o que consiste com o esperado para medidas de faces pertencentes a um plano. Sendo assim, a rotina desenvolvida foi julgada adequada para aplicação nas frentes selecionadas.

4.3.3. Frente 1

Para a Frente 1, foram adquiridas 175 fotos no total, de duas alturas diferentes, de onde 78 foram selecionadas de acordo com critérios de foco e relevância da cena desejada. Todas as fotos utilizadas passaram primeiramente por *masking* (remoção de áreas através de seleção por máscaras) para a remoção de vegetação e céu, a fim de reduzir o volume de dados processados (Figura 4.18). Posteriormente, os pontos de controle foram localizados em todas as fotografias e suas coordenadas fornecidas ao sistema.

Figura 4.18 – Exemplo de foto da Frente 1 antes (esq.) e depois (dir.) do processo de masking.

Após a aquisição, em uma etapa inicial, foram realizados diversos testes de processamento com as fotos da Frente 1, processando-as em diferentes qualidades e em diversos equipamentos: uma estação de trabalho Dell voltada para aplicações gráficas e numéricas, um notebook Asus voltado para jogos e um notebook Dell de uso doméstico. No caso do notebook Dell de uso doméstico (Notebook Dell Inspiron 14R, processador Intel i7 1,8 GHz, 8GB RAM, NVIDIA GeForce GT 750M, Windows 8.1 64 bits), a geração da superfície não aconteceu por memória insuficiente e, portanto, não foi possível conduzir testes de processamento com o equipamento. Uma ideia geral do tempo de processamento para as outras máquinas e da qualidade obtida é apresentada na Tabela 4.5, a seguir.

Tabela 4.5 – Tempo de processamento por etapa para cada equipamento testado.

Equipamento	Alinhamento	Geração de nuvem densa	Mesh		
			Nuvem fonte	Qualidade	Tempo
Workstation Dell Precision T7400, Processador Intel Xeon 3,0 GHz, 24GB RAM, NVIDIA Quadro FX4600, Windows 7 Professional 64bits	3431,93s	6963,13s	Esparsa	Baixa	9,157s
				Média	9,158s
				Alta	9,719s
			Densa	Baixa	3753,45s
				Média	4231,93s
				Alta	5080,57s
Notebook Asus G750JX-T4112H, Processador Intel i7 3,4 GHz, 32GB RAM, NVIDIA GeForce GTX 770M, Windows 8.1 64bits	1313,17s	4501,26s	Esparsa	Baixa	4,265s
				Média	4,235s
				Alta	4,407s
			Densa	Baixa	1743,93s
				Média	2333,25s
				Alta	2839,45s

O primeiro resultado observado é que o processamento das fotos em alta qualidade não é compatível com equipamentos com baixa quantidade de memória de acesso aleatório (RAM). Configurações com menos de 24GB de RAM não conseguem rodar adequadamente os modelos, o que pode vir a encarecer o projeto. Vale ressaltar, porém, que as imagens TIFF utilizadas possuem 28,7 MB cada, consideradas de alta qualidade, o que também prejudica a rapidez de processamento. Além disso, existe a possibilidade de realizar a construção do modelo em etapas, como citado no início do capítulo, opção esta que não foi utilizada durante os testes.

Os produtos obtidos nas diferentes opções de qualidade oferecidas pelo sistema também apresentaram diferenças significativas. Primeiramente, as malhas triangulares geradas a partir da nuvem de dados esparsa não foram julgadas satisfatórias para os objetivos propostos. Em baixa qualidade, a maioria dos planos de descontinuidades não é detectável. Nas qualidades

média e alta, apenas os grandes planos de falha são visíveis, sendo que não há uma melhora significativa de uma para a outra nos planos menores.

Figura 4.19 – Exemplo de malhas triangulares de uma superfície de falha, derivadas da nuvem de pontos esparsa e processadas nas qualidades baixa, média e alta.

Já as malhas derivadas da nuvem densa de pontos apresentam grande quantidade de detalhes mesmo em baixa qualidade, onde todos os planos, incluindo estrias na superfície dos planos maiores, são visíveis. Este ganho de detalhe se dá principalmente pelo considerável aumento no número de pontos do modelo, que passam de 45.160 vértices da nuvem esparsa em alta qualidade, para 361.363 da nuvem densa em baixa qualidade, chegando a 3.209.660 de vértices em alta qualidade.

Figura 4.20 – Exemplo de malhas triangulares de uma superfície de falha, derivadas da nuvem de pontos densa e processadas nas qualidades baixa, média e alta.

No georreferenciamento, o erro total obtido pelos sete pontos de controle locados com auxílio de estação total foi de 0,023447 m. Os erros individuais dos pontos podem ser observados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Coordenadas dos pontos de controle da Frente 1 obtidas com a estação total e erros associados.

Ponto	N (m)	E (m)	Z (m)	Erro (m)	Projeções
PC1_1	7410532,746	302754,949	797,198	0,037808	4
PC1_2	7410527,550	302731,841	798,741	0,015861	8
PC1_3	7410527,397	302718,456	796,913	0,029718	6
PC1_4	7410524,517	302701,664	790,923	0,015584	11
PC1_5	7410526,991	302680,548	791,658	0,009657	9
PC1_6	7410517,089	302644,521	796,716	0,019957	8

A partir destes testes, optou-se pela utilização do Notebook Asus e pelo processamento em alta qualidade com a nuvem densa. Uma imagem do modelo final gerado para a Frente 1 é apresentada na Figura 4.21. Sua nuvem densa é composta por 31.869.543 pontos, a superfície triangular por 3.193.916 vértices e 6.373.899 faces. Ao todo foram extraídas as atitudes de 115 descontinuidades (Anexo 6), sendo que 12 delas correspondem a planos utilizados como referência.

Figura 4.21 – Aspecto geral do modelo da Frente 1, com os planos de descontinuidade utilizados como referência em amarelo e seus respectivos índices em branco, e os demais planos em vermelho. Orientação E-W.

Analisando os dados dos planos de referência (Tabela 4.7), observa-se um desvio de 4° a 29° entre as medidas obtidas em campo e as extraídas do modelo. Examinando individualmente cada caso, os maiores desvios podem estar relacionados à: grande irregularidade da superfície real (planos 2 e 7); distorção da superfície digital gerada (planos 4 e 5); superfície real curva (plano 11); e descontinuidade pouco persistente e muito oblíqua em relação ao talude (plano 12). Para os casos onde a irregularidade da superfície real é grande, o desvio angular pode ser entendido como uma diferença de ajuste aos dados. As medidas tomadas com bússola, além do erro associado ao equipamento, representam apenas uma pequena parte da superfície total, principalmente nos casos de planos muito extensos. Já aquelas obtidas digitalmente, correspondem a uma média de centenas de medidas tomadas *in situ*.

Já as diferenças associadas a distorções na superfície digital podem ser evitadas de duas maneiras: a primeira seria realizando um pré-tratamento das imagens para remoção de ruídos ou um pós-tratamento no modelo digital para correções; e a segunda é evitando planos que estejam distorcidos no momento da seleção, por exemplo regiões muito próximas às bordas do modelo ou subhorizontais.

As medidas de forma associadas aos planos demonstram que distribuições de dados próximas a pontual esperada, não necessariamente indicam planos com menor desvio angular em relação àqueles medidos em campo. Os valores de distribuição pontual de Vollmer inferiores a 0,9 associam-se a desvios angulares que variam de 5,6° a 16°.

Tabela 4.7 – Atitude dos planos medidas em campo e extraídas do modelo da Frente 1, com desvio angular entre as medidas, número de faces utilizadas para o cálculo no modelo digital e seus parâmetros de forma.

Plano	Medida campo	Medida modelo	Desvio angular (°)	Número de faces	K	P	G	R
1	220/28	232/28	5,626	40	23,82	0,85	0,14	0,01
2	352/87	008/86	16,001	330	26,11	0,88	0,05	0,07
3	320/73	333/71	12,521	6686	60,76	0,95	0,01	0,04
4	224/82	202/89	23,001	255	62,57	0,95	0,03	0,02
5	160/72	187/86	29,901	411	53,58	0,94	0,01	0,05
6	085/42	063/40	14,517	3918	77,33	0,96	0,02	0,02
7	048/83	029/82	18,862	7960	30,38	0,90	0,02	0,07
8	210/59	208/52	7,191	33	81,17	0,96	0,04	0,00
9	339/76	348/82	10,675	1802	26,67	0,88	0,04	0,07
10	040/81	035/81	4,938	84	80,07	0,96	0,03	0,01
11	334/85	357/71	26,438	190	62,20	0,94	0,04	0,02
12	006/72	008/88	16,120	66	24,15	0,87	0,07	0,06

Através da projeção estereográfica dos dados e agrupamento por *cluster* com raio de 30°, foram definidas 7 famílias (Tabela 4.8 e Figura 4.22). Observa-se que não foram identificadas famílias com mergulhos inferiores a 40°, o que pode ser explicado pela distorção ou ausência de superfícies sub-horizontais (paralelas à visada da câmera) no modelo, que podem sofrer oclusão no momento da aquisição de imagens. No caso da aquisição das imagens, não foi possível tomar fotos com visadas muito inclinadas para a geração do modelo, uma limitação imposta pela topografia da área. A utilização de equipamentos como VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) poderia suprir essa deficiência, sem aumentar demasiadamente os custos.

Tabela 4.8 – Atitude das famílias identificadas através da projeção estereográfica dos dados extraídos do modelo digital da Frente 1.

Família	Atitude	Número de dados
f1_F1	337/69	50
f1_F2	241/88	15
f1_F3	039/85	9
f1_F4	185/89	8
f1_F5	263/88	6
f1_F6	218/41	6
f1_F7	064/40	5

Figura 4.22 – Estereogramas dos dados de planos extraídos do modelo digital da Frente 1 agrupados por família. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 115 polos.

4.3.3.1. Scanlines virtuais

A amostragem linear virtual, realizada nos mesmos locais que as linhas amostradas em campo com uso de bússola (Figura 4.4), gerou ao todo 43 dados: 33 para a linha equivalente a amostragem com bússola da Scanline 1c (Scanline 1v), e 10 para a linha equivalente a Scanline 2c (Scanline 2v). Esta diferença no número de dados pode ser explicada pelo fato de que as linhas amostradas em campo localizam-se muito próximas à base do talude, região onde há a maior distorção do modelo. Além disso, os planos de menor extensão amostrados em campo podem não ser visíveis no modelo em decorrência da resolução espacial das fotografias. Os parâmetros calculados para cada conjunto de dados são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Parâmetros calculados para o conjunto de dados das scanlines 1v e 2v.

	Scanline 1v	Scanline 2v
Frequência (fratura/ m)	0,441	0,490
Espaçamento médio (m)	2,267	2,041
Média dos espaçamentos (m)	2,318	2,267
RQD* 0,1 m (%)	99,91	99,88
RQD* 0,3 m (%)	99,20	99,02
RQD* 1,0 m (%)	92,71	91,28
Número total de dados	33	10

Os valores de RQD* obtidos para as linhas de amostragem virtuais também classificam o maciço como de muito boa qualidade (> 90%), porém, são observadas algumas diferenças em relação aos outros parâmetros calculados. Considerando as duas linhas virtuais, seus valores de frequência são muito próximos. Já comparando as linhas virtuais com seus equivalentes de campo, observa-se que a frequência obtida para a Scanline 2v (0,49 fraturas/m) é muito inferior àquela da Scanline 1c (2,749 fraturas/m). Estes dados corroboram com a sugestão anterior de uma limitação de amostragem imposta pela resolução espacial das fotografias, fazendo com que as linhas amostradas no modelo não tenham sensibilidade para planos muito pequenos e/ou pouco persistentes.

Através da projeção estereográfica das medidas obtidas e análise por *cluster* com raio de busca de 30° (Figura 4.23), foi possível identificar 4 famílias de descontinuidades (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Atitude das famílias identificadas através da projeção estereográfica dos dados extraídos das linhas de amostragem virtual (Scanline 1v e Scanline 2v) da Frente 1.

Família	SV_F1	SV_F2	SV_F3	SV_F4
Atitude média	329/55	001/76	035/78	259/76
Número de dados	13	12	8	5
Frequência (Fratura/ m)	0,136	0,126	0,084	0,052
Espaçamento médio (m)	7,331	7,942	11,913	19,060
Média dos espaçamentos (m)	7,032	7,671	12,962	19,557
Persistência	1 – 5 m	0,5 – 7 m	1 – 6 m	1 – 6 m

Figura 4.23 – Estereogramas dos dados de planos extraídos das linhas de amostragem Scanline 1v e Scanline 2v, agrupados por família. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 43 polos.

A fim de comparar as famílias obtidas através dos dois métodos de amostragem linear, suas atitudes médias obtidas nos dois casos foram lançadas em projeção estereográfica (Figura 4.24). Para os pares de famílias similares, foi calculado o desvio angular entre seus polos e os parâmetros calculados para cada amostragem foram analisados em conjunto (Tabela 4.11). Observa-se que não existem diferenças significativas entre os valores de frequência e espaçamento, porém a amostragem virtual apresentou maiores valores de persistência. Esta diferença pode ser justificada pelo fato deste parâmetro ser o de maior dificuldade de mensuração em campo, o que pode levar a um subdimensionamento das discontinuidades.

O estereograma da Figura 4.24 mostra, ainda, que a família SV_F3 posiciona-se entre as famílias F1 e F4, que por sua vez apresentam grande dispersão de dados, como apresentado na Figura 4.11.

Figura 4.24 – Estereograma com os polos das famílias de descontinuidades identificadas através da amostragem linear com bússola (F) e da amostragem virtual (SV). Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 10 polos.

Tabela 4.11 – Tabela comparativa dos parâmetros calculados para as famílias similares identificadas pela amostragem virtual e com bússola.

Famílias	SV_F1 // F2	SV_F2 // F4	SV_F4 // F5
Desvio angular (°)	14,03	22,20	25,23
Frequência (Fratura/ m)	0,136 // 0,147	0,126 // 0,090	0,052 // 0,049
Espaçamento médio (m)	7,331 // 6,805	7,942 // 11,136	19,060 // 20,417
Média dos espaçamentos (m)	7,032 // 6,800	7,671 // 11,944	19,557 // 17,130
Persistência	1 – 5 m // 1 – 3 m	0,5 – 7 m // < 1 m	1 – 6 m // 1 – 3 m

4.3.4. Frente 2

Para a Frente 2 foram tiradas e utilizadas 48 fotos, de uma mesma altura, para a criação do modelo digital, segundo os mesmos procedimentos adotados para a geração do modelo da Frente 1. Os pontos obtidos no georreferenciamento e os erros associados podem ser vistos na Tabela 4.12. O erro total de georreferenciamento é de 0,100942 m.

Tabela 4.12 – Coordenadas dos pontos utilizados para georreferenciamento da Frente 2. O ponto PC2_R não apresenta erro associado pois não foi utilizado no registro das imagens, apenas como referência para os demais pontos.

Ponto	N (m)	E (m)	Z (m)	Erro (m)	Projeções
PC2_R	7410635,597	302836,354	820,000	-	-
PC2_1	7410638,927	302831,424	822,960	0,103684	4
PC2_2	7410639,347	302835,204	823,540	0,133490	5
PC2_3	7410639,387	302836,424	822,030	0,044700	7

Sua nuvem densa é composta por 27.244.918 pontos, a superfície triangular por 2.731.286 vértices e 5.448.956 faces. Ao todo, foram extraídas as atitudes de 86 discontinuidades (Anexo 9), sendo que 9 delas correspondem a planos utilizados como referência (Tabela 4.13 e Figura 4.25). As medidas obtidas apresentam desvio angular variando de 5° a 70°. Analisando os planos individualmente, percebeu-se que as maiores diferenças estão associadas a: planos sub-horizontais e com formação de sombra (plano 1); superfície real muito irregular (plano 9); superfície digital com distorção (planos 2 e 7); e superfície muito pequena, com possíveis degraus (planos 3 e 4). Além disso, observa-se que a maioria dos planos possui pequena extensão, o que faz com que o número de faces selecionadas seja limitado a apenas algumas centenas.

