

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGE3M)**

DOUGLAS MARCEL QUATIABARA SANDER LIBARDI

**TELEVISIONAMENTO ÓPTICO DE FUROS DE SONDAGEM - APLICABILIDADE
DA TÉCNICA EM ÁREAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MG)**

Porto Alegre

2017

DOUGLAS MARCEL QUATIABARA SANDER LIBARDI

**TELEVISIONAMENTO ÓPTICO DE FUROS DE SONDAGEM - APLICABILIDADE
DA TÉCNICA EM ÁREAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MG)**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica. Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Salvadoretti

Porto Alegre

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

DOUGLAS MARCEL QUATIABARA SANDER LIBARDI

**TELEVISIONAMENTO ÓPTICO DE FUROS DE SONDAGEM - APLICABILIDADE
DA TÉCNICA EM ÁREAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MG)**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Orientador

Prof. Dr. Paulo Salvadoretti

Coorientador

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Aprovado em: 17/10/2017

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marco Braga

Prof^a. Dr. André Zingano

Prof^a. Dr. Jair Koppe

AGRADECIMENTOS

Ao fim de toda jornada é muito importante agradecer às pessoas que nos ajudaram, diretamente ou indiretamente...era isso!

Valeu George pela ajuda e paciência no trabalho de campo.

Obrigado Elias pela ajuda no processamento de dados.

E professor Paulo pela paciência e apoio na execução de todas as etapas do trabalho!

Obrigado à Luana Stapasolla por formatar o índice da dissertação!

"Oath of a Knight:

Be without fear in the face of your enemies.

Be brave and upright that God may love thee.

Speak the truth always, even if it leads to your death.

Safeguard the helpless and do no wrong.

That is your oath."

Movie Kingdom of Heaven

RESUMO

O *Optical Televiewer* (OPTV) é um dispositivo de perfilagem geofísica que produz imagens contínuas e orientadas da parede de furos de sondagem. Imagens geradas por OPTV desempenham um papel auxiliar em campanhas de exploração mineral e na aquisição de informações geotécnicas. A caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos é fundamental para a identificação de condicionantes geológicas e estruturais associadas à estabilidade de escavações em rochas. Várias estruturas existentes no interior dos maciços não são normalmente acessadas via sondagem testemunhada, em função de dificuldade recuperação de testemunho no processo de sondagem e restrições econômicas pelo custo da sondagem. Estruturas como planos de foliação, dobras, sistemas de fraturas, percolação de água no maciço e aberturas podem ser completamente perdidas por uma baixa recuperação de testemunhos. O televisionamento por OPTV serve então para auxiliar na identificação e análise destas zonas de fraqueza existentes nos maciços. Neste trabalho, foram realizadas perfilagens em furos de sondagem executados em minas que fazem parte da 'Megaestrutura Gandarela', localizada na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais-Brasil. Feições geológicas de interesse foram retiradas das imagens obtidas com a sonda OPTV e dos dados de geoposicionamento oferecidos pela sonda. Um dos objetivos deste estudo foi a aplicação e avaliação de uma metodologia de aproveitamento do testemunho virtual proposta em publicações recentes, às imagens produzidas por OPTV nas minas Tamanduá e Gongo Soco, situadas no Quadrilátero Ferrífero. Outro objetivo do trabalho foi efetuar a análise de estabilidade cinemática de taludes a partir de estruturas marcadas em imagens de OPTV e compará-la à análise cinemática efetuada a partir das estruturas identificadas no mapeamento geológico estrutural de superfície nas minas em estudo. A marcação das estruturas nas imagens de OPTV e as análises cinemáticas foram realizadas com *softwares* comerciais (*WellCad* e *Dips*). O estudo mostrou que as estruturas marcadas com OPTV reproduzem satisfatoriamente as observações do mapeamento geológico estrutural, podendo gerar estereogramas que, ao menos visualmente, se assemelham aos gerados a partir de descrições litológicas. Constatou-se também que o uso do OPTV é de grande valia como ferramenta auxiliar no processo mineiro, com identificação de estruturas internas que antes não poderiam ser acessadas.

Palavras-chave: Geofísica, OPTV, Minério de Ferro, *Optical Televiewer*.

ABSTRACT

The Optical Televiewer (OPTV) is a geophysical probe device that produces continuous and oriented images of the wall of drill holes. Images generated by OPTV play an auxiliary role in mineral exploration campaigns and in the acquisition of geotechnical information. The geological-geotechnical characterization of rock masses is fundamental for the identification of geological and structural constraints associated with the stability of rock excavations. Several structures inside the massifs are not normally accessed via witnessed probing, due to difficulty retrieval of testimony in the probing process and economic constraints due to the cost of the survey. Structures such as foliation planes, folds, fracture systems, water percolation in the massif and openings can be completely lost due to a low recovery of testimonies. The televising by OPTV serves then to help in the identification and analysis of these zones of weakness existing in the massifs. In this work, profiles were drilled in drilling holes in mines that are part of the 'Gandarela Megastructure', located in the central-north portion of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais-Brazil. Geological features of interest were taken from the images obtained with the OPTV probe and the geo-positioning data provided by the probe. One of the objectives of this study was the application and evaluation of a methodology for the use of the virtual testimony proposed in recent publications, to the images produced by OPTV in the Tamanduá and Gongo Soco mines, located in the Quadrilátero Ferrífero. Another objective of the work was to perform the kinematic stability analysis of slopes from marked structures in OPTV images and to compare it to the kinematic analysis carried out from the structures identified in the surface geological mapping in the mines under study. The marking of the structures in the OPTV images and the kinematic analysis were performed with commercial softwares (WellCad and Dips). The study showed that the structures marked with OPTV reproduce satisfactorily the observations of the structural geological mapping, being able to generate stereograms that, at least visually, resemble those generated from lithologic descriptions. It was also verified that the use of OPTV is of great value as an auxiliary tool in the mining process, with identification of internal structures that previously could not be accessed.

Keywords: Geophysics, OPTV, Iron Ore, Optical Televiewer.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - IMAGEM ILUSTRANDO A EXECUÇÃO DE PERFILAGEM GEOFÍSICA (RETIRADO DE BAILLOT ET AL 2004).....	22
FIGURA 2.2 - IMAGENS DO OPTICAL TELEVIEWER (MANUAL DO USUÁRIO- ROBERTSON GEOLOGGING, 2014).....	23
FIGURA 2.3 - FORMAÇÃO E ORIENTAÇÃO DA IMAGEM GERADA PELO OPTV (MANUAL DO USUÁRIO- ROBERTSON GEOLOGGING, 2014)	25
FIGURA 2.4 - ILUSTRAÇÃO REPRESENTANDO O ESQUEMA DE TRANSFORMAÇÃO DAS IMAGENS INICIALMENTE "ENROLADAS", FECHADAS, PARA IMAGENS "DESENROLAS", OU ABERTAS E A DEFINIÇÃO DE <i>DIP</i> E <i>DIP DIRECTION</i> EM CADA CASO. (RETIRADO DE CHUNG ET AL., 2008).....	25
FIGURAS 2.6 - À ESQUERDA, IMAGEM ESQUEMÁTICA DOS COMPONENTES DA SONDA OPTV (RETIRADA DO MANUAL DO USUÁRIO- ROBERTSON GEOLOGGING, 2014) E À DIREITA, ILUSTRAÇÃO MOSTRANDO ASPECTOS INTERNOS E EXTERNOS DA SONDA (SITE WWW.GEOLOGGING.COM).	30
FIGURA 2.7 - COMPONENTES PARA A CENTRALIZAÇÃO DA SONDA OPTV.	31
FIGURA 2.8 - TRIPÉ DE SUPORTE PARA O CABO DE AQUISIÇÃO, CONECTADO À SONDA.	31
FIGURA 3.1 - IMAGEM REALIZADA NO FURO GSO00026 - MINA GONGO SOCO. NO MOMENTO DO TELEVISIONAMENTO, MESMO TENDO-SE APLICADO FLOCULANTE (SULFATO DE ALUMÍNIO) COM 24H DE ANTECEDÊNCIA, O FURO APRESENTOU EXCESSO DE LAMA DE PERFURAÇÃO IMPEDINDO A FILMAGEM.	34
FIGURA 3.2 - MAPA LITOLÓGICO DA CAVA FINAL DE TAMANDUÁ.....	39
FIGURA 3.3 - FOTO DA CAIXA DE TESTEMUNHO (À ESQUERDA) DO FURO FD00022 DA MINA DO TAMANDUÁ E PARTE DO TELEVISIONAMENTO (À DIREITA) DO FURO FD00022 DA MINA DO TAMANDUÁ.	40
FIGURA 3.4 - FOTO DA CAIXA DE TESTEMUNHO DO FURO GSOFG00027 DA MINA GONGO SOCO E PARTE DO TELEVISIONAMENTO DO FURO, QUE NA FOTO APARECE BASTANTE DETERIORADO.	41
FIGURA 3.5 - FOTO DE TESTEMUNHOS DO FURO GSOFG00025 NA MINA GONGO SOCO. O TRECHO DETERIORADO ASSINALADO EM VERMELHO, APARECE NA IMAGEM DE OPTV À DIREITA.....	41
FIGURA 3.6 - IMAGEM DAS MARCAÇÕES DOS BANDAMENTOS NO FURO GSOFG00023, DA MINA GONGO SOCO.	42