As medidas de forma dos dados, da mesma maneira que na Frente 1, não se correlacionam diretamente com os desvios observados. Valores de distribuição pontual de Vollmer inferiores a 0,9 são associados a desvios angulares de 5° a 31°.

Os valores de desvio angular entre as medidas de campo e as da amostragem virtual são maiores para a Frente 2 do que para a Frente 1. Algumas hipóteses para essa diferença podem ser argumentadas, como maior geração de sombra na Frente 2, resultante da inclinação negativa em partes do talude e de sua menor variação de cor e uma possível distorção do modelo em decorrência do formato curvo do talude, conferindo um aspecto côncavo, que tem por consequência direta observável a grande distorção das bordas do modelo.

Figura 4.25 – Aspecto geral do modelo da Frente 2, com os planos de descontinuidade utilizados como referência em amarelo e seus respectivos índices em branco, e os demais planos em vermelho. Orientação W-E.

Tabela 4.13 – Atitude dos planos de referência medidas em campo e extraídas do modelo da Frente 2, com desvio angular entre as medidas, número de faces utilizadas para o cálculo e seus parâmetros de forma.

Plano	Medida campo	Medida modelo	Desvio angular (°)	Número de faces	K	P	G	R
1	342/20	360/89	70,024	97	36,82	0,91	0,04	0,05
2	009/80	029/65	24,203	360	92,03	0,96	0,01	0,02
3	294/81	329/74	34,831	484	49,51	0,94	0,02	0,04
4	339/79	331/50	29,853	338	21,05	0,85	0,12	0,03
5	338/78	335/73	5,782	328	212,48	0,98	0,01	0,01
6	009/83	007/78	5,375	6080	20,89	0,85	0,04	0,10
7	033/84	004/82	28,847	3139	22,06	0,85	0,09	0,06
8	259/89	246/87	13,144	169	109,51	0,97	0,02	0,01
9	333/78	308/57	31,050	216	19,47	0,83	0,09	0,07

A partir da projeção estereográfica dos dados obtidos da amostragem de planos no modelo digital da Frente 2 (Figura 4.26), foram definidas 4 famílias por análise de *cluster* com raio de 30° (Tabela 4.14). A diferença de padrão de faturamento observada em campo é

confirmada pelos dados produzidos na amostragem virtual de discontinuidades, onde é possível identificar uma menor dispersão dos dados em comparação com aqueles obtidos para a Frente 1.

Verifica-se ainda que, neste caso, estão presentes planos com mergulhos sub-horizontais (11°), constituindo uma família. Esta diferença pode ser explicada tanto pelo faturamento diferenciado como pelas características do modelo. A Frente 2, além de menor, foi fotografada com maior proximidade, gerando assim um modelo mais detalhado que aquele obtido para a Frente 1.

Figura 4.26 – Estereogramas dos dados de planos extraídos do modelo digital da Frente 2 agrupados por família. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 86 polos.

Tabela 4.14 – Atitude das famílias identificadas através da projeção estereográfica dos dados extraídos do modelo digital da Frente 2.

Família	Atitude	Número de dados
f2_F1	003/85	40
f2_F2	339/69	24
f2_F3	290/11	6
f2_F4	250/81	5

4.4. Discussão

O método proposto mostrou-se eficiente e simples, podendo ser reproduzido com certa facilidade e ampliando o uso dessa ferramenta inclusive para pessoas sem treinamento prévio em fotogrametria. Mesmo assim, algumas observações feitas durante o desenvolvimento do trabalho merecem ser ressaltadas.

No que diz respeito à etapa de preparação para a aquisição das fotos da Frente 1 (locação de pontos de controle e seu exame topográfico através da estação total), as maiores dificuldades encontradas foram em relação à transferência da estação total para ser estacionado em um ponto que tivesse uma vista desobstruída de todo o talude, pois era importante que todos os pontos de controle estivessem visíveis a partir da estação. Este procedimento pode ser demorado se o profissional que o executa não tiver certa experiência com o equipamento. Os pontos foram posicionados na frente de forma a não serem colineares, porém existe a limitação da altura da pessoa que os posiciona, considerando ainda que o acesso à frente pode, por vezes, ser dificultado ou impossibilitado devido a questões de segurança. Outro cuidado que teve de ser tomado é que os pontos não podem ficar muito próximos das bordas das fotografias, onde ocorre maior distorção da imagem, o que pode causar um erro no seu posicionamento no momento do georreferenciamento.

Outra dificuldade durante a aquisição da Frente 1 é que o uso do tripé gera incômodo, devido ao seu peso que tem de ser carregado ao longo das bancadas, o que pode tornar o processo desconfortável. Porém, seu uso, mesmo que desnecessário segundo as recomendações do sistema, garante maior estabilidade e, portanto, maior qualidade nas fotos. Esta dificuldade pode ser superada alterando-se as configurações de velocidade de disparo da câmera, garantindo que as fotos obtenham uma boa qualidade mesmo sem o uso do tripé. Por fim, nesta etapa foi observado que pode haver uma limitação de equipamento, já que as fotos salvas em dois formatos (JPEG e RAW), consomem uma grande quantidade de memória da câmera.

Durante a seleção dos planos de descontinuidade, é importante que o usuário rotacione diversas vezes o modelo a fim de visualizar os planos nas diversas orientações. A textura

conferida pelas fotografias pode atrapalhar no momento da seleção, pois a uniformidade de cores pode confundir o usuário. Um bom recurso é a visualização do *wireframe* do modelo, disponibilizada pelo *MeshLab*, que ajuda a selecionar os planos de melhor qualidade e diminui a influência das cores na superfície.

As medidas de forma dos dados – calculadas para os planos com superfície visível amostrados nos modelos digitais – não apresentaram correlação direta com os desvios angulares observados entre as atitudes obtidas através da amostragem tradicional e a amostragem virtual. Esta constatação faz com que os parâmetros de forma não possam ser utilizados como indicadores de “qualidade” dos planos selecionados.

Analisando os dados das orientações médias de famílias obtidas através da amostragem convencional com bússola e digital nas Frentes 1 e 2, é possível agrupar os dados em 4 famílias, com variação menor que 20° entre as medidas, sendo que três delas comportam os dados de campo e os digitais das duas frentes (Figura 4.27). Duas famílias, obtidas pela amostragem de planos e pela amostragem linear virtual da Frente 1, encontram-se em posição intermediária aos agrupamentos, na zona onde há grande dispersão dos dados da amostragem de campo. Famílias com mergulhos baixos foram identificadas nas amostragens de planos das Frentes 1 e 2, porém não encontram-se bem representadas na amostragem com bússola, contando apenas com alguns dados. Essa diferença se deve ao viés provocado pela amostragem linear, que não é capaz de identificar planos sub-horizontais ou de baixo mergulho com direção paralela a linha de amostragem. Na amostragem por área – no caso do trabalho feita em toda a área do talude – esta deficiência pode ser superada.

Figura 4.27 – Estereograma dos dados de atitudes médias das famílias identificadas nos dados digitais e de campo das Frentes 1 e 2, agrupados em pequenos círculos de raio 20° . Os quadrados pretos e vermelhos indicam, respectivamente, as famílias definidas para a amostragem virtual de planos nas frentes 1 e 2; os triângulos verdes as famílias definidas para as scanlines tradicionais (Scanlines 1c e 2c); e os círculos azuis as famílias definidas para a amostragem linear virtual (Scanlines 1v e 2v). Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior, 21 polos.

5. CONCLUSÕES

A aplicação da técnica de fotogrametria terrestre com uso de *software* baseado em *Structure from Motion*, aliada as rotinas de cálculo de atitude de planos, foi considerada bem sucedida na avaliação de descontinuidades em taludes em rocha nas áreas selecionadas. A comparação dos resultados obtidos através da amostragem tradicional, com uso de bússola, e da amostragem virtual mostrou que o uso de modelos tridimensionais é viável e confiável. Dentre as principais vantagens observadas neste estudo, destacam-se:

- ✓ Facilidade de aquisição dos dados em comparação com a fotogrametria tradicional, bem como no processamento destes dados, sem a necessidade de conhecimentos prévios aprofundados da técnica, tornando-a acessível a uma maior diversidade de aplicações;
- ✓ Rapidez de aquisição dos dados em comparação com a linha de varredura tradicional, com a diferença que no método virtual, há a geração de um registro permanente e confiável;
- ✓ Facilidade de reprodução do método;
- ✓ Baixo custo comparado a técnicas similares, como *scanner* a laser terrestre (LiDAR)
- ✓ Diversidade de métodos de orientação e georreferenciamento do modelo digital, que fornecem maior ou menor precisão espacial, dependendo da aplicação desejada;
- ✓ Flexibilidade do método para adequação segundo o uso desejado.

Em contrapartida, algumas limitações da aplicação do método na análise de descontinuidades em escavações a céu aberto devem ser mencionadas:

- ✓ A aplicação a rochas com pouca variação de cor e textura, bem como a taludes muito irregulares que favoreçam a formação de zonas de sombra, deve ser conduzida com cautela, pois as distorções geradas no modelo tridimensional podem afetar a qualidade dos dados produzidos;
- ✓ Para a amostragem linear, o método apresenta uma limitação em função da resolução espacial alcançada com as fotografias, o que pode afetar as frequências obtidas para as famílias de descontinuidades;
- ✓ Os parâmetros de forma dos dados não indicam em absoluto a confiabilidade das atitudes calculadas. Na seleção de planos, deve-se evitar zonas distorcidas e/ou de sombra;

- ✓ Locais onde a topografia não permite a aquisição de fotografias em variadas alturas e posições podem gerar um modelo deficiente. Nestes casos, o uso de um VANT pode corrigir esta deficiência.

Por fim, ressalta-se que o uso da fotogrametria deve estar sempre aliado ao mapeamento de campo e a amostragem convencional, já que esta fornece dados importantes como rugosidade, preenchimento e abertura das descontinuidades. Sua utilização deve ser no intuito de complementar os dados obtidos em campo.

Algumas aplicações alternativas da técnica e dos programas utilizados podem ainda ser sugeridas, como o uso da seleção de planos em uma amostragem por área virtual; geração de diversos modelos criando uma série temporal para acompanhamento de evolução da frente de lavra; geração de modelos digitais para pilhas de rejeito para cálculo de volume; e geração de modelos tridimensionais de afloramentos ou locais de importância geológica para registro permanente.

Como sugestões de desenvolvimento futuro, podem ser implementadas rotinas para cálculo de espaçamento real virtual, erosão do modelo com base nos planos selecionados para uma modelagem 3D mais completa e a aplicação nas medidas de forma (rugosidade de primeira e segunda ordem) de descontinuidades, como grandes falhas, que possuem uma importância significativa na análise de estabilidade de obras.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL 1983. *Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos*. Tradução nº 12, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Comitê Brasileiro de Mecânica de Rochas. São Paulo, 132 p.
- Agisoft 2014. Agisoft Photoscan User Manual. Disponível em: <http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_1_en.pdf>. Acesso em: 10 fev 2015.
- Almeida F.F.M. de 1944. *Collenia Itapevensis* sp. N. – um fóssil pré-cambriano do Estado de São Paulo. *Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, Boletim I*, **45**: 89-106.
- Almeida F.F.M. de 1957. Novas ocorrências de fósseis no Pré-Cambriano brasileiro. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **29**(1): 63-72.
- Almeida F.F.M de, Amaral G., Cordani H.G., Kawashita K. 1973. The Precambrian evolution of South American cratonic margin, South of Amazon River. In: Nairs A.E.M. & Stehli F.G. (eds.) *The ocean basins and margins*. New York, Plenum Press, vol. I, p. 411-446.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. *Earth-Science Reviews*, **17**(1/2): 1-29.
- Assali P., Grussenmeyer P., Villemin T., Pollet N., Viguier, F. 2014. Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. *Journal of Structural Geology*, **66**:102-114.
- Barton N. 1973. Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, **7**:287-332.
- Barton N.R. e Choubey V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, **10**:1-54.
- Barton N.R., Lien R., Lunde J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech. Rock Eng.*, **6**(4):189-239.
- Bergmann M. 1988. *Caracterização estratigráfica e estrutural da sequência vulcano-sedimentar do grupo São Roque - na região de Pirapora do Bom Jesus - Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 167 p.

- Bergmann M. 1991. Litoestratigrafia e paleo-ambiente do Grupo São Roque na região de Pirapora do Bom Jesus. *In: JORNADA CIENTÍFICA*, São Paulo. *Boletim IGUSP, Publicação Especial*. São Paulo: USP. Nº 09, p. 107-109.
- Bieniawski Z.T. 1973. Engineering classification of rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, **15**:335-44.
- Bistrichi C.A. 1982. *Geologia do Sinclínio de Pirapora, SP*. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 92 p.
- Boufama B., Mohr R., Veillon F., 1993. Euclidean constraints on uncalibrated reconstruction. *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision*, Berlin, Germany, p. 466-470.
- Campos Neto M. da C., Basei M.A.S., Artur A.C., Silva M.E., Machado R., Dias Neto C.M., Fragoso-Cesar A.R., Souza A.P. 1983. Geologia das Folhas de Piracaia e Igaratá. *In: 1ª JORNADA SOBRE A CARTA GEOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO EM 1:50.000. Atas...* São Paulo: IPT /Pró-Minério.
- Campos Neto M. da C. 2000. Orogenic systems from southwestern Gondwana: an approach to Brasiliano-Pan African cycle and orogenic collage in southeastern Brazil. *In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds.) Tectonic Evolution of South American. In: XXXI INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS*, Rio de Janeiro, Brazil. p. 335-365.
- Coelho L. e Brito J. N. 2007. *Fotogrametria digital*. Rio de Janeiro, EdUERJ, 196 p.
- Cordani U.G., Rocha Campos A.C., Davino A., Bjornberg A.J.S. 1961. Geologia da região do Jaraguá, SP. *Boletim Soc. Bras. de Geol.*, **10**(2):73-91.
- Cordani U.G., Kawashita K. 1971. Estudo geocronológico pelo método Rb-Sr de rochas graníticas intrusivas no grupo Açungui. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 25, 1971, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBG. p.105-110.
- Coutinho J.M.V. 1955. Metaconglomerado e rochas associadas no município de São Paulo. *Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo*, São Paulo, nº 186, p. 5-56.
- Coutinho J.M.V. 1972. Petrologia do Pré-cambriano de São Paulo e arredores. *Boletim IGUSP*, **3**:5-99.
- Coutinho J.M.V., Rodrigues E.P., Suemitsu A., Juliani C., Beljavskis P., Perosa P.T.Y. 1982. Geologia e petrologia da seqüência vulcano-sedimentar do Grupo São Roque na Serra do

- Itaberaba, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG. nº 02, p.83-91.
- CPT – THE CENTER FOR PHOTOGRAMMETRIC TRAINING 2008. *History of Photogrammetry*. Curtin University, Austrália, 36 p. Disponível em: <<https://spatial.curtin.edu.au/local/docs/HistoryOfPhotogrammetry.pdf>>. Acesso em: 10 fev 2015.
- Crosta G. 1997. Evaluating Rock Mass Geometry From Photogrammetric Images. *Rock Mech. Rock Eng.*, **30**(1): 35-38.
- Deb D., Hariharan S., Rao U.M., Ryu C. 2008. Automatic detection and analysis of discontinuity geometry of rock mass from digital images. *Computers & Geosciences*, **34**: 115-126.
- Deere D.U., Hendron A.J., Patton F.D., Cording E.J. 1967. Design of surface and near surface construction in rock. In: Fairhurst C. (ed.) *Failure and breakage of rock*, proc. 8th U.S. symp. rock mech., New York, Soc. Min. Engrs., Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs., p. 237-302.
- Deere D.U. e Deere D.W. 1989. Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years. *US Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station*, 100 p.
- Dellaert F., Seitz S., Thorpe C., Thrun S. 2000. Structure from Motion without Correspondence. In: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. *Proceedings...*, v. 2, p. 557-564.
- Derby O.A. 1878. Geologia da região diamantífera da Província do Paraná no Brasil. *Arq. Mus. Nac.*, Rio de Janeiro, v. III, p.89-96.
- Ellert R. 1964. *Geologia da Região de Mairiporã, SP*. Tese de Livre Docência, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP, 75 p.
- Fernandes F.S. 2010. *Aplicação de fotogrametria terrestre digital na análise de descontinuidades em maciços rochosos: exame comparativo com técnicas tradicionais*. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 126 p.
- Fisher R. 1953. Dispersion on a sphere. *Proc. Royal Society London*, A217, p. 295-305.
- Förstner W. 1986. A feature-based correspondence algorithm for image matching. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **26**: 150-166.
- Franklin J. A., Maerz N. H., Bennet C. P. 1988. Rock mass characterisation using photoanalysis. *Int. Journal of Mining and Geological Engineering*, **6**: 97-112.

- Gomes C.B. 1962. Contribuição ao Conhecimento dos Anfibolitos da Região do Jaraguá, SP. *Bol. Soc. Bras. Geol.*, **11**(1), 57-78.
- Gonzaga de Campos L.F. 1889. Secção Geológica. *Relatório da Comissão Geographica e Geológica da Província de São Paulo*, São Paulo, p. 21-34.
- Hagan T. O. 1980. A Case for Terrestrial Photogrammetry in Deep-Mine Rock Structure Studies. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **17**: 191-198.
- Harris C. e Stephens M. 1988. A combined corner and edge detector. In: *Fourth Alvey Vision Conference*, p.147-151.
- Hasui Y., Penalva F., Hennies W.T. 1969. Geologia do Grupo São Roque. In: 23 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Salvador. *Anais...* Salvador, p. 101-134.
- Hasui Y. 1973. *Tectônica da área das folhas de São Roque e Pilar do Sul*. Tese de livre docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 134p.
- Hasui Y. 1975. Evolução Polifásica do Pré-Cambriano a Oeste da Capital Paulista. *Bol. IG-USP*, **6**:95-107.
- Hasui Y., Carneiro C.D.R., Coimbra A.M. 1975. The Ribeira Folded Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, **5**: 257-266.
- Hasui Y., Sadowski G.R., Carneiro C.D.R. 1976. Considerações sobre a estratigrafia do pré-cambriano na região de São Paulo. *Bol. IG – USP*, **7**: 107-112.
- Hennies W.T., Hasui Y., Penalva F. 1967. O Falhamento transcorrente de Taxaquara. In: 21 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Curitiba. *Anais...* Curitiba, p. 159-168.
- Henrique-Pinto R. 2008. *Metaconglomerados e rochas associadas do Grupo São Roque a noroeste da cidade de São Paulo: proveniência e implicações para a idade da sedimentação*. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 82 p.
- Henrique-Pinto R. 2012. *Proveniência e ambiente de sedimentação do Grupo São Roque com base na química de rocha total e datação U-Pb de zircões detríticos*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 370p.
- Henrique-Pinto R., Janasi V.A., Vasconcellos A.C.B.C., Sawyer E.W., Barnes S.-J., Basei M.A.S., Tassinari C.C.G. 2015. Zircon provenance in meta-sandstones of the São Roque Domain: Implications for the Proterozoic evolution of the Ribeira Belt, SE Brazil. *Precambrian Research*, **256**: 271-288.
- Hudson J. A. e Harrison J. P. 1997. *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Elsevier, 444 p.

- IGG - INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO 1954.
Folha Geológica de Jundiaí, escala 1:100 000.
- IGG - INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO 1963.
Mapa Geológico do Estado de São Paulo (Brasil), escala 1: 1 000 000.
- IGG - INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO 1964.
Folha Geológica de Itu, escala 1:100 000.
- ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, COMMISSION ON
STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TESTS 1978. Suggested
Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *Int. J. of Rock
Mechanics and Mining Sciences* **15**: 319-368.
- Javernick L., Brasington J., Caruso B. 2014. Modelling the topography of shallow braided
rivers using Structure-from-Motion photogrammetry, *Geomorphology*, **213**:166-182.
- Juliani C., Beljavskis P., Schorscher H.D. 1986. Petrogênese do vulcanismo e aspectos
metalogenéticos associados: Grupo Serra do Itaberaba na região de São Roque (SP). *In*: 34
CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Goiânia. *Anais...* Goiânia, v.02, p.730-
750.
- Kurz C., Thormählen T., Siedel H. 2011. Visual Fixation for 3D Video Stabilization. *Journal
of Virtual Reality and Broadcasting*, **8**(2):12 p.
- Linkwitz K. 1963. Terrestrisch-photogrammetrische Kluftmessung. *Rock Mech. Eng. Geol.*
I:152-159.
- Loch C., Lapolli E.M. 1998. *Elementos Básicos da Fotogrametria e sua Utilização Prática*. 4
ed., Florianópolis. Ed. da UFSC, 86 p.
- Moraes Rego L.F. 1930. A geologia do petróleo no Estado de São Paulo. *Boletim do Serviço
Geológico e Mineralógico*, Rio de Janeiro, nº 46, 105 p.
- Moraes Rego L.F. 1933. Contribuição ao Estudo das Formações Pré-Devonianas de São Paulo,
São Paulo. *Inst. Astron. E Geogr.*, 43 p.
- Nicholas D.E. e Sims D.B. 2001. Collecting and using geologic structure data for slope design.
In: Hustrulid W.A., McCarter M.K., Van Zyl D.J.A. (eds.) *Slope Stability in Surface
Mining*. SME, Littleton, CO, p. 11-26.
- Niethammer U., James M.R., Rothmund S., Travelletti J., Joswig W. 2012. UAV-based remote
sensing of the Super Sauze landslide: evaluation and results. *Engineering Geology*, **128**: 2-
11.

- Oliveira E.P. 1925. Analyses de Calcários. *Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio*. Boletim **10**: 1-45.
- Patias P. 2001. Photogrammetry and Visualization. *Technical Report*, ETH Zurich. Disponível em: <<http://www.photogrammetry.ethz.ch/research/guest.html>>. Acessado em: 15 jan 2015.
- Pötsch M. 2011. *The analysis of rotational and sliding modes of failure for slopes, foundations, and underground structures in blocky, hard rock*. Tese de doutorado, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz, 237 p.
- Priest S.D. 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Ed. Chapman & Hall, 473 p.
- Priest S.D. e Hudson J.A. 1976. Discontinuity Spacings in Rock. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **13**: 135-148.
- Priest S.D. e Hudson J.A. 1981. Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **18**: 183-197.
- Read J. e Stacey P. 2009. *Guidelines for open pit slope design*. CSIRO Publishing, 496p.
- Rengers N. 1967. Terrestrial Photogrammetry: A Valuable Tool for Engineering Geological Purposes. *Rock Mech. Eng. Geol.* **V**: 150-154.
- Rorke A.J. e Brummer R.K. 1985. A Stereographic Mapping Technique. In: SANGORM Symposium on Rockmass Characterisation. Randburg: MINTEK: 117-119.
- Ross-Brown D.M., Wickens D.H., Markland J.T. 1973. Terrestrial photogrammetry in open pits. Part 2. An aid to geological mapping. *Trans. Inst. Mining & Metallurgy, Sect. A*, **83**(803): 115-130.
- Spetsakis M.E. e Aloimonos Y. 1991. A multi-frame approach to visual motion perception. *International Journal of Computer Vision* **6**: 245-255.
- Sturzenegger M. e Stead D. 2009a. Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Natural Hazards Earth System Sciences*, **9**: 267-287.
- Sturzenegger M. e Stead D. 2009b. Close-range terrestrial photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, **106**: 163-182.
- Sturzenegger M., Stead D., Elmo D. 2011. Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Engineering Geology*, **119**: 96-111.

- Sun S. 2013 *Automatic 3D Building Detection and Modeling from Airborne LiDAR Point Clouds*. Tese de doutorado, Rochester Institute of Technology, 139 p.
- Szeliski R. e Kang S.B. 1994. Recovering 3-D shape and motion from image streams using nonlinear least squares. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, **5**: 10-28.
- Tavani S., Granado P., Corradetti A., Girundo M., Iannace A., Arbués P., Muñoz J.A., Mazzoli S. 2014. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). *Computers & Geosciences*, **63**:44-53.
- Ullman S. 1979. *The Interpretation of Visual Motion*. MIT Press, Cambridge, 229 p.
- Vasuki Y., Holden E., Kovesi P., Micklethwaite S. 2014. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, **69**: 22-32.
- Vieten W. 1970. Die Ermittlung tektonischer Gefügedaten aus stereophotogrammetrischen Bruchwandaufnahmen. *Clausthaler Tektonische Hefte*, **10**: 319-336.
- Vollmer F.W. 1990. An application of eigenvalue methods to structural domain analysis. *Geological Society of America Bulletin*, **102**:786-791.
- Webb J.A. e Aggarwal J.K. 1982. Structure from Motion of Rigid and Jointed Objects. *Artificial Intelligence*, **19**: 107-130.
- Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, **179**:300-314.
- Whitmore G. e Thompson M. 1966. Introduction to Photogrammetry. In: Thompson M. (ed.), *Manual of Photogrammetry*, American Society for Photogrammetry, p. 1-16.

ANEXO 1 – Manual de uso dos programas utilizados

Manual para geração de modelo digital por fotogrametria e extração de atitude de descontinuidades

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	113
2 CONFIGURAÇÕES NECESSÁRIAS	114
3 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS	114
3.1 PASSO 1 – AQUISIÇÃO DAS FOTOGRAFIAS.....	114
3.2 PASSO 2 – GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL E GEORREFERENCIAMENTO	116
3.3 PASSO 3 – SELEÇÃO DOS PLANOS DE INTERESSE	119
3.4 PASSO 4 – USO DAS ROTINAS DESENVOLVIDAS	121
4 SOLUÇÃO DE PROBLEMAS.....	124

1. INTRODUÇÃO

Neste manual encontram-se detalhados os procedimentos para a geração de um modelo digital, desde a aquisição das fotografias até o georreferenciamento, e a extração de planos dos mesmos de acordo com o método proposto na dissertação. Para isso, um modelo teste (Modelo de validação), composto de planos de madeira é utilizado como exemplo. As instruções ressaltam cuidados necessários que devem ser tomados na geração de modelos tridimensionais de taludes em rocha e na seleção de planos de descontinuidade dos mesmos. Também são disponibilizadas as rotinas utilizadas durante o trabalho, bem como pequenos manuais de como utilizá-las e soluções para possíveis problemas que podem ocorrer durante o processamento. Os códigos das rotinas aqui referidas, juntamente com as fotografias do modelo de validação e modelos digitais gerados com o **Photoscan**, encontram-se disponíveis no CD em anexo.

Para melhor compreensão das instruções, todos os comandos, arquivos ou botões dos programas são referidos no texto *Desta Maneira*. Já os arquivos que devem ser substituídos de acordo com cada uso, são referidos **Desta Maneira**. Programas, bibliotecas, extensões de arquivos ou funções, são referidos **Desta Maneira**.

2. CONFIGURAÇÕES NECESSÁRIAS

Todas as instruções contidas neste manual referem-se a comandos utilizados em sistema operacional Windows 8.1. Para a geração de modelos complexos, recomenda-se o uso de computador com processador Intel Core i7 ou superior, e o mínimo de 8GB de RAM, sendo ideal 32GB para os modelos das frentes escavadas.

Para o correto funcionamento dos programas, é necessário primeiramente que o usuário instale os seguintes componentes:

- ✓ **Python:** linguagem de programação orientada a objetos, de fácil compreensão, utilizada na construção dos programas. Download disponível no site www.python.org/downloads
- ✓ **NumPy:** pacote numérico Python que facilita operações com vetores e matrizes. Download disponível no site www.numpy.org
- ✓ **NetworkX:** pacote Python para criação, manipulação e estudo de estrutura, dinâmica e funções de redes complexas. Download disponível no site <http://networkx.github.io>

3. DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS

3.1. PASSO 1 – Aquisição das fotografias

A aquisição de fotografias para uso em softwares de SfM é relativamente simples, já que para a reconstrução da cena não é necessária a adição de pontos de controle no objeto a ser imageado. Os pontos de controle, no caso do uso para cálculo de atitude de planos, têm por função georreferenciar e orientar o modelo gerado. Porém, algumas orientações devem ser seguidas para aumentar a eficiência do processamento e reduzir a quantidade de ruído no modelo gerado, sendo necessário um mínimo de planejamento de acordo com a aplicação desejada.

O programa selecionado para a criação dos modelos, **Agisoft Photoscan**, apresenta algumas recomendações em seu manual. Primeiramente, a intenção do programa é fornecer modelos adequados a uma pesquisa de caráter verdadeiramente fotogramétrico sem a necessidade do uso de câmeras métricas, sendo eficiente também com câmeras comuns. O sistema não possui nenhuma exigência de resolução das imagens, porém a qualidade dos resultados processados é influenciada diretamente pela resolução das fotografias. Portanto

recomenda-se a resolução mínima de 5Mpx e para resultados de qualidade profissional é recomendado o uso de câmeras com resolução de 12Mpx. Imagens de maior resolução também podem ser empregadas, mas é importante lembrar que seu processamento é mais demorado. Outra vantagem em relação a outros métodos fotogramétricos é que *software* baseados em SfM identificam automaticamente os parâmetros da câmera, dispensando o processo de pré calibração manual para lentes que constem em sua base de dados. Caso as fotografias sejam capturadas com lentes do tipo *fish-eye* ou grande angular a restituição do modelo pode ocorrer de forma inadequada, sendo recomendado o procedimento de pré calibração. Para maior qualidade das fotografias as fotos devem ser tiradas na resolução máxima permitida pela câmera. É preferível o uso de arquivos **RAW**, formato que mantém a imagem tal como captada pelo sensor, convertidas sem perda em **TIFF** (*Tagged Image File Format*), que é um formato raster de imagens. O uso de fotos no formato **JPEG** (*Joint Photographic Experts Group*) não é recomendado pois a compressão dos dados para este formato induz ruído indesejado nas imagens.

Idealmente as fotografias devem ser todas tiradas sob as mesmas condições de luminosidade, já que a identificação de pontos notáveis nas imagens é baseada na intensidade dos pixels. No entanto, resultados satisfatórios também podem ser obtidos com imagens tiradas em dias diferentes, e consequentemente condições de luminosidade distintas, porém a quantidade de pós processamento para remoção de ruídos aumenta. É importante garantir que em taludes muito irregulares não haja criação de áreas de sombra em porções muito proeminentes, pois estas áreas comprometem a restituição do modelo e podem encobrir planos de descontinuidade importantes.