FIGURA 3.7 - IMAGEM DE UM VEIO DE QUARTZO NO FURO GSOFG00025.	43
FIGURA 3.8 - OUTRO VEIO DE QUARTZO COM UMA MARCAÇÃO DO BANDAMENTO PRINCIPAL E SEGUIDO DE UMA FRATURA.....	44
FIGURA 3.9 - DOBRA NO FILITO, FURO GSOFG00025.....	45
FIGURA 3.10 - ENTRADA DA CÂMERA NA ÁGUA, ANTECIPADA POR UMA FRATURA MARCADA EM ROSA.....	45
FIGURA 3.11 - EM 38,3M PODE-SE PERCEBER O CONTATO (INDICADO PELA SETA), COM MARCAÇÕES DE BANDAMENTOS (EM VERDE) E UM VEIO DE QUARTZO (EM BRANCO).	46
FIGURA 3.12 - À ESQUERDA TEM-SE A MUDANÇA DA ROCHA PASSANDO DE LISA PARA RUGOSA. NA FIGURA DA DIREITA TEM-SE EM 37,9M A DEFINIÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA (INDICADO PELA SETA). AS MANCHAS BRANCAS NA FIGURA DA DIREITA ACREDITA-SE QUE SEJAM DEVIDO AO BRILHO PRODUZIDO POR RESÍDUOS DO FLOCULANTE FRENTE À LUZ DA CÂMERA. IMAGENS DO FURO GSOFG00027 DA MINA GONGO SOCO.	47
FIGURA 3.13 - MUDANÇA DE ESTRUTURA LISA PARA RUGOSA NO FURO FD00022, DA MINA DO TAMANDUÁ	47
FIGURA 3.14 - NO FURO GSO00025 PODE-SE VER, ATRAVÉS DO OPTV, UM VEIO DE QUARTZO DE COMPRIMENTO 1 M, CORTADO POR UMA FRATURA.....	50
FIGURA 3.15 - CAIXA DE TESTEMUNHO ONDE ENCONTRAMOS UMA CORRESPONDÊNCIA COM O VEIO DA FIG 3.14.....	51
FIGURA 3.16 - FOTO DO TESTEMUNHO DO FURO GSO00027, ENTRE 18M E 27M. MUITAS ESTRUTURAS NÃO PODEM SER VISUALIZADAS PELO FATO DO MATERIAL SER FRIÁVEL. À DIREITA, A IMAGEM ILUSTRANDO A REAL SITUAÇÃO DA ROCHA IN SITU.	52
FIGURA 3.17 - FRATURA, MARCADA EM ROSA, DO FURO GSOFG00025 E FOTO DO TESTEMUNHO DE SONDAGEM DO FURO GSOFG00025, EM NENHUM MOMENTO CONSEGUIU-SE IDENTIFICAR A FRATURA VISÍVEL NO TELEVISIONAMENTO.	53
FIGURA 3.18 - PERFIS DE RUGOSIDADE DE BARTON <i>ET AL.</i> (1974). ADAPTAÇÃO DOS PERFIS DE RUGOSIDADE DE BARTON PARA APLICAÇÃO EM IMAGENS DE TELEVISIONAMENTO.(OLIVEIRA 2014)	55
FIGURA 3.19 - CÁLCULO DA AMPLITUDE DE PERFIS DE RUGOSIDADE EM SUPERFÍCIE ROCHOSA, CONSIDERANDO A AMPLITUDE DA RUGOSIDADE (A) E O TAMANHO DOS GRÃOS (BARTON, 2013)	55
FIGURA 3.20 - IMAGEM DO FURO GSOFG00025, COM RUGOSIDADE DE CLASSE "LISA".	56
FIGURA 3.21 - A FRATURA NÃO APRESENTA FORMA PERFEITAMENTE SENOIDAL (FURO GSOFG00027).....	56

FIGURA 3.22 - FRATURA SUPERIOR POUCO VISÍVEL E SEM FORMATO PERFEITAMENTE SENOIDAL. A FRATURA INFERIOR PODE SER CONSIDERADA RUGOSA, CONFORME A CLASSIFICAÇÃO DE ISRM (FIGURA 3.18).....	56
FIGURA 3.23 – À ESQUERDA, PRESENÇA DE FRATURA ABERTA E RUGOSA AOS 55M DE PROFUNDIDADE NO FURO CAPFD00019, COM ABERTURA OBTIDA PELO SOFTWARE DE APROX. 15CM; À DIREITA, FRATURA ABERTA E PRESENÇA DE BANDAMENTO COM BANDAS PRETAS E BRANCAS.	57
FIGURA 3.24 – APRESENTA-SE NA IMAGEM ESTRUTURAS MARCADAS NO FURO GSO00023..	59
FIGURA 3.25 - TESTEMUNHO DO FURO GSOFG00023, SEM CONDIÇÕES DE IDENTIFICAR AS ABERTURAS VISTAS NA IMAGEM GERADA PELO OPTV.	59
FIGURA 3.26 - FRATURAS NO FURO GSOFG00023, COM ESPAÇAMENTO DE APROXIMADAMENTE DE 30CM, LOGO UM ESPAÇAMENTO MODERADO.	62
FIGURA 3.27 - NESTE CASO, NO FURO GSOFG00025, TEM-SE DUAS FRATURAS QUE ACABAM COINCIDINDO, DIFICULDADE A DELIMITAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ELAS.....	62
FIGURA 3.28 - TRÊS FRATURAS EM SEQUÊNCIA NO FURO GSOFG00025, A ULTIMA COM UMA PEQUENA ABERTURA. PODE-SE CONSIDERAR ESSA REGIÃO DE 1M DE COMPRIMENTO COMO SENDO POUCO FRATURADA, CONFORME A CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE FRATURAMENTO.	63
FIGURA 3.29 - NO FURO FD00069, OBSERVA-SE A EXISTÊNCIA DE UMA FRATURA VERTICAL, QUE SE ESTENDE POR CERCA DE DOIS METROS. ESTA FRATURA NÃO É VISTA NO TESTEMUNHO.	64
FIGURA 3.30 - NESTA IMAGEM VISUALIZA-SE UMA ZONA DO TESTEMUNHO A ESQUERDA, SEM PERDA DE INFORMAÇÕES, ILUSTRANDO A REAL SITUAÇÃO DA ROCHA IN SITU. OBSERVA-SE ATÉ UMA FRATURA HORIZONTAL E OUTRA VERTICAL.	65
FIGURA 3.31 - FURO FD00069 DA MINA DO TAMANDUÁ, UMA FRATURA QUE ACREDITASSE SER CAUSADA QUEBRA MECÂNICA (MARCA NA PAREDE DO FURO CAUSADA PELO EQUIPAMENTO DE SONDAJEM).....	65
FIGURA 3.32 - SEÇÃO DO FURO GSO00023 QUE VAI DE 96,25M A 104,6M.	68
FIGURA 3.33 - TESTEMUNHO DO FURO GSO00023 NO INTERVALO 96,25M A 104,6M.....	69
FIGURA 4.1 – MAPA DA GEOLOGIA LOCAL DA CAVA DA MINA DE GONGO SOCO. (FONTE: VALE/BVP-ENGENHARIA, 2008).....	73
FIGURA 4.2 – TOPOGRAFIA DA CAVA E ESTEREOGRAMA DAS ESTRUTURAS DE GONGO SOCO. (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).....	74

FIGURA 4.3 – MAPA DE LINHAS DE FORMA DA CAVA DE GONGO SOCO. (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).	75
FIGURA 4.4 – BANDAMENTO SB NA MINA DE GONGO SOCO. EM B TEM-SE O SB NO XISTO NOVA LIMA E EM C TEM-SE O SB NO QUARTZITO LEVEMENTE DOBRADO (ONDULADO). ATITUDE MÉDIA 167°/47°. (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).	76
FIGURA 4.5 – FOLIAÇÃO SN NA MINA DE GONGO SOCO. EM A E B TEM-SE A FOLIAÇÃO SN QUE APRESENTA ATITUDE MÉDIA DE 147°/27°. (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).	77
FIGURA 4.6 – ESTEREOGRAMA DOS PLANOS MÉDIOS DAS JUNTAS NA IN (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).	78
FIGURA 4.7 – MAPA DAS LINHAS DE FORMA E DOS DOMÍNIOS ESTRUTURAIS DA CAVA COM A LOCALIZAÇÃO DOS FUROS FILMADOS. (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).	79
FIGURA 4.8 - ACAMADAMENTO NO FILITO.....	81
FIGURA 4.9 - ESTEREOGRAMA DO ACAMADAMENTO S ₀ , CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EM 074/71	81
FIGURA 4.10 - BANDAMENTO SB	82
FIGURA 4.11 - ESTEREOGRAMA DOS PÓLOS DA SUPERFÍCIE SB, MÁXIMA CONCENTRAÇÃO EM 088/56.....	83
FIGURA 4.12 - ESTRUTURA SN CONFIGURANDO MICROFALHAMENTOS EM SB NO ITABIRITO COMPACTO (ICS).....	84
FIGURA 4.13 – ESTEREOGRAMA DOS PÓLOS DA SUPERFÍCIE SN – MÁXIMO: 088/53.....	84
FIGURA 4.14- DOMÍNIOS LITOESTRUTURAIS DA MINA DO TAMANDUÁ. OS FUROS TELEVISIONADOS SE ENCONTRAM NO DOMÍNIO OESTE E ENTRE OS SUBDOMÍNIOS DE HEMATITA FRIÁVEL E ITABIRITO FRIÁVEL SILICOSO.....	86
FIGURA 5.1 - TABELA COM VALORES DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (HEARST, J.R., NELSON, P.H., PAILLET, F.L., 2000. WELL LOGGING FOR PHYSICAL PROPERTIES, 2ND EDIT. JOHN WILEY & SONS, CHICHESTER)	89
FIGURA 5.2 - VALORES DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA ENCONTRADOS PARA CADA FURO EM CADA MINA.	90
FIGURA 5.3 – IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSIDERADOS NA ANÁLISE CINEMÁTICA. (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).....	91
FIGURA 5.4 –ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍNIO A. (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).	92
FIGURA 5.5 – ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍNIO B. (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).	93
FIGURA 5.6 –ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍNIO C. (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).	94
FIGURA 5.7 –ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍNIO D. (FONTE: VALE/BVP ENGENHARIA).	95

FIGURA 5.8 – ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍCIO C, TALUDE MÉDIO 135°/60°, ÂNGULO DE ATRITO 25°.....	96
FIGURA 5.9 – ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍCIO C, TALUDE MÉDIO 180°/60°, ÂNGULO DE ATRITO 35°.....	97
FIGURA 5.10 – ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍCIO C, TALUDE MÉDIO 220°/60°, ÂNGULO DE ATRITO 25°.....	98
FIGURA 5.11 – ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍCIO B, TALUDE MÉDIO 020°/60°, ANGULO DE ATRITO 25°.....	99
FIGURA 5.12 – ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍCIO B, TALUDE MÉDIO 150°/60°, ÂNGULO DE ATRITO 35°.....	100
FIGURA 5.13 – ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍCIO A, TALUDE MÉDIO 295°/60°, ÂNGULO DE ATRITO 25°.....	101
FIGURA 5.14 – ANÁLISE CINEMÁTICA DO DOMÍCIO A, TALUDE MÉDIO 350°/60° E ÂNGULO DE ATRITO 25°.....	101
FIGURA 5.15 - ANÁLISE CINEMÁTICA TALUDE 14, MINA DO TAMANDUÁ.....	103
FIGURA 5.16 - ANÁLISE CINEMÁTICA TALUDE 15, MINA DO TAMANDUÁ.....	103
FIGURA 5.17 - ANÁLISE CINEMÁTICA TALUDE 19, MINA DO TAMANDUÁ.....	104
FIGURA 5.18 - ANÁLISE CINEMÁTICA TALUDE 20, MINA DO TAMANDUÁ.....	105
FIGURA 5.19 - ANÁLISE CINEMÁTICA TALUDE 21, MINA DO TAMANDUÁ.....	105
FIGURA 5.20 - ANÁLISE CINEMÁTICA TALUDE 20, MINA DO TAMANDUÁ.....	106
FIGURA 5.21 - ANÁLISE CINEMÁTICA TALUDE 26, MINA DO TAMANDUÁ.....	107
FIGURA 5.22 - ANÁLISE CINEMÁTICA TALUDE 30, MINA DO TAMANDUÁ.....	108
FIGURA 5.23 - ANÁLISE CINEMÁTICA DO TALUDE 14, 45°/300° E ÂNGULO DE ATRITO 36°..	109
FIGURA 5.24 - ANÁLISE CINEMÁTICA DO TALUDE 15, 65°/300° E ÂNGULO DE ATRITO 36°..	110
FIGURA 5.25 - ANÁLISE CINEMÁTICA DO TALUDE 19, 55°/95° E ÂNGULO DE ATRITO 36°....	110
FIGURA 5.26 - ANÁLISE CINEMÁTICA DO TALUDE 20, 50°/94° E ÂNGULO DE ATRITO 36°....	111
FIGURA 5.27 - ANÁLISE CINEMÁTICA DO TALUDE 21, 45°/38° E ÂNGULO DE ATRITO 36°....	111
FIGURA 5.28 - ANÁLISE CINEMÁTICA DO TALUDE 23, 50°/50° E ÂNGULO DE ATRITO 36°....	112
FIGURA 5.29 - ANÁLISE CINEMÁTICA DO TALUDE 23, 50°/90° E ÂNGULO DE ATRITO 36°....	113
FIGURA 5.30 - ANÁLISE CINEMÁTICA DO TALUDE 23, 50°/90° E ÂNGULO DE ATRITO 36°....	113
FIGURA 5.31 - A ESQUERDA O ESTEREOGRAMA MOSTRANDO OS DADOS OBTIDOS PELO OPTV E A DIREITA AS DUAS ESTRUTURAS PRINCIPAIS NA MINA GONGO SOCO.....	116