Outro cuidado especial que deve ser tomado é o posicionamento da câmera em relação ao talude, de modo que não se formem zonas de oclusão e que a câmera esteja posicionada sempre perpendicular à face do talude (Figura A2.3.1). Não é necessário o uso de tripé, mas em casos em que haja necessidade de aumentar o tempo de exposição da foto, o uso do tripé pode ser vantajoso de modo a evitar fotos tremidas ou desfocadas. Fotos em “leque” devem ser evitadas pois causam mal funcionamento do processo e consequentes distorções ou falhas no modelo gerado.

Figura A2.3.1 – Posicionamento correto e incorreto da câmera em relação ao talude.

Não há uma quantidade ideal de fotografias que devem ser tiradas da frente escavada, porém é necessário garantir que haja sobreposição mínima de 60% horizontalmente e de 80% verticalmente entre as fotos e que toda feição que se queira representar apareça em pelo menos três fotografias. Por fim, as fotos devem conter o mínimo da cena de fundo, ou seja, a maior parte da imagem deve ser do objeto de interesse.

As fotos do modelo de validação, bem como as outras fotografias utilizadas no trabalho foram convertidas para **TIFF** utilizando o programa **XnConvert** (disponível para download em <http://www.xnview.com/en/xnconvert/>), porém esta etapa pode ser feita com qualquer outro programa de processamento de imagens que permita a conversão sem perda.

3.2. PASSO 2 – Geração do modelo digital e georreferenciamento

Para a geração do modelo digital, foi escolhido o programa **Photoscan**, da Agisoft. Este é um programa pago, porém oferece uma versão teste com duração de 30 dias, que pode ser obtida no site <http://www.agisoft.com/downloads/request-trial/>. Esta etapa também pode ser feita com uso de outros programas, como o **VisualSFM**, que é de código aberto, porém a qualidade do modelo gerado pode variar das estudadas neste trabalho (disponível para download em <http://ccwu.me/vsfm/install.html>).

O programa **Photoscan** tem uma interface muito simples e um fluxo de trabalho também simples. Todos os comandos aqui referidos são encontrados na versão Professional. Primeiramente é preciso carregar as fotos no sistema, o que pode ser feito com a criação de um *Chunk* (Add Chunk) e upload das fotografias no mesmo (Add Photos), ou das fotos

diretamente na guia *Workspace*. O trabalho em *chunks* permite a criação de partes do modelo separadamente, o que deixa o processamento mais leve, que podem posteriormente ser mescladas em um único modelo. Esta operação é indicada caso o processamento da máquina ou a quantidade de memória RAM seja baixa.

O procedimento seguinte, *masking*, é utilizado para a remoção de partes indesejáveis da cena. Ele não é obrigatório para o funcionamento do sistema, porém recomenda-se que seja feito quando necessário pois aumenta a eficiência da reconstrução do modelo. Clicando duas vezes sobre cada foto, uma nova aba é aberta com a fotografia selecionada. Utilizando a ferramenta *Intelligent scissors* o usuário seleciona com um polígono a parte que quer deletar da cena (árvores, céu, objetos, pessoas) e depois esta é adicionada à máscara com o comando *Add Selection* (Ctrl+Shift+A). Automaticamente a parte selecionada se torna cinza e passa a ser desconsiderada nas etapas seguintes do processamento (Figura A2.3.2).

Figura A2.3.2 – Para a remoção de áreas indesejadas, utilizar a ferramenta Intelligent Scissors (1), selecionar a área na foto (2) e clicar em Add Selection (3).

O passo seguinte consiste em seguir a ordem das operações que são liberadas no menu *Workflow*. Primeiramente o programa irá alinhar as fotos *Align Photos* de acordo com as feições que são reconhecidas automaticamente nas fotografias e gerará uma nuvem de pontos esparsa desses pontos com suas orientações relativas. Ao final do processo é possível ver a nuvem de pontos e as posições calculadas das câmeras. A seguir, são liberadas as opções *Build Dense Cloud* e *Generate Mesh*. Apesar de ser possível reconstruir a superfície apenas a partir dos dados esparsos, a qualidade da superfície gerada pode não ser adequada para

o uso geotécnico, principalmente se o programa não for capaz de reconhecer muitas feições notáveis nas fotos (por exemplo uma rocha sem grande variação de cor). O uso da opção Dense cloud gera uma nuvem de pontos de alta qualidade e densidade, comparável àquelas fornecidas por LIDAR. O programa utiliza as posições calculadas para as câmeras para gerar um mapa de profundidade para cada uma delas e as informações são combinadas para gerar a nova nuvem. A próxima etapa consiste na geração de uma malha (*mesh*) triangular utilizando os pontos da nuvem desejada como vértices (Generate Mesh). Para o uso em geotecnia aconselha-se a construção da malha a partir da nuvem densa, que possui maior detalhamento. Por fim, na etapa Build Texture, as cores das fotografias serão atribuídas a cada face da superfície gerada no processo anterior.

O georreferenciamento do modelo pode ser feito na etapa final, localizando os pontos no modelo, ou no início, atribuindo-se as coordenadas de cada ponto de controle visível nas fotografias. Nos dois casos, o procedimento é feito clicando-se no ponto de referência com o botão direito e selecionando a opção Create Marker. Automaticamente, na guia Ground Control, localizada no lado esquerdo da tela, o ponto criado é adicionado a uma tabela, onde suas coordenadas podem ser fornecidas com um duplo clique sobre a célula desejada. Para atribuir as coordenadas fornecidas ao modelo, basta clicar no botão Update, no topo da guia (Figura A2.3.3).

Figura A2.3.3 – Para a inserção de pontos de controle, clicar com o botão direito sobre o local que se quer adicionar o ponto e clicar em Create Marker (1). Depois, inserir as coordenadas dos pontos na guia Reference (2). Por fim, clicar em Update (3) para atribuir as coordenadas.

Se feito no começo, o procedimento de georreferenciamento auxilia na reconstrução, já que o programa utilizará as coordenadas fornecidas para afinar o posicionamento dos pontos no espaço. O programa permite que a definição das coordenadas seja feita através de pontos de controle no objeto ou pela posição da câmera, e ambos podem ser carregados de fonte externa ou inseridos manualmente no sistema. Para fins geotécnicos todas as maneiras de posicionamento de marcadores fornecidas pelo programa são eficientes, portanto recomenda-se a leitura do manual do programa para detalhamento dos procedimentos a serem seguidos.

3.3. PASSO 3 – Seleção dos planos de interesse

O modelo produzido no **Photoscan** deve ser então exportado no formato **.obj** (*Wavefront obj file*) ou **.stl** (*STereoLithography*) (`File> Export Model`) e carregado no **Meshlab** (`File> Import Mesh`) que é um programa de código aberto para processamento de nuvens 3D e malhas triangulares que pode processar nuvens com grande densidade de dados. Download disponível em <http://meshlab.sourceforge.net/>.

A seguir o usuário deve selecionar os planos de interesse com a ferramenta **ZPainting**, colocando a dureza no máximo para obter uma cor pura e reduzindo o tamanho do pincel para maior precisão na seleção (Figura A2.3.4). As estruturas podem ser separadas com cores diferentes e o usuário deve anotar os valores RGB das cores utilizadas para fornecer ao sistema na próxima etapa. A seleção deve ser feita de maneira cuidadosa para que planos diferentes não tenham conexões entre si, o que levaria o sistema a identifica-los como uma única feição.

Figura A2.3.4 – Para seleção dos planos, utilizar a ferramenta ZPainting (1), colocando a dureza do pincel no máximo. Depois, pintar a superfície do plano (2), controlando o tamanho do pincel de acordo com a necessidade.

O modelo com os planos selecionados deve ser então exportado no formato **.ply** (*Stanford Polygon File Format*), com a opção de codificação **ASCII** selecionada ao invés da binária padrão, e sem as coordenadas de textura (Figura A2.3.5).

Figura A2.3.5 – Opções que devem ser marcadas/desmarcadas no momento da exportação do arquivo .ply no MeshLab.

No caso de planos visíveis apenas pelo seu traço, ou linhas de amostragem virtual, ainda no programa **MeshLab**, deve-se selecionar a ferramenta **PickPoints**. Com ela, os pontos do início e fim da linha de amostragem devem ser selecionados clicando sobre eles com o botão direito do mouse, seguido da seleção de três pontos em cada traço, sendo dois nas extremidades e um no centro, onde a descontinuidade intercepta a linha de scan. As coordenadas destes pontos são então exportadas clicando-se em **Save** na caixa de diálogo da própria ferramenta (Figura

A2.3.6). É possível que sejam atribuídas siglas aos pontos, por exemplo letras iguais com índices diferentes para identificar pontos pertencentes a uma mesma descontinuidade.

Figura A2.3.6 – Para a seleção de traços no MeshLab, utilizar a ferramenta Pick Points (1). Selecionar os pontos do começo e fim da linha de amostragem (S1 e S2) e três pontos em cada traço, clicando sobre eles com o botão direito. Utilizar o botão Rename Point (2) para atribuir índices às descontinuidades. Salvar os pontos clicando em Save (3).

3.4. PASSO 4 – Uso das rotinas desenvolvidas

Todas as rotinas citadas a seguir encontram-se na pasta Programas no CD em anexo, juntamente com os arquivos de dados utilizados nos exemplos. Para seu uso conforme descrito, recomenda-se copiar a pasta completa para o diretório desejado no computador.

O uso do ply2atti

Para utilizar o **ply2atti**, clicar com o botão direito sobre a pasta ply2atti e depois clicar em Bash Prompt Here e a janela de comando para este diretório irá se abrir. O programa possui diversas funções embutidas e para obter ajuda sobre todas elas, é preciso digitar na janela de comando:

```
>python ply2atti.py -h
```

Da mesma maneira, para obter as atitudes dos planos selecionados basta digitar na janela de comando

```
>python ply2atti.py -f caminho_do_arquivo -n R,G,B
```

No caso dos planos terem sido pintados com mais de uma cor, estas devem ser escritas de forma sequencial, separadas por um espaço. Após o término do processamento, os resultados são salvos em arquivos de texto na mesma pasta do arquivo de entrada, dois para cada cor, sendo um contendo apenas as atitudes dos planos e outro com todas as informações.

Para a visualização dos centroides dos planos calculados, é preciso abrir o modelo **.ply** exportado do **MeshLab** no programa **CloudCompare** (File> Open) e depois, com o mesmo comando, abrir o arquivo texto com as coordenadas dos planos. A janela Open ASCII File será aberta, mostrando todos os dados contidos no arquivo. No topo da primeira coluna, abrir as opções e clicar em `coord. X` (Figura A2.3.7). Automaticamente as duas colunas seguintes serão substituídas por `coord. Y` e `coord. Z`. Depois basta clicar em OK. Na janela direita (DB Tree) agora é possível observar os dois arquivos que foram carregados. Para facilitar a visualização dos pontos carregados é possível alterar seu tamanho clicando sobre o arquivo na janela DB Tree e escolhendo o tamanho desejado na opção `Point size` na janela inferior direita Properties.

Figura A2.3.7 –Exemplo de carregamento de arquivo de pontos no programa Cloud Compare.

O uso do scanline

Para o uso da rotina para cálculo de amostragem linear virtual (**scanline**) é preciso clicar com o botão direito sobre a pasta `scanline`, e depois clicar em `Bash Prompt Here` na caixa que se abrir. Na janela de comando aberta, digitar:

```
python scanline.py caminho_do_arquivo
```

e pressionar `Enter`. Cabe lembrar que o arquivo exportado pela ferramenta `PickPoints` do **Meshlab** não possui extensão que deva ser colocada após o nome do arquivo. O programa retorna os valores na mesma janela na forma:

```
dipdir, dip, ponto, local, comprimento, ângulo
```

A linha de amostragem pode ser visualizada no próprio **MeshLab**, utilizando o comando `Load Points From File` na janela da ferramenta `PickPoints`.

O uso do ângulo

Para o uso do cálculo de desvio angular entre medidas é preciso clicar com o botão direito sobre a pasta `Angulo`, e depois clicar em `Bash Prompt Here` na caixa que se abrir. Na janela de comando aberta, digitar:

```
python angulo.py arquivo_1.txt arquivo_2.txt
```

e pressionar `Enter`. O programa retorna os valores na mesma janela na forma:

```
ângulo entre [medida_1_arquivo_1] e [medida_2_arquivo_2] ==> [ângulo_em_graus]
```

Caso queira acessar a opção ajuda, digite na janela de comando:

```
python angulo.py -h
```

4. SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Além dos erros que possuem aviso de solução fornecidos pelos programas, alguns problemas que podem ocorrer durante o processo merecem ser ressaltados. Sua descrição e possível solução são apresentadas a seguir.

✕ A malha está distorcida ou carrega em “fatias” no MeshLab

Caso o modelo gerado no **Photoscan** não esteja sendo corretamente carregado no **MeshLab**, o problema pode ser solucionado reduzindo-se as coordenadas utilizadas para o georreferenciamento. Coordenadas em UTM são muito grandes, e acabam sobrecarregando o sistema, fazendo com que a malha seja carregada de forma errônea. Nos testes realizados, o problema era solucionado removendo-se as duas primeiras casas das coordenadas E(X) e N(Y). Este procedimento não afeta as atitudes nem a escala do modelo, porém seu posicionamento geográfico é alterado. Sendo assim, para carregamento do modelo em programas de SIG ou no **Google Earth**, aconselha-se que o modelo seja exportado diretamente do **Photoscan** em formato **KMZ**.

✕ As atitudes dos planos de referência não são similares com as obtidas do modelo

No caso de as atitudes de planos selecionados não condizerem com as medidas de campo, uma possível solução do problema está relacionada ao item anterior. Para malhas muito complexas, o **MeshLab** não consegue carregar pontos com coordenadas extensas, e portanto ele as reduz. Porém, neste processo, os eixos do sistema de referência podem ser alterados, alterando assim as atitudes. Para o correto funcionamento, o **ply2atti** adota o sistema onde os eixos X, Y, Z correspondem, respectivamente, a E, N e Z positivo para cima. É possível conferir o alinhamento dos eixos no **MeshLab** através das opções View>Trackball>Reset Trackball, ou simplesmente com o comando Ctrl+H. Isso fará com que o programa volte a sua orientação original padrão, onde X é o eixo horizontal, positivo para a direita; Y é o eixo vertical, positivo para cima; e Z é o eixo ortogonal, positivo saindo da tela. Se porventura os eixos não coincidirem com a orientação descrita anteriormente, recomenda-se a mudança de coordenadas, proposta no item anterior.

✘ O ply2atti não processou a malha

Um erro observado durante os testes pode ser facilmente corrigido. Caso o **ply2atti** apresente uma mensagem de erro e não processe a malha, o erro deve estar no arquivo exportado do **MeshLab**. Quando o modelo é exportado do **Photoscan** com sua textura, o **MeshLab** a associa ao arquivo **.ply** exportado. Portanto, é necessário desmarcar a opção **TexCoord** na caixa **Wedge** no momento da exportação.

✘ O ply2atti gerou um arquivo vazio

Caso o arquivo gerado não contenha dados, é possível que a cor de referência fornecida ao programa esteja incorreta, e portanto este não é capaz de rastrear os planos. É importante conferir os valores RGB das cores utilizadas na seleção dos planos.