FIGURA 5.32 - A ESQUERDA O ESTEREOGRAMA MOSTRANDO OS DADOS OBTIDOS PELO OPTV E A DIREITA AS TRÊS ESTRUTURAS PRINCIPAIS NA MINA DO TAMANDUÁ (A - ACAMADAMENTO, B - FOLIAÇÃO, C - BANDAMENTO PRINCIPAL)	118
FIGURA A.1 E A.2 - À ESQUERDA, O PRIMEIRO ARRANJO DE TESTES, COM O CANO INCLINADO; À DIREITA, O SEGUNDO ARRANJO, COM O CANO NA VERTICAL.....	125
FIGURA A.3 - IMAGENS DO SOFTWARE DE AQUISIÇÃO; ACIMA TEM-SE A COMPROVAÇÃO DA INCLINAÇÃO (EM VERMELHO) CONCORDANDO COM O PROPOSTO. EM AZUL TEM-SE O POSICIONAMENTO TERRESTRE DA Sonda, EM AMBOS OS CASOS TEM-SE A CONCORDÂNCIA AO QUE FOI MEDIDO PELA BÚSSOLA DE MÃO.	126
FIGURA A.4 - COMPARAÇÃO ENTRE AQUISIÇÕES COM DIFERENTES VELOCIDADES. A ESQUERDA COM A VELOCIDADE PRÓXIMA A 2M/MIN E A DIREITA COM 1M/MIN. PERCEBE-SE COMO AS MARCAÇÕES FEITAS NO CANO APARECEM EM CADA UMA DAS VELOCIDADES PROPOSTAS.	127
FIGURA A.5 - PERCEBE-SE COMO A IMAGEM GERADA A 2M/MIN SE TORNA MAIS PIXELADA (ESQUERDA) QUE A IMAGEM GERADA A 1M/MIN (DIREITA).....	128
FIGURA A.6 - FRATURAS PRÉ-DETERMINADAS E SUAS MARCAÇÕES NO SOFTWARE WellCad.	129
FIGURA A.7 - A INDICAÇÃO “NO DEVIATION” É USADA PARA GERAR UMA IMAGEM SEM ORIENTAÇÃO MAGNÉTICA.	131
FIGURA A.8 – CONTRASTES DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA EM SOLOS E XISTOS NO FURO GSOFG00025.....	132
FIGURA B.1 - A ESQUERDA, DIAGRAMA DE MOHR MOSTRANDO AS CONDIÇÕES PARA O FRATURAMENTO NA ROCHA E A DIREITA, INCLINAÇÃO DAS JUNÇÕES COM RESPEITO A DIREÇÃO DA TENSÃO. (RETIRADA DE WYLLIE AND MAH, 2005)	134
FIGURA B.2 - A) DIAGRAMA DE MOHR MOSTRANDO A TENSÃO CISALHANTE (RETA) COMO SENDO FUNÇÃO DA COESÃO C (ONDE O EIXO VERTICAL É CORTADO) E DO ÂNGULO DE ATRITO (INCLINAÇÃO DA RETA). B) DECOMPOSIÇÃO DO PESO W EM SUAS COMPONENTES PARALELA E PERPENDICULAR AO PLANO DE ESCORREGAMENTO (DIP ψ_p) (RETIRADA DE WYLLIE AND MAH, 2005)	135
FIGURA B.3 - PRINCIPAIS TIPOS DE FALHAS DE BLOCOS EM ENCOSTAS: A) FALHA PLANAR EM ROCHA CONTENDO ARTICULAÇÕES PERSISTENTES MERGULANDO PARA FORA DA INCLINAÇÃO FACE, E EM PARALELO À FACE; B) FALHA EM CUNHA EM DUAS DESCONTINUIDADES QUE SE CRUZAM; C) RUPTURA EM TOMBAMENTO NA ROCHA FORTE CONTENDO DESCONTINUIDADES MERGULHANDO DE FORMA BEM INGREME NA FACE DO	

TALUDE; E D) FALHA CIRCULAR NO PREENCHIMENTO DA ROCHA, ROCHA MUITO FRACA OU ROCHA BASTANTE FRATURADA COM DESCONTINUIDADES ORIENTADAS ALEATORIAMENTE. (RETIRADA DE WYLLIE AND MAH, 2005)	136
FIGURA B.4 - IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS DE PLANO E DE CUNHA NO ESTEREOGRAMA: A) DESLIZANDO AO LONGO DA LINHA DE INTERSECÇÃO DOS PLANOS A E B É POSSÍVEL ONDE O MERGULHO DESTA LINHA É INFERIOR A INCLINAÇÃO DO TALUDE, MEDIDO NA DIREÇÃO DE DESLIZAMENTO, OU SEJA, $\psi < \psi_F$; B) A RUPTURA EM CUNHA OCORRE AO LONGO DA LINHA DE INTERSECÇÃO (DIREÇÃO DE MERGULHO AI) NO TALUDE COM DIREÇÃO DE MERGULHO AF PORQUE AS DIREÇÕES DE MERGULHO DOS PLANOS A E B (AA E AB) ESTÃO FORA DO ÂNGULO INCLUÍDO ENTRE AI E AF; C) PLANO DE FALHA OCORRE NO PLANO A (DIREÇÃO DE INCLINAÇÃO AA) NO TALUDE COM DIREÇÃO INCLINAÇÃO AF PORQUE A DIREÇÃO DE MERGULHO DOS PLANOS A ESTÁ DENTRO DO ÂNGULO INCLUÍDO ENTRE AI E AF. (RETIRADA DE WYLLIE AND MAH, 2005)	138
FIGURE B.5 - ANÁLISE CINEMÁTICA DE BLOCOS: (A) TIPOS DE DESCONTIONUIDADES EM UM TALUDE; E (B) ENVELOPES COM ÁREAS IGUAIS NO ESTEREOGRAMA. (RETIRADA DE WYLLIE AND MAH, 2005)	139
FIGURA B.6 - COMBINADAS, ANÁLISE CINEMÁTICA E ANALISE DE ESTABILIDADE USANDO O CONCEITO DE CONCE DE FRICÇÃO: A) CONE DE FRICÇÃO EM RELAÇÃO AO BLOCO EM REPOUSO EM UM PLANO INCLINADO; E B) PROJEÇÃO DO CONE DE FRICÇÃO SOBREPOSTO AOS ENVELOPES (RETIRADA DE WYLLIE AND MAH, 2005).....	142

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - ADAPTAÇÃO DA TABELA DE CUSTOS DE BAILLOT ET AL. (2004)	26
TABELA 3.1 - TOTAL DE FURROS PERFILADOS DURANTE OS TRABALHOS DE CAMPO.....	32
TABELA 3.2 - GRAUS DE ALTERAÇÃO (ADAPTADO DE IPT, 1984, APUD SERRA JUNIOR & OJIMA, 1998).....	48
TABELA 3.3 - CARACTERIZAÇÃO DAS ABERTURAS DE DESCONTINUIDADES, TRADUZIDO DE ISRM 1978 (OP.CIT.)	58
TABELA 3.4 - GRAU DE FRATURAMENTO (IPT, 1984, APUD SERRA JUNIRO E OJIMA, 1998)	61
TABELA 3.5 - CLASSIFICAÇÃO DE ESPAÇAMENTO, MODIFICADO DE ISRM (1978).....	61
TABELA 3.6 - COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTRUTURAS MARCADAS NO OPTV E AS VISTAS NO TESTEMUNHO DE SONDAGEM.....	67
TABELA 3.7 - COMPARAÇÕES ENTRE A PROPOSTA METODOLÓGICA DE OLIVEIRA(2015) E OS RESULTADOS OBTIDOS NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (QF).....	70
POSSIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO DIRETA DO GRAU DE FRATURAMENTO (IPT, 1984, APUD SERRA JUNIRO E OJIMA, 1998) E CLASSIFICAÇÃO DE ESPAÇAMENTO, MODIFICADO DE ISRM (1978).....	71
TABELA 4.1 - DOMÍNIOS E SUBDOMÍNIOS DEFINIDOS NA CAVA ATUAL DE TAMANDUÁ	85
TABELA 5.1 - TALUDES DO DOMÍNIO OESTE, SUBDOMÍNIO ITABIRITO FRIÁVEL DA MINA DO TAMANDUÁ	102
TABELA 5.2 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS OPTV E BVP (ENTRE PARENTESSES COM A SEGUNDA MAIOR PROBABILIDADE), MINA GONGO SOCO.....	114
TABELA 5.3 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS OPTV E RELATÓRIO BVP: POSSIBILIDADES DE RUPTURAS PARA CADA TALUDE NO DOMÍNIO OESTE (ENTRE PARENTESSES COM A SEGUNDA MAIOR PROBABILIDADE), SUBDOMÍNIO ITABIRITO FRIÁVEL.	116

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Objetivos da dissertação	18
1.2. Histórico	19
1.3. Etapas desta dissertação	20
1.4. Organização do texto	21
2. FUNDAMENTOS DO OPTICAL TELEVIEWER.....	22
2.1. Características das imagens de OPTV	23
2.2. Orientação da Imagem.....	24
2.3. Prós e Contras no uso do OPTV	25
2.4. Processando Dados de OPTV	27
2.5. Sonda OPTV	29
3. DESCRIÇÃO QUANTITATIVA DE TESTEMUNHOS VIRTUAIS PARA OBTENÇÃO de UMA CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DO MACIÇO .	32
3.1. Geologia Local - Mina de Gongo Soco.....	35
3.2. Geologia Local - Mina do Tamanduá	38
3.3. Rocha Intacta	40
3.4. Descontinuidades.....	48
3.4.1. Tipos de Estruturas.....	50
3.4.2. Rugosidade	53
3.4.3. Aberturas	57
3.4.4. Preenchimento, percolação d'água e condições de alterações das paredes.....	60
3.4.5. Grau de Fraturamento	60
3.4.6. RQD Teórico.....	66
3.5. Análise dos resultados obtidos no Quadrilátero Ferrífero (QF)	70
4. INFORMAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DAS ÁREAS EM ESTUDO.....	72
4.1. Mina Gongo Soco.....	72
4.1.1. Informações de geologia estrutural em Gongo Soco.....	72
4.1.2. Domínio Estrutural	78
4.2. Mina do Tamanduá	80
4.2.1. Acamamento S0	80
4.2.2. Bandamento Sb.....	82

4.2.3. Foliação Sn.....	83
4.2.4. Domínios Litoestruturais da Cava Atual de Tamanduá.....	85
5. ANÁLISE DE DADOS	87
5.1. Declinação Magnética	87
5.2. Comparação das Análises Cinemáticas da BVP com OPTV.	90
5.2.1. Mina Gongo Soco - Análise Cinemática BVP	90
5.2.2. Mina Gongo Soco - Análise Cinemática com dados do OPTV	95
5.2.3. Mina do Tamanduá - Análise Cinemática BVP	102
5.2.4. Mina do Tamanduá - Análise Cinemática com dados do OPTV	108
5.2.5. Resultados das Análises Cinemáticas.....	114
6. Conclusões	119
7. REFERÊNCIAS.....	122
8. Anexos	125
Anexo A: TESTES DE CONTROLE DO OPTV.....	125
A.1. Inclinação do Furo de Sondagem e Localização Terrestre da Sonda.	126
A.2. Velocidade ideal para execução da perfilagem OPTV.....	127
A.3 Posição, Mergulho e Direção das Fraturas.....	128
A.4. Correções necessárias nas imagens (profundidade, declinação magnética, distorções por alta susceptibilidade magnética, etc.)	130
Anexo B: Conceitos para Análise Cinemática.....	133
B.1. Formação de Fraturamento:	133
B.2 Análise do Equilíbrio de Taludes:	134
B.3 Tipos de Rupturas	136
B.3.1 Ruptura Planar (<i>Plane Failure</i>).....	140
B.3.2 Ruptura em Cunha (<i>Wedge Failure</i>).....	140
B.3.3 Ruptura de Topo (<i>Toppling Failure</i>).....	141
B.3.4 Cone de Fricção	141

1. INTRODUÇÃO

A busca constante pela redução de custos na produção de matérias-primas também ocorre na produção de minérios. O televisionamento de furos de sondagem surge atualmente como um importante auxílio na análise de problemas geotécnicos em minas a céu aberto e subterrâneas. Esta técnica de perfilagem geofísica é relativamente nova e foi introduzida no Brasil no ano de 2001 (*Baillet et al.*, 2004). Mesmo levando-se em conta todas as possíveis vantagens, apenas recentemente foram realizadas considerações sobre este método (*Oliveira et al.*, 2014 e *Oliveira*, 2015) sem que houvesse, até então, uma descrição detalhada para o aproveitamento das imagens.

O *Optical Televiewer* (OPTV) é um dispositivo de perfilagem geofísica que produz uma imagem contínua e orientada de 360° da parede do furo. O uso de imagens de OPTV é prática internacionalmente conhecida na identificação de feições geológicas dos estratos (*Fredrick et al.*, 2014). Conforme mencionado em *Blake* (2010), a combinação entre a técnica de sondagem com circulação reversa (sondagem RC) e o televisionamento dos furos pode levar a uma redução significativa de custos, reduzindo a necessidade de extração de testemunhos com sondagem rotativa. Desta forma, as imagens geradas pela sonda OPTV desempenham um papel auxiliar em campanhas de exploração mineral e na aquisição de informações geotécnicas.

1.1. Objetivos da dissertação

O uso de imagens de OPTV é prática conhecida na identificação de feições geológicas.

Neste trabalho, foram selecionadas perfilagens realizadas em furos de sondagem executados em algumas minas de ferro localizadas na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero, com distância máxima de 70km de Belo Horizonte.

O foco principal deste estudo é analisar as imagens feitas com o uso do OPTV, verificando as reais informações que podem ser delas retiradas, considerando as seguintes questões básicas:

- a) Quais procedimentos operacionais e correções são necessários às imagens de OPTV (p.ex. velocidade de aquisição de dados, correção devido à presença de material magnético, condição de fluido presente nos furos) para que se tenha a melhor qualidade das informações obtidas com este equipamento?
- b) É possível obter os elementos geológico/geotécnicos que fazem parte da descrição ISRM (1978) para maciços rochosos (a qual é feita a partir de amostras de rocha) por meio da análise das imagens de OPTV nas áreas consideradas neste estudo?
- c) Como se apresenta a análise de estabilidade cinemática de taludes feita a partir de estruturas marcadas em imagens de OPTV comparativamente à análise cinemática efetuada a partir de estruturas identificadas em levantamentos de superfície?

As respostas para cada um destes questionamentos serão conduzidas em tópicos específicos ao longo do texto que segue.

1.2. Histórico

Em 1987 foi desenvolvido o primeiro televisionamento óptico (*OPTV* ou *Optical Televiewer*), como um sistema único, segundo *Williams & Johnson* (2004). Este sistema resulta em imagens de 360° contínuas e orientadas das paredes de furos de sondagem, onde as características das rochas, as estruturas presentes na parede do furo de sondagem, as feições litológicas podem ser definidas.

No final da década de 1960 já surgiam versões preliminares do OPTV. Estes equipamentos eram compostos de um espelho simples inclinado, rodeado por um aglomerado de luzes, sendo este sistema inserido no furo e as imagens observadas através de um telescópio. Estes eram utilizados para a avaliação de planos de descontinuidades em escavações subterrâneas, correspondendo a um dos instrumentos mais efetivos para aprimorar o exame visual da superfície rochosa.