PLY2ATTI - ALGORITHM FOR EXTRACTION OF STRUCTURAL ATTITUDES FROM OUTCROP THREE-DIMENSIONAL MODELS

Viana, C.D.¹; Endlein, A.¹; Campanha, G.A.C.¹; Urtiga, L.A.¹; Oliveira, M.¹

¹Universidade de São Paulo

ABSTRACT: An algorithm for extracting the orientation of geological structures derived from three-dimensional models arising from photographs (PLY2ATTI) is presented. The main goal of developing such tool is to allow the acquisition of structural data more quickly and efficiently based on data coming from digital photogrammetry. The methodology initially consists in creating a three-dimensional model, which can be processed in any software for this purpose (AgiSoft Photoscan, VisualSFM, Stereoscan etc.). Then, the .obj or .stl file is opened in MeshLab, where the user with the ZBrush tool, taking care to place the brush in the maximum hardness and reduce its size to acquire greater accuracy of selection, selects the plans of interest. At this stage, it is possible to classify structures using different colors for each set of the selected plans. Afterward, the mesh data is exported in. ply (Stanford Polygon File Format) , selecting the option to ASCII encoding instead of the default binary . With the mesh, PLY2ATTI is executed, specifying the RGB values of the colors used in the classification. The program is able to generate a file for each data set or one with all the data. It is also possible to calibrate the measures providing the color and the dip direction of a known plan. The PLY2ATTI method uses linear algebra to extract the main axes of a tensor, which in this case represents the three-dimensional dispersion of the cloud points contained in the selected area around its centroid. Thus, the three eigenvalues and its eigenvectors represents the respective axes of the ellipsoid which best fits the data, since the ratio of the axes express the data shape. With this assumption, the smallest eigenvalue is much smaller compared to the other two values, which should be similar, then its eigenvector is the normal vector to the plane that best fits the selected data. As a result, the program generates a text file with the attitudes in dipdir/dip format that can be opened in the OpenStereo software for viewing stereographic projection and processing and interpretation of the measures. The tests show a high correlation between the data measured and extracted from three-dimensional models, indicating that the use of such technique is viable and comparable to the results obtained by the commercial purposes software.

KEY-WORDS: DIGITAL MODEL, PHOTOGRAMMETRY, STRUCTURAL GEOLOGY.

**ALGORITHMS FOR EXTRACTION OF STRUCTURAL ATTITUDES
FROM OUTCROP THREE-DIMENSIONAL MODELS**

Arthur Endlein¹, Camila Duelis Viana^{1,*}, Ginaldo Ademar da Cruz Campanha¹

* - Corresponding author

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil

Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, São Paulo, SP

05508-080, Brazil

Tel. +55 11 97448 2905

e-mail: camila.viana@usp.br, camila.duelis@gmail.com

¹ - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil

Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, São Paulo, SP

05508-080, Brazil

e-mail: ginaldo@usp.br (Ginaldo Ademar da Cruz Campanha)

e-mail: arthur.correia@usp.br (Arthur Endlein)

Abstract

The acquisition of geological attitudes on rock cuts using traditional field compass survey can be a time-cost and dangerous task when performed on high slopes or instability susceptible areas. The importance of this type of data in rock mass classifications and structural geology has led to the development of new techniques, in which the application of photogrammetric 3D digital models is of great use. The objective of this paper is to introduce new algorithms, written in Python programming language, for attitude calculation of virtual sampled discontinuities. Two sampling methods are proposed: a virtual scanline and a surface sampling. Application to digital models of a simplified test model and a rock cut, both generated using Agisoft Photoscan, demonstrate a good correlation between the surveys undertaken using traditional field compass reading and virtual sampling on 3D digital models.

Keywords

Discontinuity analysis, Python, Close-range photogrammetry, Structure-from-Motion (SfM)

1. Introduction

The geological attitude of planar rock discontinuities, such as joints and faults, is a very important data, as it is applied on numerous fields, from rock mass classification to structural geology. However, their acquisition by means of field mapping with compass measures can be a time-cost and sometimes even dangerous task, when it is performed on high slopes for example. This need has led to the development of safer, faster and low-cost techniques to acquire this kind of data.

The use of tridimensional models for geological features extraction is becoming more common in the past few years (Haneberg, 2008; Sturzenegger and Stead, 2009; Westoby et al., 2012; Assali et al., 2014; Vasuki et al., 2014). The development of more automated methods for virtual restitution has contributed directly with this progress. The diversity of Structure from Motion-based software, such as VisualSFM and Photoscan, made the 3D photogrammetric reconstruction of outcrops easy and accessible, as they can be performed with low-cost digital cameras and the system requirements are found on ordinary

computers. This popularization made the photogrammetry a valid alternative to the more expensive and complex method of laser scanning (Tavani et al., 2014).

In this paper, we present two algorithms for extraction of geological discontinuities attitudes from virtual outcrop models: ply2atti and scanline. The ply2atti algorithm allows the virtual sampling of discontinuities appearing on the 3D model as individual surfaces, giving their centroid coordinates, geological attitude and an estimation of their persistence. The scanline algorithm allows the sampling of discontinuities (surfaces and traces) along a virtual scanline, giving their position along the line, geological attitude and an estimation of their persistence. Two tests were performed: the first one using reference planes distributed on a local coordinates system and the second one on a slope located in a limestone open pit mine. It is first presented the algorithms description and its theoretical foundation. Then, it is generally illustrated the creation and export of the virtual test models using Agisoft Photoscan and the feature selection on MeshLab is presented. Finally, the results obtained are shown. The algorithms for geological attitude calculation were written in Python programming language, using the NumPy library and the NetworkX package.

2. Algorithms description

The representation of a planar rock discontinuity by means of a unit vector parallel to its pole is very useful when processing this type of data on computational environment, as they are a special matrix case. Considering the x, y, z axis referring, respectively, to East, North and vertical upwards, a plane with dip direction α and dip θ has the unit vector $\mathbf{u}$ parallel to its pole described by Eq. 1. The transformation of the unit vector back to geological attitude is calculated according to Eq. 2 and Eq. 3, comparing the sign to determine the dip direction quadrant.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \sin(\alpha) \sin(\theta) \\ \cos(\alpha) \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 1}$$

$$dip = \arccos(u_z) \quad \text{Eq. 2}$$

$$dip_{dir} = \text{atan2}(u_x, u_y) \quad \text{Eq. 3}$$

Two sampling methods were performed on a three dimensional digital model.

For sampling along a scanline (scanline algorithm), for each selected feature, considering three non-collinear points A, B, C, a perpendicular resultant vector $\mathbf{d}$ can be calculated as on Eq. 4. The normalized $\hat{\mathbf{d}}$ vector (unit vector) is then used to calculate the geological coordinates of the best-fit plane (Eq. 5). An approximate persistence value is given selecting the largest vector difference between the three points.

$$\mathbf{d} = (\mathbf{b} - \mathbf{a}) \times (\mathbf{c} - \mathbf{a}) \quad \text{Eq. 4}$$

$$\hat{\mathbf{d}} = \frac{\mathbf{d}}{\|\mathbf{d}\|} \quad \text{Eq. 5}$$

To calculate the discontinuity position along the line, considering an AB scanline and the discontinuity centroid point C, the projection vector $\mathbf{p}$ of the plane on the scanline is calculated according to Eq. 6. This procedure is similar to the one performed during a field scanline survey, as it gives the discontinuity nearest position on the measure tape.

$$\mathbf{p} = (\mathbf{c} - \mathbf{a}) \cdot \left(\frac{\mathbf{b} - \mathbf{a}}{\|\mathbf{b} - \mathbf{a}\|} \right) \quad \text{Eq. 6}$$

The sampling of individual recognizable discontinuity surfaces on the 3D model (ply2atti algorithm) is carried out in a different way. The digital measure of an extended surface on a digital model comprise a large number of points, unlike discrete compass measures at arbitrary locations (Sturzenegger and Stead, 2009). Each selected surface is analyzed as a graph (set of vertices connected by edges), identified by the algorithm based on its RGB color values. Considering a matrix comprising the vertices coordinates, the eigenvectors and eigenvalues of its covariance matrix represent the axes and relative lengths of the dataset best-fit ellipsoid. Being $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ the eigenvalues, three extreme shapes are expected: spherical for $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$, planar for $\lambda_1 = \lambda_2 \gg \lambda_3$ and linear for $\lambda_1 \gg \lambda_2 = \lambda_3$. Therefore, for planar discontinuities, the third eigenvector is parallel to the plane normal and, after being normalized, it can be used to calculate the geological attitude of the plane. Numerically, Vollmer (1990) describes the expected shapes through three ratios (Eq. 4). They represent, respectively, the data set proximity to the punctual (P), girdle (G) and random (R) distribution.

$$P = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)}{N} \quad G = \frac{2(\lambda_2 - \lambda_3)}{N} \quad R = \frac{3(\lambda_3)}{N} \quad \text{Eq. 4}$$

The directional data statistics can be done by several means. Fisher (1953) presents the Fisher distribution for the tridimensional unit vector modelling on a sphere. This distribution, symmetric about the mean, describes the angular distribution of orientations about a mean orientation vector. The probability density function is expressed by Eq. 5., where θ is the angular deviation from the mean vector and K is the “Fisher constant”. The Fisher K express the tightness or dispersion of the orientations about the mean vector. For data sets greater than 30 vectors, the value can be estimated by Eq. 6.

$$f(\theta) = \frac{K \sin \theta e^{K \cos \theta}}{e^K - e^{-K}} \quad \text{Eq. 5}$$

$$K \cong \frac{N-1}{N-R} \quad \text{Eq. 6}$$

The algorithm calculates the shape ratios and the Fisher K for the selected planes in order to guarantee that the selected features are planar. Additionally, the mean vector of the normal vectors belonging to each selected plane is calculated to give its centroid coordinates. An approximate persistence value is given calculating the distance between the extreme points for each plane.

3. Performed tests

3.1. Site description

In order to compare traditional field compass measures with virtually obtained attitudes, two different sites were surveyed using a Nikon D200 digital camera with a 28 mm focal length lens. The first one (Site 1) is composed of four wooden planes, used for didactical purposes, with different inclination angles and surface areas. They were randomly placed within a local coordinates system created on an outdoor planar surface using a compass and adhesive tape to place the x, y, z local axes parallel to East, North and vertical upwards, respectively. A measuring tape was used to mark 0.5 meters spaced points on the axes (Fig. 1). This points were used for further georeferencing. The four planes were field sampled using a traditional geological compass.

The second site (Site 2) is a 130 meters long and 40 meters high metadolomite rock cut in an open pit mine, located in Santana de Parnaíba city, São Paulo state, Brazil. For georeferencing, six ground control points were placed on the rock cut and surveyed using a Topcon GPT-3200N reflectorless total station. Two sampling lines and twelve individual discontinuity surfaces were field measured using a geological compass (Fig. 2).

The photogrammetric digital models were generated using Agisoft Photoscan Professional, following the recommended procedures described on the user manual (Agisoft, 2014). For more information about geological 3D digital models using Structure from Motion software, the reader should refer to Sturzenegger and Stead (2009) and Westoby et al. (2012).

3.2. Virtual sampling

For the virtual selection of discontinuities on the 3D digital models generated on Photoscan, we choose the exported .obj file format. The virtual selection of discontinuities can be carried in two different ways, both importing the .obj file on the MeshLab software.

For the selection of individual recognizable discontinuity surfaces on the digital model, the user manually select each desirable plane using the ZPainting tool, placing the hardness on its maximum and reducing the brush size according to the need, for greater precision. This procedure allows classifying different sets, based on geological or relevance criteria, using different colors during the selection. The RGB color values used in each selection are noted. The selection must be carried out carefully in order to guarantee that different surfaces do not share any connection, which may lead to the system to consider them as one only feature. For further processing, the painted digital model is exported in .ply file format, without binary encoding and texture coordinates.

The selection of a virtual sampling line is made manually using the PickPoints tool. First, the start-end points of the line are placed right clicking on their respective locations. Afterwards, for each individual recognizable surface and trace along the line, three points are placed: two at start-end and one mid-point. The user may find useful to change the point names in order to give indexes to each feature. The selected points are then exported on a .pp file format by the save tool option.

4. Results and discussion

4.1. Site 1

The resulting 3D digital model from 58 photographs comprises 971 040 vertices and 1 936 500 faces. The georeferencing total error acquired is 0.004881 meters. The scene was not completely reconstructed. The plane 3, possibly due to its inclination (70°), reduced size and shadow generation, presented deficiencies. The five wooden planes faces selected in MeshLab were processed using the ply2atti algorithm and the results are presented in Table 1. The resulting data shows that the angular deviation between traditional compass measuring and digital attitudes relies between $1 \text{ e } 4^\circ$. The highest difference is associated to the plane 3, which did not have its complete reconstruction. The shape parameters indicate punctual distribution of the data sets, consistent with the expected for planar discontinuities.

4.2. Site 2

For the rock cut 3D digital model 78 photographs were used, generating a 3 193 916 vertices and 6 373 899 faces surface. The georeferencing total error acquired is 0.023447 meters.

4.2.1. Individual planes (ply2atti algorithm)

Twelve individual recognizable discontinuity planes were selected using MeshLab and processed using ply2atti algorithm. The results are presented in Table 2. It is observed an angular deviation ranging from 4 to 29° between the traditional field compass measure and the virtual measures. Examining each plane, the greater deviations are associated to: irregularity and curviness of the real discontinuity surface on planes 2, 7 and 11; distortion of the digital generated surface on planes 4 and 5; little persistent and very oblique discontinuity on plane 12. To the cases where the discontinuities have a great irregularity the angular deviation can be understood as a data fitting difference. The measures undertaken using a traditional compass, besides the equipment-associated error, represent a small fraction of the total surface, especially on high persistent discontinuities. The digitally obtained attitudes are a mean value of various compass equivalent measures comprising the whole surface.

The differences associated to distortions on the generated digital surface can be avoided with pre or post-processing for noise removal. In addition, some selection limitations may apply to discontinuities close to the 3D digital model edges, where there is greater surface distortion.

The associated shape parameters demonstrate that near punctual data distribution not necessarily indicate a plane with lower angular deviation.

4.2.1.1. Virtual linear sampling (scanline algorithm)

The virtual linear sampling was performed at the same locations of the field scan lines. Table 3 shows the frequency, mean spacing and theoretical RQD (RQD*) results for the field and virtual surveys. It is observed a difference in the number of discontinuities measured by the two methods, which may be explained by the height limit on the field scanline positioning, placing them too close to the digital model edges. Furthermore, discontinuities of limited extension may not be visible on the digital 3D model due to the photographs spatial resolution. For both survey methods, the RQD* values classify the rock mass as very good quality (Deere and Deere, 1989).

Considering only the virtual scanlines, their frequencies are similar. However, considering the Scanline 2, the virtual frequency value is much smaller than that obtained for the field survey. This difference suggests a virtual sampling limitation imposed by the photographs spatial resolution, causing a lack of sensitivity to very small or less persistent discontinuities along the virtual sampling lines.

The measures obtained by both methods (Fig. 3) were classified into discontinuity sets by cluster analysis and the angular deviation between their sets mean attitudes were calculated (Fig. 4 and Table 4). The angular deviations between the sets mean attitudes poles range from 14.03 to 23.23 degrees. The studied rock mass presents a great scatter of measures and the discontinuity surfaces are often irregular and wavy, which difficult a cluster analysis and causes the attitudes obtained by the virtual sampling to be a mean surface of the discontinuity, unlike the discrete field compass measures. Therefore, this difference should be smaller when applying the virtual line sampling on more systematically fractured rock masses.

No significant differences on the frequency and spacing values obtained on both sampling methods are observed. However, virtual linear sampling presented greater persistence values. Persistence remains one of the most difficult rock mass parameters to quantify in field scan line surveys (ISRM, 1978), so the values obtained on the traditional field sampling may be undersized.

5. Conclusions

The application of the developed algorithms was successful. The comparison between the traditional field compass measures and virtual sampling results shows that the 3D digital models application on rock mass investigation is reliable. Some limitations on the applications should be noted: the virtual line sampling presents a limitation depending on the photographs spatial resolution; the shape parameters do not guarantee the reliability of the virtually sampled discontinuities calculated attitudes. Their selection must be carried out carefully to avoid distorted surfaces.

References

- Agisoft, 2014. Agisoft Photoscan User Manual. Available at: <http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_1_en.pdf>. Access on: 10 fev 2015.
- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N., Viguir, F., 2014. Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. *Journal of Structural Geology*, 66, 102-114.
- Deere, D. U. and Deere, D. W., 1989. Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years. US Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station, 100 p.
- Fisher, R., 1953. Dispersion on a sphere. *Proc. Royal Society London*, A217, 295-305.
- Haneberg, W. C., 2008 Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 67, 457-469.
- ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, COMMISSION ON STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TESTS 1978. Suggested

Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences* 15, 319-368.

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

Tavani, S., Granado, P., Corradetti, A., Girundo, M., Iannace, A., Arbués, P., Muñoz, J. A., Mazzoli, S., 2014. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). *Computers & Geosciences*, 63, 44-53.

Vasuki, Y., Holden, E., Kovesi, P., Micklethwaite, S., 2014. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, 69, 22-32.

Vollmer, F. W., 1990. An application of eigenvalue methods to structural domain analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 786-791.

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.

Figure captions

Fig. 1 – Screenshot of Site 1 digital model. PCV labeled points indicate ground control points.

Fig. 2 – Screenshot of Site 2 digital model with indication of the surveyed scanlines. PC1 labeled points indicate ground control points.

Fig. 3 – Stereographic projection of: (a) 43 poles obtained by virtual line sampling; (b) 88 poles obtained by traditional field line sampling. Schmidt-Lambert diagram, lower hemisphere.

Fig. 4 – Stereographic projection of joint sets obtained by traditional scanlines (F) and virtual line sampling (SV). Schmidt-Lambert diagram, lower hemisphere

Table captions

Plane	Compass reading	Digital attitude	Angular deviation (°)	Number of faces	K	P	G	R
1	183/10	182/08	2,006	4733	579,77	0,99	0,01	0,00
2	235/20	232/20	1,026	7885	1042,81	1,00	0,00	0,00
3	040/70	035/71	4,818	338	44,53	0,93	0,02	0,05
4	133/20	135/17	3,066	9903	530,44	0,99	0,00	0,00
5	180/90	179/88	2,236	29024	100,01	0,96	0,02	0,02

Table 1 – Geological attitude of the selected planes on Site 1 measured with compass and calculated by ply2atti algorithm. The angular deviation between the measures, number of digital model faces used for the calculation and the shape ratios are presented.

Plane	Compass reading	Digital attitude	Angular deviation (°)	Number of faces	K	P	G	R
1	220/28	232/28	5,626	40	23,82	0,85	0,14	0,01
2	352/87	008/86	16,001	330	26,11	0,88	0,05	0,07
3	320/73	333/71	12,521	6686	60,76	0,95	0,01	0,04
4	224/82	202/89	23,001	255	62,57	0,95	0,03	0,02
5	160/72	187/86	29,901	411	53,58	0,94	0,01	0,05
6	085/42	063/40	14,517	3918	77,33	0,96	0,02	0,02
7	048/83	029/82	18,862	7960	30,38	0,90	0,02	0,07
8	210/59	208/52	7,191	33	81,17	0,96	0,04	0,00
9	339/76	348/82	10,675	1802	26,67	0,88	0,04	0,07
10	040/81	035/81	4,938	84	80,07	0,96	0,03	0,01
11	334/85	357/71	26,438	190	62,20	0,94	0,04	0,02
12	006/72	008/88	16,120	66	24,15	0,87	0,07	0,06

Table 2 – Geological attitude of the selected planes on Site 2 measured with compass and calculated by ply2atti algorithm. The angular deviation between the measures, number of digital model faces used for the calculation and the shape ratios are presented.

	Field sampling		Virtual sampling	
	Scanline 1	Scanline 2	Scanline 1	Scanline 2
Frequency (joint/ m)	0.273	2.749	0.441	0.490
Mean spacing (m)	3.664	0.364	2.267	2.041
RQD* 0,1 m (%)	99.963	96.847	99.91	99.88
RQD* 0,3 m (%)	99.682	79.987	99.20	99.02
RQD* 1,0 m (%)	96.888	23.988	92.71	91.28
Number of poles	40	48	33	10

Table 3 – Calculated parameters for total data resulting from traditional field scanlines and virtual line sampling.

Sets (Virtual // Field)	SV_F1 // F2	SV_F2 // F4	SV_F4 // F5
Angular deviation (°)	14,03	22,20	25,23
Frequency (joint/ m)	0,136 // 0,147	0,126 // 0,090	0,052 // 0,049
Mean spacing (m)	7,331 // 6,805	7,942 // 11,136	19,060 // 20,417
Persistence	1 – 5 m // 1 – 3 m	0,5 – 7 m // < 1 m	1 – 6 m // 1 – 3 m

Table 4 – Comparison between joint set properties for the virtual mean set orientations and traditional sampling mean set orientations.

ANEXO 4 – Dados da linha de amostragem com bússola (Scanline 1c)

Informações Gerais												
Local		Data		Título		Direção						
Frente 1		20/05/2014		Scanline 1c		355 -> 175						
Natureza e Orientação da Descontinuidade												
distância (m)	tipo	mergulho	direção	persistência	terminação	abertura/ largura	natureza do preenchimento	rugosidade superficial	forma superficial	coeficiente de rugosidade JRC	fluxo de água	observações
0.00	fratura	69	124	1 m	2	fechada	sem preenchimento	lisa	plana	>20	seca	PC1_2
0.30	fratura	52	328	1 m	2	fechada	sem preenchimento	muito rugosa	plana	>20	seca	
0.50	fratura	63	17	1 m	2	fechada	sem preenchimento	lisa	plana	>20	seca	
1.00	fratura	68	312	1 m	2	fechada	sem preenchimento	lisa	plana	10	seca	
7.00	fratura	62	0	1,5 m	1	fechada	calcita	lisa	plana	8 - 10	seca	preenchimento fibroso
8.00	fratura	89	229	1 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	plana	8- 10	seca	
10.00	fratura	89	204	2,5 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	ondulada	6 - 8	seca	
13.00	fratura	80	106	1 m	2	fechada	sem preenchimento	lisa	irregular	6 - 8	seca	
15.00	fratura	88	228	1 m	2	fechada	calcita	lisa	plana	6 - 8	seca	
20.00	fratura	58	28	1,5 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	plana	16 - 18	seca	
23.00	falha	83	61	4 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	plana	16 - 18	seca	zona foliada decimétrica
25.00	fratura	71	269	1 m	1	fechada	sem preenchimento	degraus	plana	14 - 16	seca	
25.50	fratura	70	352	1 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	plana	6 - 8	seca	
30.60	fratura	70	335	2 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	plana	2 - 4	seca	calcário cinza bandado, fraturas paralelas ao acamamento
35.50	fratura	56	308	1 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	plana	2 - 4	seca	
39.00											seca	PC1_ 3- Fim da linha

ANEXO 4 – Dados da linha de amostragem com bússola (Scanline 1c) - Continuação

Informações Gerais												
Local		Data	Título				Direção					
Frente 1		20/05/2014	Scanline 1c				355 -> 175					
Natureza e Orientação da Descontinuidade												
distância (m)	tipo	mergulho	direção	persistência	terminação	abertura/ largura	natureza do preenchimento	rugosidade superficial	forma superficial	coeficiente de rugosidade JRC	fluxo de água	observações
0.72	fratura	46	272	2 m	2	fechada	sem preenchimento	lisa	plana	4 - 6	seca	
3.50	fratura	82	187	2 m	2	fechada	sem preenchimento	lisa	degraus	8 - 10	seca	
5.90	fratura	89	226	2 m	2	fechada	sem preenchimento	lisa	degraus	10 - 12	seca	
10.84	fratura	87	325	4 - 5 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	ondulada	8 - 10	seca	
13.70	fratura	75	182	5 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	degraus	6 - 8	seca	
14.00	fratura	79	303	5 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	ondulada	8 - 10	seca	
18.50	fratura	78	230	1,5 m	2	fechada	sem preenchimento	lisa	ondulada	6 - 8	seca	
21.60	fratura	42	85	10 m	1	fechada	sem preenchimento	lisa	degraus	4 - 6	seca	PC1_4
22.25	fratura	70	333	2 m	1	fechada	calcita	estriada	plana	4 - 6	seca	Estrias orientação 253,19, movimentação destrai

ANEXO 4 – Dados da linha de amostragem com bússola (Scanline 1c) - Continuação

[illegible]

ANEXO 5 – Dados da linha de amostragem com bússola (Scanline 2c)

Informações Gerais												
Local		Data		Título			Direção					
Frente 1		13/11/2014		Scanline 2c			255					
Natureza e Orientação da Descontinuidade												
distância (m)	tipo	mergulho	direção	persistência	terminação	abertura/ largura	natureza do preenchimento	rugosidade superficial	forma superficial	coeficiente de rugosidade JRC	fluxo de água	observações
0.21	junta	82	244	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	planar	8-10	0	
0.23	junta	84	158	<1m	2	0,1-2,5mm	limpo	suave	planar	8-10	0	
0.43	junta	88	119	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	planar	8-10	0	
0.46	junta	73	84	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	planar	8-10	0	
0.67	junta	76	288	1-3m	1	0,1-2,5mm	limpo	áspero	ondulado	12-14	0	
0.84	junta	55	303	1-3m	1	0,1-2,5mm	limpo	polido	ondulado	6-8	0	
1.00	junta	55	340	<1m	2	-	nanchas superficiais	suave	planar	2-4	0	
1.05	junta	24	95	<1m	2	0,1-2,5mm	nanchas superficiais	suave	planar	2-4	0	
1.37	junta	90	109	<1m	2	0,1-2,5mm	limpo	áspero	planar	8-10	0	
1.43	junta	80	245	<1m	2	0,1-2,5mm	limpo	áspero	planar	8-10	0	
1.51	junta	79	74	<1m	2	0,1-2,5mm	limpo	áspero	planar	8-10	0	
1.64	junta	54	317	1-3m	2	0,1-2,5mm	nanchas superficiais	áspero	planar	8-10	0	
1.93	junta	87	311	<1m	2	0,1-2,5mm	limpo	áspero	planar	8-10	0	
2.40	junta	89	184	<1m	2	0,1-2,5mm	limpo	áspero	planar	8-10	0	deste ponto até 3,06, blocos soltos cobrindo os planos
3.80	junta	84	87	<1m	2	0,1-2,5mm	limpo	áspero	planar	8-10	0	
3.91	junta	60	108	<1m	1	<0,1mm	limpo	suave	planar	10-12	0	
4.30	junta	75	88	<1m	1	10-100mm	limpo	suave	planar	10-12	0	
4.40	junta	58	262	<1m	0	-	limpo	suave	planar	10-12	0	
5.10	junta	84	340	<1m	2	-	nanchas superficiais	áspero	planar	12-14	0	
5.12	junta	85	87	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	planar	8-10	0	

ANEXO 5 – Dados da linha de amostragem com bússola (Scanline 2c)

Informações Gerais												
Local		Data		Título			Direção					
Frente 1		13/11/2014		Scanline 2c			255					
Natureza e Orientação da Descontinuidade												
distância (m)	tipo	mergulho	direção	persistência	terminação	abertura/ largura	natureza do preenchimento	rugosidade superficial	forma superficial	coeficiente de rugosidade JRC	fluxo de água	observações
5.15	junta	89	332	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	planar	8-10	0	
5.65	junta	60	32	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	planar	4-6	0	
6.07	junta	65	354	<1m	2	0,1-2,5mm	nanchas superficiais	suave	planar	6-8	0	
6.30	junta	69	359	<1m	2	0,1-2,5mm	nanchas superficiais	suave	planar	6-8	0	
6.53	junta	83	134	<1m	2	0,1-2,5mm	nanchas superficiais	suave	planar	6-8	0	
7.20	junta	87	298	<1m	2	-	limpo	suave	planar	14-16	0	
7.50	junta	64	359	1-3m	1	0,1-2,5mm	nanchas superficiais	suave	planar	8-10	0	
7.60	junta	12	253	1-3m	2	0,5-2,5mm	limpo	suave	planar	16-18	0	
7.98	junta	86	224	1-3m	1	<0,1mm	limpo	suave	planar	8-10	0	
8.05	junta	85	252	1-3m	1	<0,1mm	limpo	suave	planar	8-10	0	
8.34	junta	75	176	1-3m	1	<0,1mm	limpo	suave	planar	8-10	0	
8.58	junta	75	175	1-3m	1	<0,1mm	nanchas superficiais	suave	planar	8-10	0	
9.19	junta	89	84	1-3m	1	<0,1mm	nanchas superficiais	suave	planar	8-10	0	
9.46	junta	75	307	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	planar	6-8	0	
9.48	junta	72	325	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	planar	6-8	0	
9.50	junta	70	322	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	planar	6-8	0	
9.68	junta	80	320	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	planar	6-8	0	
9.72	junta	80	195	3-10m	1	2,5-10mm	nanchas superficiais	polido	ondulado	14-16	0	
10.80	junta	40	87	<1m	2	<0,1mm	limpo	suave	ondulado	10-12	0	
11.40	junta	70	55	<1m	2	<0,1mm	nanchas superficiais	suave	ondulado	10-12	0	

ANEXO 5 – Dados da linha de amostragem com bússola (Scanline 2c)

Informações Gerais												
Local		Data	Título		Direção							
Frente 1		13/11/2014	Scanline 2c		255							
Natureza e Orientação da Descontinuidade												
distância (m)	tipo	mergulho	direção	persistência	terminação	abertura/ largura	natureza do preenchimento	rugosidade superficial	forma superficial	coeficiente de rugosidade JRC	fluxo de água	observações
12.49	junta	60	151	<1m	2	<0,1m	nanchas superficiais	suave	ondulado	10-12	0	
13.14	junta	67	193	<1m	2	<0,1m	limpo	suave	planar	6-8	0	
13.69	junta	63	30	<1m	2	<0,1m	limpo	suave	planar	6-8	0	
14.00	junta	85	50	<1m	2	<0,1m	nanchas superficiais	áspero	planar	6-8	0	
14.04	junta	78	245	<1m	2	<0,1m	nanchas superficiais	áspero	planar	6-8	0	
15.38	junta	89	84	<1m	2	<0,1m	nanchas superficiais	áspero	planar	6-8	0	
16.20	falha	75	74	3-10m	1	0,1-2,5m	limpo	polido	planar	2-4	0	de 14,87 a 15,38m, presença de blocos soltos
16.25	junta	80	250	<1m	2	<0,1m	limpo	polido	planar	2-4	0	de 16,25 até 17,46m, presença de blocos soltos na linha