Segundo *Baillet et al.* (2004), uma primeira versão do equipamento de televisionamento foi desenvolvida primeiramente no Japão e apresentada durante o evento ISC 98 (*International Conference on Site Characterization, 1998, United*

States), contudo esta versão não teve sua produção continuada. A versão do OPTV tratada nesta dissertação foi utilizada no Brasil pela primeira vez no ano de 2001, segundo os mesmos autores, desenvolvida por René Colas em 1998 na França e comercializada com o nome de *Colas Camera*. Atualmente, o equipamento mais utilizado no Brasil é o *Hi-OPTV*, fabricado pela empresa *Robertson Geologging Ltd. (United Kingdom)*. Para a análise dos dados presentes nesta dissertação foi usado o *software WellCad*.

Conforme Oliveira (2015), a tendência é que esta tecnologia, o OPTV, se desenvolva cada vez mais ao longo dos próximos anos. Seu uso tem-se mostrado cada vez mais diversificado, estando presente, por exemplo, em estudos de estruturas existentes no interior de geleiras (*Roberson & Hubbard, 2010*). Foi apresentado por *Blake (2010)* como uma ferramenta de potencialização do armazenamento de informações de furos de sondagem em depósito de minério de ferro; *Morin (2005)* apontou-o como um eficiente auxílio na descrição de camadas de carvão; *Heerden (2004)* indicou que o OPTV combinado com *density log* e *Acoustic Televiewer* são equipamentos essenciais para prover informações geológicas e geotécnicas em termos de identificar características geotécnicas aplicáveis para a formulação de uma metodologia preditiva de classificação de risco na estabilidade de taludes.

1.3. Etapas desta dissertação

Esta dissertação está dividida em duas partes principais. A primeira parte descreve a aquisição de dados em campo. Foram realizadas coletas no ano de 2015, adquirindo-se dados nas minas Gongo Soco e Capanema. Em 2016 foram adquiridos os dados da Mina do Tamanduá. As análises dos dados processados são vistas no Capítulo 3, e no Capítulo 4 as informações das áreas onde os mesmos foram coletados.

Após a fase de coleta de dados, as informações foram processadas, analisadas e fez-se a elaboração das análises de estabilidade cinemática.

A marcação de estruturas e análises das imagens obtidas com *Optical Televiewer* foram realizadas utilizando o *software Wellcad*, bem como as correções necessárias para as marcações quando estas eram realizadas em imagens feitas

em furos inclinados. A análise cinemática foi realizada utilizando-se o *software Dips*, como é apresentado no Capítulo 5 desta dissertação.

1.4. Organização do texto

Esta dissertação está dividida em seis capítulos.

O Capítulo 1 introduz o trabalho desenvolvido nas minas Gongo Soco, Capanema e Mina do Tamanduá, apresentando os objetivos destas aquisições em campo e os dados coletados, assim como uma apresentação do histórico da utilização das sondas de televisionamento de furos de sondagem.

No segundo capítulo, faz-se uma apresentação do funcionamento e das possíveis aplicações da sonda *Optical Televiewer (OPTV)*, mostrando-se detalhes do equipamento que pertence ao Laboratório de Pesquisa Mineral (LPM), vinculado ao Depto. Engenharia de Minas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O terceiro capítulo traz uma aplicação aos dados adquiridos em campo da metodologia proposta em ABGE (2013) e Oliveira (2015) de aproveitamento das imagens de OPTV.

A geologia estrutural das minas de interesse é apresentada no terceiro e quarto capítulos, ressaltando-se as estruturas principais existentes em cada local, conforme descrições contidas em BVP-Engenharia (2004, 2008 e 2012).

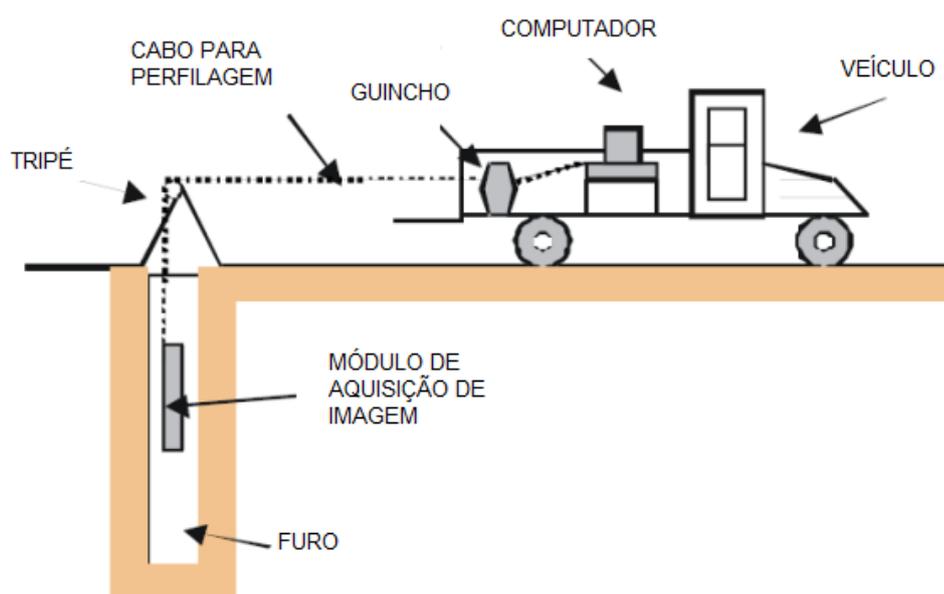
No Capítulo 5 apresenta-se uma aplicação das estruturas geológicas marcadas nas imagens geradas por OPTV, efetuando-se a análise cinemática comparativa em regiões das minas Gongo Soco e Tamanduá.

O Capítulo 6 contém as conclusões do trabalho e as respostas para as questões propostas nos objetivos.

2. FUNDAMENTOS DO OPTICAL TELEVIEWER

A técnica de perfilagem geofísica consiste na passagem de sensores que identificam parâmetros físicos dentro de um furo de sondagem, efetuando medições de várias propriedades (físicas e químicas) de solos e rochas ao redor do furo em questão (Figura 2.1). A medição dos parâmetros pode ser obtida na descida ou na subida da sonda ao longo da profundidade. Algumas sondas são especificamente fabricadas para medir mais de um parâmetro ao mesmo tempo, como é o caso das sondas usadas no presente estudo. As características físicas das sondas diferem entre si, de acordo com o princípio de funcionamento de cada equipamento.

Figura 2.1 - Imagem ilustrando a execução de perfilagem geofísica (retirado de Baillot et al 2004).



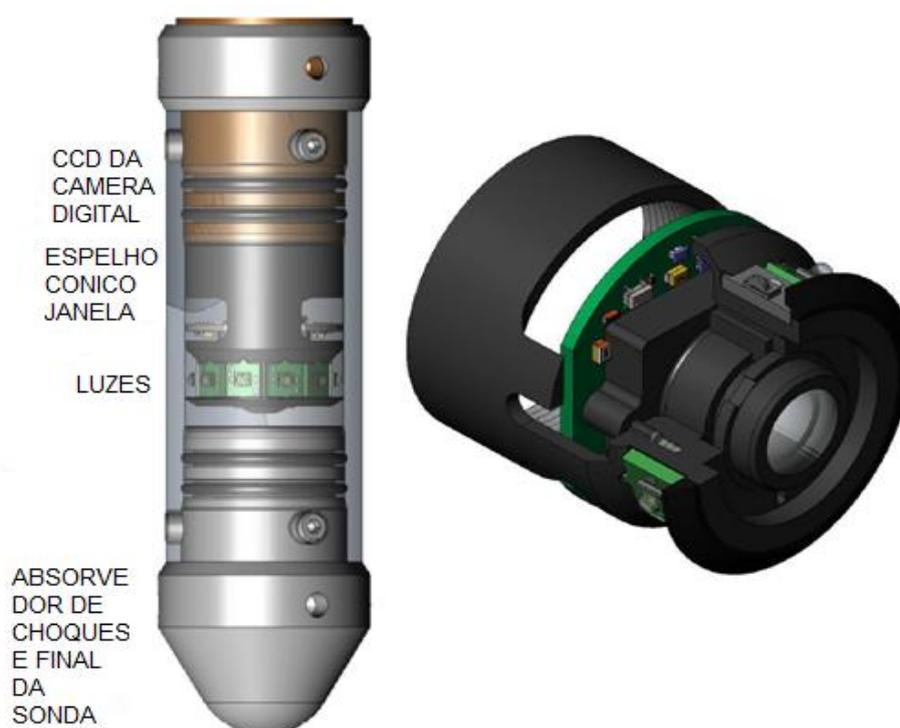
A aquisição de imagens de furos envolve um escaneamento radial da parede do furo que é orientada no espaço tal que as características de profundidade e direção do furo podem ser determinadas. Este perfil pode ser orientado, possibilitando assim uma análise cuidadosa da estrutura e geologia de interesse para cada furo. Tipicamente estes dados são exportados para análises adicionais para produzir "steronets" para a estrutura ou são usados para gerar cálculos adicionais para os perfis (por exemplo, frequência de fraturas).