ANEXO 6 – Dados dos planos extraídos do modelo virtual da Frente 1

Planos de referência - Frente 1											
Plano	X	Y	Z	atti	trace	n_points	fisher_k	voll_P	voll_G	voll_R	voll_B
1	2644.618	10516.71	797.7929	232/28	0.546755	40	23.81982	0.847592	0.140169	0.012239	0.987761
2	2647.397	10516.14	797.4455	008/86	0.892791	330	26.1147	0.876589	0.052329	0.071082	0.928918
3	2651.056	10516.98	797.23	333/71	6.182607	6686	60.75733	0.949122	0.01171	0.039167	0.960833
4	2652.258	10521.96	792.491	202/89	1.092211	255	62.56581	0.946786	0.029908	0.023306	0.976694
5	2657.892	10521.74	793.56	187/86	1.041593	411	53.58175	0.942899	0.009519	0.047583	0.952417
6	2700.257	10523.64	792.3157	063/40	6.44331	3918	77.33377	0.956465	0.02232	0.021215	0.978785
7	2719.908	10526.32	799.0864	029/82	7.642459	7960	30.37544	0.902481	0.023948	0.073572	0.926428
8	2725.923	10526.57	799.1775	208/52	0.516097	33	81.1682	0.955476	0.037831	0.006693	0.993307
9	2727.993	10527.09	799.3007	348/82	1.76441	1802	26.66884	0.883935	0.044862	0.071203	0.928797
10	2741.678	10529.11	797.6181	035/81	0.684935	84	80.07162	0.957586	0.027919	0.014495	0.985505
11	2744.073	10529.09	798.5955	357/71	1.115271	190	62.1966	0.942089	0.042754	0.015157	0.984843
12	2749.479	10531.29	796.5773	008/88	0.45607	66	24.15318	0.8651	0.069857	0.065044	0.934956

Planos extraídos do modelo digital - Frente 1										
X	Y	Z	atti	trace	n_points	fisher_k	voll_P	voll_G	voll_R	voll_B
2704.774124	10516.43208	807.6369691	344/59	7.878557	19311	23.8286	0.862074	0.074225	0.063701	0.936299
2725.814599	10521.40656	808.797539	215/89	7.355064	8323	63.08117	0.949638	0.014074	0.036288	0.963712
2657.644106	10514.19509	807.6130208	343/62	6.933168	5719	27.43853	0.87682	0.075023	0.048157	0.951843
2699.027856	10524.56242	791.0110742	346/83	2.732166	4085	20.37132	0.839991	0.082454	0.077555	0.922445
2695.787774	10524.104	791.3011856	171/87	2.895647	3679	18.10166	0.828922	0.064568	0.10651	0.89349
2752.30636	10527.56489	807.9049566	338/69	5.148448	3019	36.73758	0.915215	0.024338	0.060446	0.939554
2732.432245	10527.21948	800.3067602	353/72	4.854894	2936	31.92327	0.89513	0.057202	0.047668	0.952332
2670.245991	10526.73505	791.6239801	335/48	2.075476	2559	11.41991	0.759066	0.136297	0.104637	0.895363
2742.507113	10522.39642	809.5577506	337/74	2.712328	2542	48.28604	0.931709	0.03025	0.038041	0.961959
2751.658878	10529.45713	803.4343042	338/69	3.066591	2505	34.94336	0.913801	0.018643	0.067556	0.932444
2648.513537	10503.34512	818.8657082	314/56	2.850385	2245	60.30855	0.948603	0.010288	0.041109	0.958891
2692.479451	10505.6459	815.9882793	326/63	4.825402	2148	52.77502	0.932588	0.046257	0.021155	0.978845
2700.870961	10522.1999	794.3603051	337/70	2.909168	2039	109.4021	0.969312	0.0145	0.016188	0.983812
2722.492667	10521.68643	809.6586567	329/70	2.717613	1931	45.27342	0.923558	0.050262	0.02618	0.97382
2647.136454	10504.9255	815.2244301	320/66	2.924479	1816	43.18455	0.927993	0.019195	0.052812	0.947188
2669.962898	10507.37926	818.7503471	46/82	3.446108	1625	87.42241	0.962868	0.013347	0.023785	0.976215
2692.927497	10517.38381	801.4964975	339/74	2.794351	1606	23.52207	0.862442	0.084842	0.052715	0.947285
2702.69642	10523.49173	793.0705255	326/71	2.496322	1391	72.71914	0.953939	0.022138	0.023924	0.976076
2725.774474	10526.02778	800.6817298	344/52	2.382045	1321	34.30166	0.898226	0.067597	0.034177	0.965823
2737.141591	10527.03121	802.4782561	348/65	2.919567	1320	157.6419	0.979516	0.006525	0.01396	0.98604
2744.679814	10528.33202	801.7254223	170/89	2.558833	1293	49.66706	0.939201	0.008035	0.052764	0.947236
2735.855191	10520.58347	811.796804	233/71	2.777719	1204	32.39777	0.910235	0.002154	0.087611	0.912389
2657.13041	10505.63543	818.2840975	332/72	2.779951	1098	147.2132	0.976841	0.012494	0.010665	0.989335
2695.750805	10517.83758	799.6960719	334/77	2.032658	1043	27.18238	0.892398	0.005387	0.102215	0.897785
2760.764844	10533.65195	803.5009609	161/84	1.528372	1024	91.44493	0.962303	0.021791	0.015905	0.984095
2653.003423	10504.81607	817.4019321	316/57	3.266852	1002	30.74211	0.889349	0.070034	0.040617	0.959383
2671.663796	10518.25321	805.1061767	330/74	1.842026	951	32.33317	0.904989	0.028247	0.066764	0.933236
2685.220129	10519.83262	798.9987126	345/69	3.254324	929	27.77111	0.885872	0.043048	0.071079	0.928921
2694.824221	10518.97246	798.6226084	63/40	2.112676	886	196.1679	0.984092	0.002861	0.013047	0.986953
2694.031181	10514.16789	806.2918475	002/78	1.572195	872	31.20407	0.900453	0.029146	0.070402	0.929598
2725.26446	10523.27011	804.6135077	343/73	1.136109	843	65.3976	0.947228	0.031862	0.02091	0.97909
2740.591577	10527.9509	801.7006105	331/59	1.838369	837	33.36293	0.908045	0.023218	0.068737	0.931263

Planos extraídos do modelo digital - Frente 1 (continuação)										
X	Y	Z	atti	trace	n_points	fisher_k	voll_P	voll_G	voll_R	voll_B
2738.260913	10523.20268	807.3602121	349/64	2.023715	745	25.71159	0.877437	0.043749	0.078814	0.921186
2690.293122	10523.58556	791.8897772	343/71	1.962925	727	43.91858	0.923815	0.040284	0.035901	0.964099
2713.268	10517.1693	811.0051972	320/72	2.50488	710	30.97072	0.896598	0.039281	0.064121	0.935879
2734.874867	10520.7858	812.0418019	336/65	1.720094	641	23.69058	0.866246	0.055362	0.078392	0.921608
2750.186856	10530.33647	800.5295835	332/59	1.272409	617	18.59945	0.840594	0.040368	0.119038	0.880962
2714.827814	10519.08597	808.2372441	330/64	1.846862	549	111.2568	0.970286	0.012187	0.017527	0.982473
2748.131034	10526.0662	806.4582386	323/89	1.544079	503	35.04958	0.914187	0.01749	0.068323	0.931677
2754.222642	10530.97195	801.7480996	156/87	1.566562	492	172.4708	0.983323	0.000602	0.016075	0.983925
2698.599833	10507.70104	816.2633688	319/86	1.318358	480	20.47713	0.847784	0.132679	0.019537	0.980463
2690.560946	10504.74645	817.2800473	346/68	1.864193	465	318.7914	0.989958	0.002761	0.007281	0.992719
2693.577064	10522.90397	793.2512031	342/45	1.31455	453	68.19545	0.953065	0.014579	0.032356	0.967644
2642.949609	10512.25034	806.6885264	263/88	1.55819	435	20.69031	0.853757	0.036763	0.10948	0.89052
2652.105876	10504.74654	817.4726659	231/75	1.254407	434	23.37304	0.853711	0.105541	0.040748	0.959252
2645.204065	10510.34464	811.0883865	249/60	0.85072	401	18.0886	0.82366	0.079858	0.096482	0.903518
2694.505327	10517.68392	800.3105151	229/80	1.009824	398	84.24358	0.962016	0.011348	0.026636	0.973364
2676.702626	10520.46364	801.916803	335/64	1.720357	396	82.55184	0.95946	0.019094	0.021447	0.978553
2737.95336	10527.80759	800.4616558	39/79	1.576808	369	60.53055	0.949601	0.007722	0.042676	0.957324
2687.721461	10520.31882	796.3222191	339/71	1.368489	356	55.81029	0.94482	0.009718	0.045462	0.954538
2717.929438	10526.86629	798.6641882	307/65	1.181059	356	41.90207	0.923427	0.026479	0.050094	0.949906
2725.128926	10524.71472	802.5417515	333/59	0.979553	326	113.6552	0.969886	0.016105	0.014009	0.985991
2758.095159	10532.63471	802.5784904	333/81	0.863612	314	49.39246	0.931879	0.034549	0.033572	0.966428
2675.723658	10520.70604	801.3877013	331/65	1.521512	298	55.71124	0.943474	0.0179	0.038626	0.961374
2677.332315	10522.96544	797.3708188	331/54	1.988134	298	35.19233	0.912109	0.023356	0.064535	0.935465
2691.89677	10514.78213	806.0905086	233/50	1.201551	291	15.62806	0.781109	0.169345	0.049546	0.950454
2716.566974	10526.58413	797.5555424	333/63	1.234595	271	23.85461	0.846146	0.131066	0.022788	0.977212
2691.680076	10523.18365	792.7018251	352/59	1.186371	263	18.96462	0.810459	0.15442	0.035121	0.964879
2750.528648	10529.96639	801.0865943	19/23	0.90958	244	18.37814	0.843097	0.016505	0.140398	0.859602
2739.86786	10527.73292	801.8150165	234/87	1.156744	243	50.30336	0.935201	0.026399	0.038401	0.961599
2686.340909	10514.64502	806.2635671	345/68	0.688038	231	44.6893	0.923116	0.045211	0.031673	0.968327
2666.514502	10522.029	795.8790043	242/85	0.792922	231	48.67846	0.930307	0.0511	0.018593	0.981407
2719.866087	10521.33696	806.4861087	333/74	1.232591	230	138.7912	0.976415	0.009215	0.01437	0.98563
2715.830333	10525.90667	799.3226476	206/67	0.903686	210	65.84492	0.945746	0.039013	0.015241	0.984759
2750.849466	10529.70146	801.5218058	335/84	0.695247	206	43.58852	0.923747	0.037243	0.03901	0.96099
2691.146719	10504.96615	816.5841667	247/66	1.236584	192	39.29873	0.917804	0.032642	0.049554	0.950446
2677.374921	10518.77672	805.5311799	336/69	1.003843	189	80.75029	0.958711	0.019938	0.021351	0.978649
2691.410649	10515.13189	804.9307514	69/87	0.996502	185	28.45393	0.885779	0.049906	0.064315	0.935685
2694.507088	10517.1956	801.8609066	68/82	1.176233	182	39.77031	0.917443	0.037485	0.045073	0.954927
2697.928523	10507.73636	816.4889091	36/76	1.33578	176	29.55228	0.882748	0.079501	0.037752	0.962248
2749.360549	10525.56524	809.1957805	319/69	0.832904	164	181.249	0.981791	0.007405	0.010804	0.989196
2681.505324	10518.25108	804.0775827	85/80	1.485666	139	14.65615	0.792979	0.063807	0.143214	0.856786
2684.543203	10519.15703	800.8604375	242/87	0.721482	128	42.14051	0.925813	0.024276	0.049911	0.950089
2693.459524	10522.38016	793.8761825	222/49	0.528265	126	5.57238	0.550084	0.032844	0.417072	0.582928
2735.63064	10522.116	808.297024	328/70	0.802598	125	82.80678	0.95623	0.037182	0.006587	0.993413
2749.767653	10529.6602	801.7899592	335/78	0.496815	98	110.4633	0.97153	0.007626	0.020845	0.979155
2691.934742	10522.61959	794.3553196	69/74	0.920122	97	35.29374	0.901765	0.065643	0.032592	0.967408
2705.512447	10523.68723	796.1867447	121/52	0.633798	94	81.99804	0.959545	0.018995	0.02146	0.97854

Planos extraídos do modelo digital - Frente 1 (continuação)										
X	Y	Z	atti	trace	n_points	fisher_k	voll_P	voll_G	voll_R	voll_B
2731.996129	10521.68817	807.8109247	192/73	0.848106	93	52.42434	0.931399	0.052757	0.015844	0.984156
2734.952597	10522.45455	807.6169221	245/83	0.792013	77	65.18733	0.945894	0.038269	0.015837	0.984163
2750.225065	10529.64805	801.7046753	219/81	0.435839	77	167.965	0.982016	0.001836	0.016148	0.983852
2750.351053	10530.90263	799.10475	333/50	0.436756	76	54.70028	0.939834	0.02772	0.032446	0.967554
2711.902877	10526.40274	794.559137	65/86	0.432829	73	24.35981	0.869855	0.059628	0.070518	0.929482
2741.346528	10527.44861	803.1339861	48/80	0.491069	72	25.27773	0.868669	0.081409	0.049922	0.950078
2681.495797	10519.54493	801.3435797	199/27	0.512017	69	46.30956	0.924958	0.056782	0.018261	0.981739
2747.786667	10529.10145	799.8714783	258/80	0.637041	69	39.25399	0.91437	0.050076	0.035554	0.964446
2714.237879	10525.97727	797.572303	60/74	0.337935	66	19.10565	0.826649	0.111549	0.061802	0.938198
2684.465077	10519.88923	798.6055692	246/81	0.893535	65	76.80535	0.957177	0.019898	0.022925	0.977075
2744.655625	10528.57344	800.2175781	56/45	0.555323	64	301.1829	0.989862	0.001501	0.008637	0.991363
2747.455323	10529.76774	797.7724194	330/59	0.30435	62	166.0205	0.981023	0.005196	0.013781	0.986219
2746.038448	10527.87414	803.7037586	344/73	0.593236	58	135.743	0.972585	0.023454	0.003961	0.996039
2759.132545	10533.92545	800.6504364	291/70	0.569298	55	102.2574	0.967	0.0178	0.0152	0.9848
2745.747963	10528.01296	803.5647593	79/37	0.711098	54	51.77058	0.936555	0.03061	0.032835	0.967165
2684.027115	10518.64038	802.6724808	239/80	0.616406	52	69.45348	0.949427	0.035144	0.015429	0.984571
2757.748654	10532.22308	803.0393654	268/43	0.601415	52	116.1067	0.97431	0.002191	0.023499	0.976501
2685.296275	10519.14706	800.6901765	247/89	0.605805	51	129.3229	0.973041	0.017511	0.009448	0.990552
2706.0686	10522.26	800.97046	209/39	0.441928	50	54.16539	0.940907	0.025575	0.033517	0.966483
2745.522326	10528.74186	799.0005814	45/88	0.500564	43	348.6121	0.990087	0.006154	0.003759	0.996241
2759.747692	10533.08718	803.9481538	263/77	0.554456	39	109.4794	0.969586	0.015754	0.01466	0.98534
2742.7275	10528.425	801.913	60/35	0.42946	36	168.7757	0.978545	0.017071	0.004384	0.995616
2748.207353	10529.07059	801.2577647	264/84	0.318416	34	59.82012	0.947062	0.019774	0.033164	0.966836
2748.225484	10529.94516	798.7999032	86/83	0.320156	31	38.69833	0.914083	0.050024	0.035893	0.964107
2739.961739	10528.3087	799.5513478	139/12	0.141156	23	38.19201	0.921749	0.019591	0.05866	0.94134
2649.245	10503	819.9305	0/90	0.030676	2	317.9076	0.993714	0.006286	1.32E-16	1

ANEXO 7 – Dados da linha de amostragem virtual (Scanline 1v)