Durante a perfilagem, os dados armazenados incluem o comportamento da inclinação e do azimute da ferramenta dentro do furo, com um magnetômetro tridimensional e um medidor de inclinação tridimensional. Como a ferramenta é centralizada no furo, a inclinação e azimute são adquiridas. As sondas geralmente adquirem também outros dados de telemetria para a orientação, a velocidade da perfilagem, temperatura e um número de parâmetros para o diagnóstico da operação do instrumento.

2.1. Características das imagens de OPTV

O *Optical Televiewer* gera uma imagem escaneada da parede do furo com resoluções de fraturas tão estreitas quanto 0,1 milímetro (mm) e com uma resolução radial de 1 grau ou melhor. As aplicações para este tipo de perfil incluem inspeções de defeitos em revestimentos, caracterização de fraturas em furos preenchidos tanto com ou água, que combinado a tipos de perfilagens tradicionais, pode ser usado para mineralogia e estudos de foliação. Esta ferramenta gera uma imagem da parede do furo continua e orientada em 360°, fazendo uso de um sistema óptico de imagem.

Figura 2.2 - Detalhe do Optical Televiewer (Manual do Usuário- Robertson Geologging, 2014)



Na Figura 2.2 pode-se perceber a representação do *Optical Televiewer*. A resolução da imagem é uma função do raio do furo e das configurações definíveis pelo usuário, como o intervalo de escaneamento e a amostragem por escaneamento.

Optical e *Acoustic Televiewer* são ferramentas complementares especialmente quando o propósito de pesquisa é a análise geológica estrutural. As imagens adquiridas e orientadas independentemente devem se alinhar precisamente. As imagens dos *televiewers* podem complementar a até mesmo substituir pesquisas com testemunhos de sondagem e seus problemas recorrentes como recuperação de testemunho e a orientação dos mesmos.

2.2. Orientação da Imagem

Imagens adquiridas com o *televiewer* são orientadas através da coleta simultânea de dados das componentes tridimensionais do campo magnético terrestre e componentes tridimensionais de inclinação do furo, incorporados no OPTV, essenciais para a interpretação. A imagem é rotada para uma direção referencial comum, que tanto pode ser o norte verdadeiro quanto o norte magnético. Estruturas planares que intersectam a parede do furo produzem traços senoidais na imagem do *televiewer* "desembrulhada" (Figura 2.3). Usando a direção referencial gravada durante a perfuração, senóides podem ser analisadas para a produção características estruturais de mergulho (*dip*) e da direção mergulho (*dip direction*).

A forma de construção das marcações realizadas a partir das imagens geradas pelo OPTV podem ser vistas na Figura 2.4. Conforme *Chung et al. (2008)* as imagens geradas com *Televiewers* resultam em imagens da parede do furo contínuas e orientadas 360° a partir da qual o caráter, a relação e a orientação da litologia e as características planares estruturais podem ser definidas.

Figura 2.3 - Formação e Orientação da imagem gerada pelo OPTV (Manual do Usuário- Robertson Geologging, 2014)

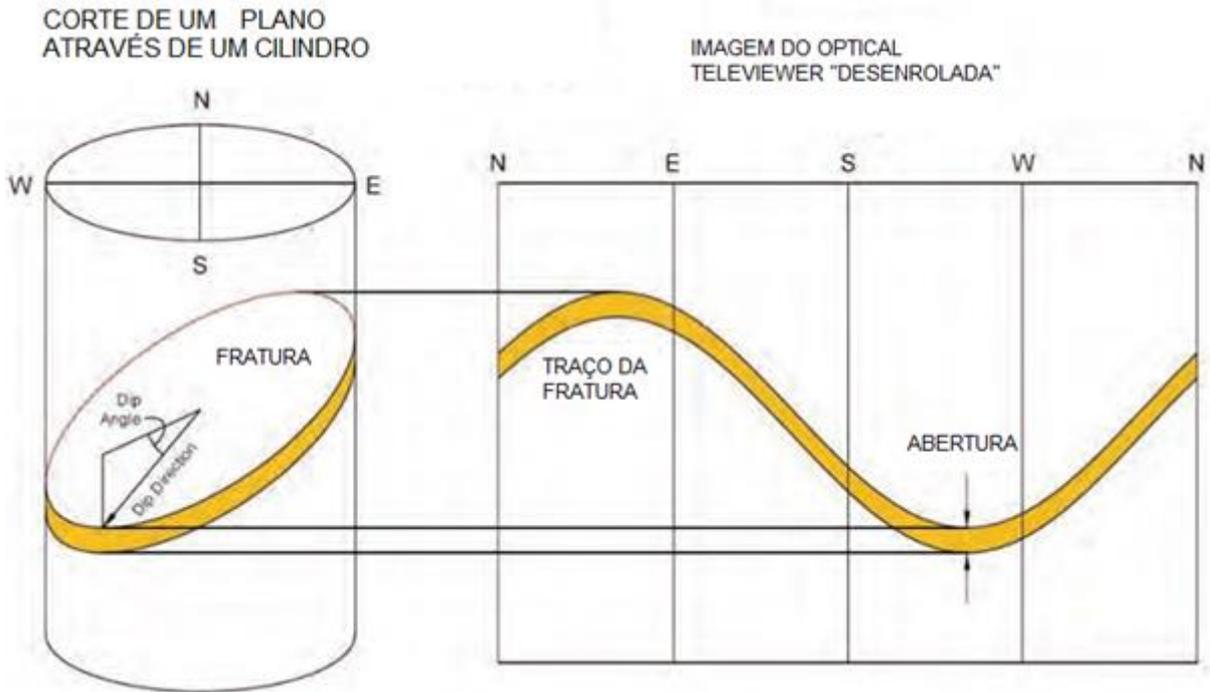
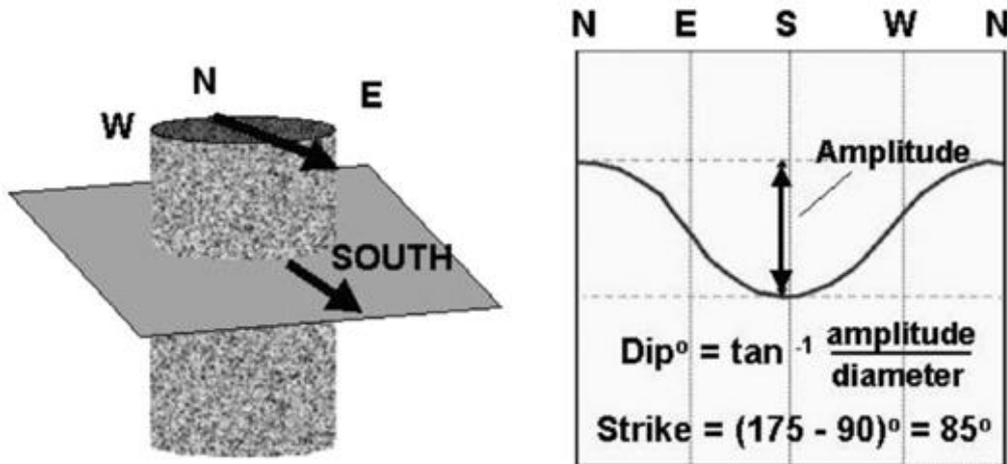