Trecho: PC1_2 a PC1_3					
Ponto	Local	Persistência	Ângulo	dipdir	dip
1	0.644837707	2.006744877	45.54900476	306.4018503	51.30980008
2	1.162959843	1.100056817	10.68178216	269.0461584	80.49033348
3	2.845960977	1.090710319	76.76999025	173.0214416	81.25671166
4	4.263672711	1.597951501	80.78339775	357.7113152	71.41271152
5	4.561584051	1.413535992	61.85230016	38.83713689	66.30286511
6	4.958387688	1.626133143	71.77932089	28.01847679	64.76421531
7	5.84005282	1.009277464	50.95412722	225.8151381	83.58702401
8	6.348993641	1.221248951	60.51328675	334.6843148	63.91381376
9	6.789478455	1.507316821	86.56589548	11.22839205	68.84246811
10	8.44939896	3.180847214	71.78250578	29.05817941	60.51782574
11	9.361907169	3.300995153	83.7127292	0.764848297	64.91478219
12	10.22500812	2.637999431	56.716141	332.4214396	72.7455445
13	10.93679392	3.965664635	88.02372349	9.625710534	69.51113187
14	12.04117982	5.327034822	86.19502769	3.484662229	66.89921919
15	12.12038522	4.277205162	27.40259267	302.9609212	79.37132962
16	14.76835582	4.218256038	74.70517941	351.580725	80.77803784
17	17.2419064	2.798701306	70.1175417	206.5297287	82.63994903
18	19.47354663	8.303913776	59.68073447	59.69330392	41.79773437

Trecho: PC1_3 a PC1_4					
Ponto	Local	Persistência	Ângulo	dipdir	dip
2	6.217951713	16.25058119	42.47466178	97.34175586	29.85829736
3	10.12929147	4.184423019	79.29183555	329.9221917	68.29253402
4	12.89670516	4.294297265	26.78536348	257.1666867	82.81805773
5	14.89442411	4.946321967	79.52517776	326.0982842	61.16914182
6	20.1951505	6.76666092	48.37550253	32.79631227	84.26710056
7	5.555983828	3.748181026	42.57122093	37.07974588	78.69533344

Trecho: PC1_5 a PC1_6					
Ponto	Local	Persistência	Ângulo	dipdir	dip
1	5.829340784	5.791286558	60.19593481	206.6025295	60.88501812
2	10.60331653	3.172507526	72.29289527	9.307055563	85.84672172
3	12.06930901	6.505605967	10.5657166	254.2262654	82.90155845
4	17.64981241	7.372550169	74.26939597	7.517194569	79.10474406
5	19.67167781	5.392975431	83.43503567	358.1922336	78.19041122
6	25.80216946	4.017595798	69.82419963	11.88283155	82.36877747
7	28.52998122	5.071881702	66.78134037	326.3665106	68.83396457
8	32.27762456	1.371170668	65.17034011	325.996908	77.55208403
9	35.13520554	2.051010483	63.35279638	317.2627417	53.56202588

ANEXO 8 – Dados da linha de amostragem virtual (Scanline 2v)

Scanline 2v					
Ponto	Local	Persistência	Ângulo	dipdir	dip
0	0.092373407	0.670901632	64.59943395	308.5441295	36.37890538
1	0.75510184	1.795276023	34.83093989	265.2757023	55.14988058
2	1.812383362	2.115796777	83.32105627	344.6517752	41.08401084
3	3.715163376	1.175801429	85.92267936	1.977529693	34.97267558
4	4.590679627	2.139140248	48.77776097	248.3311397	43.38976217
5	6.357883226	1.784272681	79.08076	340.2301919	48.67528901
6	11.95877566	0.574529373	87.11029514	357.8423099	73.40269786
7	14.82841027	1.305826941	75.77770448	189.9738327	69.94463781
8	10.23025747	2.466544952	84.36337277	348.2040786	58.28991297
9	20.49784621	1.974060789	48.38568442	38.64441444	73.58454802

ANEXO 9 – Dados dos planos extraídos do modelo virtual da Frente 2

Planos de referência - Frente 2											
Plano	X	Y	Z	atti	trace	n_points	fisher_k	voll_P	voll_G	voll_R	voll_B
1	2838.771	10639.3	822.5323	360/89	0.19338	97	36.82319	0.913338	0.039897	0.046765	0.953235
2	2841.921	10638.64	821.8252	029/65	0.252509	360	92.03066	0.964582	0.013896	0.021522	0.978478
3	2839.453	10639.12	822.9749	329/74	0.39144	484	49.50987	0.938282	0.018204	0.043514	0.956486
4	2838.905	10639.26	822.6968	331/50	0.3127	338	21.04989	0.85049	0.12295	0.02656	0.97344
5	2837.744	10639.18	822.0168	335/73	0.273708	328	212.4827	0.984149	0.00744	0.008411	0.991589
6	2835.397	10639.39	822.9571	007/78	0.986459	6080	20.89012	0.854518	0.042685	0.102797	0.897203
7	2833.334	10639.56	823.0315	004/82	1.241736	3139	22.05717	0.846908	0.092359	0.060733	0.939267
8	2840.005	10638.84	824.1134	246/87	0.341358	169	109.5148	0.969245	0.015192	0.015563	0.984437
9	2839.97	10638.92	823.5726	308/57	0.282673	216	19.47058	0.832931	0.093086	0.073983	0.926017

Planos extraídos do modelo digital - Frente 2										
X	Y	Z	atti	trace	n_points	fisher_k	voll_P	voll_G	voll_R	voll_B
2835.64877	10639.2642	823.7044706	011/85	1.143808	6422	20.3761	0.858517	0.015313	0.12617	0.87383
2834.762557	10639.03978	827.4567234	14/83	0.854761	5405	15.9324	0.821027	0.0509	0.128073	0.871927
2835.309982	10639.53217	822.0337603	010/84	0.896357	5011	25.4835	0.880832	0.027017	0.092151	0.907849
2835.124799	10639.53271	824.9406469	20/84	1.076162	4109	29.2844	0.894419	0.031754	0.073827	0.926173
2836.283853	10639.29357	823.1012264	357/85	0.666127	3096	25.4034	0.881828	0.020521	0.097652	0.902348
2835.62899	10639.4108	822.5173249	009/74	0.917214	3019	22.0053	0.860391	0.041238	0.098371	0.901629
2832.637093	10639.05391	826.9537468	356/74	0.615874	2855	12.8428	0.76324	0.103543	0.133217	0.866783
2839.838455	10638.43603	826.1246217	005/86	1.211188	2770	55.1623	0.940807	0.026315	0.032878	0.967122
2832.51106	10639.26384	826.1981771	343/79	0.701453	2586	42.9531	0.928778	0.015406	0.055816	0.944184
2832.792113	10639.45363	825.3126417	350/83	0.712958	2551	23.4802	0.857555	0.084978	0.057467	0.942533
2837.896007	10638.33383	826.2578742	354/77	1.06697	2527	119.907	0.971046	0.016799	0.012155	0.987845
2833.347535	10639.49295	824.3315943	334/80	0.845175	2369	14.5394	0.797418	0.042922	0.159659	0.840341
2841.566491	10638.76726	824.5920148	351/67	0.920074	2294	137.471	0.976966	0.007481	0.015553	0.984447
2833.897789	10639.11121	827.2967373	337/62	0.429214	2185	47.5557	0.934538	0.015951	0.049511	0.950489
2832.73664	10639.4935	824.2565206	334/75	0.581605	2107	23.315	0.854268	0.088656	0.057076	0.942924
2836.386065	10639.39844	822.0094379	001/89	0.637872	2046	40.7254	0.926853	0.007371	0.065777	0.934223
2835.458744	10639.2932	825.8117684	26/88	0.666685	1839	24.0106	0.876239	0.022806	0.100955	0.899045
2834.80964	10639.23576	826.887277	002/27	0.278153	1527	5.39061	0.521795	0.153228	0.324977	0.675023
2836.390562	10639.37613	822.5963656	13/81	0.374098	1458	36.5309	0.918942	0.007242	0.073816	0.926184
2833.057703	10639.28929	826.4999343	333/63	0.39977	1354	37.2999	0.916873	0.021136	0.061991	0.938009
2835.299955	10639.24593	826.7046333	19/75	0.378872	1328	15.5245	0.811363	0.051778	0.136859	0.863141
2835.479885	10638.97218	827.3834853	21/80	0.464655	1222	11.9404	0.772332	0.044425	0.183243	0.816757
2839.669055	10638.78298	824.150503	341/73	0.679485	1175	101.327	0.965562	0.021774	0.012664	0.987336
2836.890018	10639.20227	822.6381645	004/87	0.408104	1100	30.2801	0.896968	0.028833	0.074199	0.925801
2833.637747	10639.2251	826.911787	335/49	0.478415	972	45.0676	0.928666	0.026286	0.045048	0.954952
2842.819801	10638.90361	825.6389042	005/88	0.677983	804	185.278	0.983019	0.003721	0.01326	0.98674
2838.677597	10638.81577	823.9907121	349/78	0.536809	799	153.704	0.981209	0.002882	0.015909	0.984091
2835.036003	10639.59404	824.0827107	005/87	0.385	788	39.8371	0.922082	0.021573	0.056344	0.943656
2841.466357	10638.90887	823.4661228	346/71	0.790206	733	334.425	0.990061	0.004057	0.005883	0.994117
2837.093339	10638.50721	825.7467022	003/77	0.41898	638	45.2179	0.93487	0.00336	0.06177	0.93823
2839.288116	10639.29485	822.4896312	003/81	0.285778	621	42.4517	0.914705	0.066463	0.018832	0.981168
2838.578683	10639.15303	823.0023657	341/62	0.341539	577	29.4221	0.884143	0.079904	0.035953	0.964047
2832.709783	10639.31341	825.7156509	316/35	0.567856	507	29.8848	0.890729	0.04821	0.061061	0.938939
2837.846169	10639.09677	822.6436734	356/84	0.294151	496	54.4632	0.931815	0.056257	0.011928	0.988072
2837.905281	10639.16611	822.3077339	340/62	0.479057	481	30.7121	0.891035	0.066226	0.042739	0.957261
2837.177079	10639.20213	821.9616994	005/89	0.43162	469	79.655	0.961072	0.007244	0.031685	0.968315

Planos extraídos do modelo digital - Frente 2 (continuação)										
X	Y	Z	atti	trace	n_points	fisher_k	voll_P	voll_G	voll_R	voll_B
2840.934838	10638.87149	824.0764298	340/70	0.558739	463	228.566	0.984894	0.008331	0.006775	0.993225
2837.002086	10639.29305	821.9884197	309/74	0.507118	417	36.3433	0.917741	0.009944	0.072315	0.927685
2839.675063	10639.02632	823.5236541	344/68	0.40783	399	146.362	0.977553	0.00866	0.013787	0.986213
2839.024761	10638.71537	824.3201058	341/76	0.355663	397	162.156	0.979005	0.010861	0.010134	0.989866
2832.601806	10639.10864	822.0235393	352/50	0.261565	382	83.964	0.962522	0.009889	0.027589	0.972411
2838.521387	10639.19277	822.0197659	352/69	0.46992	346	74.5656	0.957943	0.009628	0.032428	0.967572
2837.121686	10639	823.2781538	180/90	0.47414	338	63.2354	0.950202	0.01335	0.036449	0.963551
2839.660536	10639.14196	823.0133274	242/83	0.436221	336	39.7748	0.911218	0.063308	0.025474	0.974526
2840.134871	10638.84065	823.9276129	0/70	0.449395	310	80.4352	0.960123	0.012619	0.027258	0.972742
2832.764918	10639.37803	825.6219902	269/19	0.526836	305	14.0571	0.765035	0.159945	0.07502	0.92498
2838.967763	10639.18983	823.0046441	345/75	0.306987	295	55.2882	0.935102	0.048431	0.016467	0.983533
2840.39619	10638.96769	821.8034966	15/89	0.504416	294	68.9403	0.955738	0.006856	0.037406	0.962594
2838.500548	10639.04486	823.5328219	337/50	0.192343	292	50.3051	0.927566	0.058578	0.013856	0.986144
2841.091321	10638.42943	825.5727057	308/58	0.405236	265	149.071	0.978584	0.006658	0.014759	0.985241
2838.496878	10639.30295	822.4044051	355/85	0.42757	237	28.9935	0.894512	0.07812	0.027368	0.972632
2842.076752	10638.7	822.1736239	0/90	0.182124	234	18.0766	0.800284	0.187405	0.012312	0.987688
2838.225431	10638.5	825.4249483	180/90	0.319412	232	30.4137	0.904651	0.011825	0.083524	0.916476
2838.256447	10638.90395	823.7261535	353/79	0.235593	228	198.698	0.983714	0.00536	0.010926	0.989074
2839.242345	10638.87566	823.9957212	347/67	0.315609	226	108.204	0.969433	0.014679	0.015889	0.984111
2833.284107	10639.20313	826.7466518	299/7	0.243148	224	30.3199	0.895339	0.037138	0.067523	0.932477
2839.755381	10639.2	822.5813274	180/89	0.221639	223	34.8054	0.905532	0.047582	0.046886	0.953114
2837.83219	10638.96857	823.413881	58/86	0.325344	210	28.9469	0.874654	0.101853	0.023493	0.976507
2841.637033	10638.73397	821.8371866	25/88	0.200202	209	156.413	0.979333	0.006789	0.013878	0.986122
2839.417892	10639.04853	823.4261667	319/67	0.322876	204	202.794	0.982974	0.009983	0.007043	0.992957
2838.377143	10639.2	822.6754039	0/90	0.282	203	173.037	0.979954	0.011644	0.008402	0.991598
2838.950102	10639.04082	823.4155561	316/65	0.377492	196	95.564	0.963345	0.024459	0.012195	0.987805
2840.58241	10638.93282	823.3569949	331/67	0.194206	195	46.5921	0.920784	0.065495	0.013721	0.986279
2832.568684	10639.12895	826.6487368	293/9	0.305	190	28.6238	0.894644	0.019094	0.086262	0.913738
2839.790269	10638.3	826.5447043	0/90	0.112361	186	64.463	0.951495	0.012291	0.036214	0.963786
2839.857083	10638.9875	823.4922262	267/75	0.495606	168	34.3686	0.900029	0.065831	0.034141	0.965859
2839.194573	10639.11463	822.9687744	311/64	0.317932	164	48.8985	0.928458	0.05996	0.011583	0.988417
2839.847042	10638.34718	826.4384225	325/1	0.13537	142	35.6292	0.910556	0.0357	0.053744	0.946256
2839.217407	10639.1	821.9404	180/90	0.219146	135	129.347	0.97496	0.008861	0.016179	0.983821
2839.740894	10638.95772	823.7823171	310/6	0.235364	123	18.3168	0.821382	0.101204	0.077413	0.922587
2839.174364	10639.20182	822.6959182	353/84	0.142562	110	51.3286	0.935747	0.035939	0.028314	0.971686
2840.108542	10638.30104	826.4698542	295/22	0.127687	96	17.9815	0.837704	0.022592	0.139705	0.860295
2839.979259	10639.1	822.9475432	0/90	0.170658	81	444.311	0.992468	0.003528	0.004004	0.995996
2839.320417	10638.8	824.1985833	0/90	0.118697	72	17.7023	0.8196	0.087058	0.093343	0.906657
2839.031061	10638.9	823.7664545	180/90	0.156285	66	198.352	0.984021	0.0047	0.01128	0.98872
2838.641176	10639.2	822.7220588	0/90	0.14368	51	200.792	0.98323	0.008983	0.007787	0.992213
2835.292857	10639.35714	824.0040714	260/65	0.106977	14	22.4592	0.852577	0.113755	0.033668	0.966332