Figura 2.4 - Ilustração representando o esquema de transformação das imagens inicialmente "enroladas", fechadas, para imagens "desenrolas", ou abertas e a definição de *Dip* e *Dip Direction* em cada caso. (retirado de Chung et al., 2008)



2.3. Prós e Contras no uso do OPTV

O detalhe *fine-scale* desses registros integrados com dados de diferentes perfis podem proporcionar maior nível de interpretação de litologia, estrutura e estudos relacionados com a migração de fluidos. O valor destes registros aumenta

de forma significativa se for possível adquirir os ópticos e os acústicos, pois as imagens adquiridas e orientadas de forma independente devem se alinhar com precisão e as características observadas na imagem gerada pelo perfil óptico podem não estar presentes na acústica e vice-versa.

O valor percebido na perfilagem com o *TeleViewer* são as imagens de alta resolução, e na alta qualidade das imagens orientadas da parede da perfuração. É importante notar que estas são imagens da parede do poço e representam uma formação rochosa afetada por um dano de perfuração, em contato com fluidos do furo. A orientação de características planas é local e pode não representar a tendência geral da estrutura na rocha. Isto é superado até certo ponto, se um certo número de furos em um local puder ser conectado de tal forma que exista uma amostragem estatística da estrutura.

Baillot et al. (2004) apresenta uma tabela de custos para a utilização do televisionamento, semelhante a Tabela 2.1, pode-se perceber que o custo do conjunto televisionamento + Perfuração Roto-Percussiva fica em média 40% mais baixo que a sondagem testemunhada. Esta estimativa foi realizada em uma mina de Ferro na Austrália.

Tabela 2.1 - Adaptação da tabela de custos de Baillot et al. (2004)

Atividade	Custo (Dólar/metro)
Perfuração com Sondagem de 100mm	150
Perfuração Roto-Percussiva	50
Televisionamento	40

As principais vantagens no uso dos métodos e observações do *Optical Televiewer* incluem:

- Potencial de esforço de perfilagem testemunhada reduzida;
- Os registros permitem ao investigador ver claramente as zonas de fraca recuperação do núcleo e intenso fraturamento *in-situ* - o equivalente a 100% de recuperação pode ser alcançada;
- Perfilagem com OPTV é relativamente barato para se realizar e é altamente portátil permitindo que a técnica possa ser utilizada em terrenos difíceis;
- Perfilagem com testemunho exige várias execuções e muitas vezes acabam sendo registrados como uma série de segmentos entre paradas ou

execuções, enquanto o OPTV fornece um registro contínuo do furo com profundidade e referências mais precisas;

- Dados gravados, como informações de estruturas marcadas sobre as imagens, podem ser importados diretamente para aplicações de *software*, tais como *Dips* para análise cinemática.

As principais desvantagens na utilização do *Optical Televiewer*, incluem:

- Necessária a perfilagem em uma velocidade não superior a 1,5m/min;
- Existência de lama de perfuração no interior do furo a ser perfilado, impossibilitando o aproveitamento das imagens;
- Não poder identificar diretamente litotipos sem que exista uma sondagem testemunhada que de embasamento para as informações retiradas do OPTV.

2.4. Processando Dados de OPTV

Os passos seguidos para o processamento de dados do OPTV incluem geralmente os seguintes:

- Importando os dados brutos em um *software* projetado para manipulação e apresentação de dados de registro geofísicos;
- A aplicação de correções de profundidade conforme necessário nos casos de a sonda ficar presa e problemas no cabo - normalmente, uma verificação é concluída para garantir que recursos comuns a todos os registros sejam alinhados na mesma profundidade do furo.
- As imagens do OPTV estão alinhadas tanto com relação ao topo do furo de sondagem quanto ao norte magnético. Neste ponto, os dados de orientação do *televiewer* podem ser corrigidos nas porções do furo claramente afetadas por interferências magnéticas.

A chave para o controle de qualidade é garantir a precisão do sistema de orientação do *televiewer*, o que deve ser verificado com um dispositivo de calibração antes da perfilagem. Na presença de materiais magnéticos (minerais e metais) no furo de sondagem, as leituras de azimute da ferramenta serão influenciadas.

Para que se tivesse algum controle desta possível influência magnética durante o processo de perfilagem foi utilizada uma sonda de Susceptibilidade Magnética que, segundo *Costa et al. (2007)* e *Dearing et al. (1999)*, apontava a possível presença de material magnético nas proximidades do furo em que estava

se realizando a filmagem. Este registro de Susceptibilidade serve como um indicativo inicial de onde poderia ser necessário o desligamento dos magnetômetros do OPTV, para que estes não sofressem nenhum tipo de influência do corpo de minério de ferro próximo. Este perfil (Susceptibilidade) era realizado antes da filmagem, para que se tivesse uma previsão da possível influência magnética. Tal influência pode ser resolvida pela aplicação de uma correção para os dados ao longo das porções afetadas no perfil, da seguinte forma:

- Orientando a imagem com o topo do furo em furos inclinados utilizando os dados recolhidos pelo inclinômetro do *televiwer* e, em seguida, usando informações auxiliares a partir de uma ferramenta de desvio furo (giroscópio ou *Maxibore*), que não é afetado por materiais magnéticos para girar a imagem para o norte;
- Usando os dados adquiridos pelos medidores de inclinação para corrigir os dados magnéticos. Os dados magnéticos podem então ser utilizado para orientar a imagem para norte. Tipicamente, esta técnica pode ser aplicada utilmente se apenas secções curtas do furo são afetadas por materiais magnéticos.

2.5. Sonda OPTV

A sonda utilizada para a aquisição de dados nesta dissertação foi fabricada pela *Robertson Geologging Ltd. (UK)*, possuindo 1,63m de comprimento e diâmetro de 52mm na seção maior. O *Hi-OPTV* fornece uma imagem contínua de alta resolução das paredes do furo, utilizando uma fonte de luz convencional (Figura 2.6). Um sistema óptico único permite que a sonda faça um *scan* de 360° graus simultaneamente. Esta informação é processada em tempo real para produzir uma imagem completa e "desembrulhada" do furo televisionado, com orientação para o norte magnético.

O OPTV é baseado em uma câmera de CCD *downhole* que registra o reflexo das paredes do furo em um espelho hiperbólico. Em sucessivos incrementos de profundidade (normalmente 0,5 mm), anéis de pixels correspondentes às varreduras das paredes do furo são adquiridos a partir da sonda e combinados em uma imagem. Esta imagem é gravada em disco para posterior análise de dados.

A sonda OPTV-Robertson Geologging é capaz de televisionar furos com diâmetros variando de 70mm a 472mm. O trabalho em campo compreende a aquisição de dados utilizando a sonda, que para seu melhor funcionamento é colocada no furo com dois centralizadores (Fig. 2.7 e Fig. 2.8), fazendo com que fique posicionada na parte central do furo de sondagem, para que não ocorram zonas de obscurecimento ao longo da filmagem. Estas zonas escuras são causadas não por falha na aquisição, mas sim por aumento da distância entre a sonda e a parede do furo, o que pode também ser causado por um abatimento na parede do furo, aumentando assim a distância entre a câmera e o maciço.

Figuras 2.6 - À esquerda, imagem esquemática dos componentes da sonda OPTV (retirada do Manual do Usuário- Robertson Geologging, 2014) e à direita, ilustração mostrando aspectos internos e externos da sonda (site www.geologging.com).

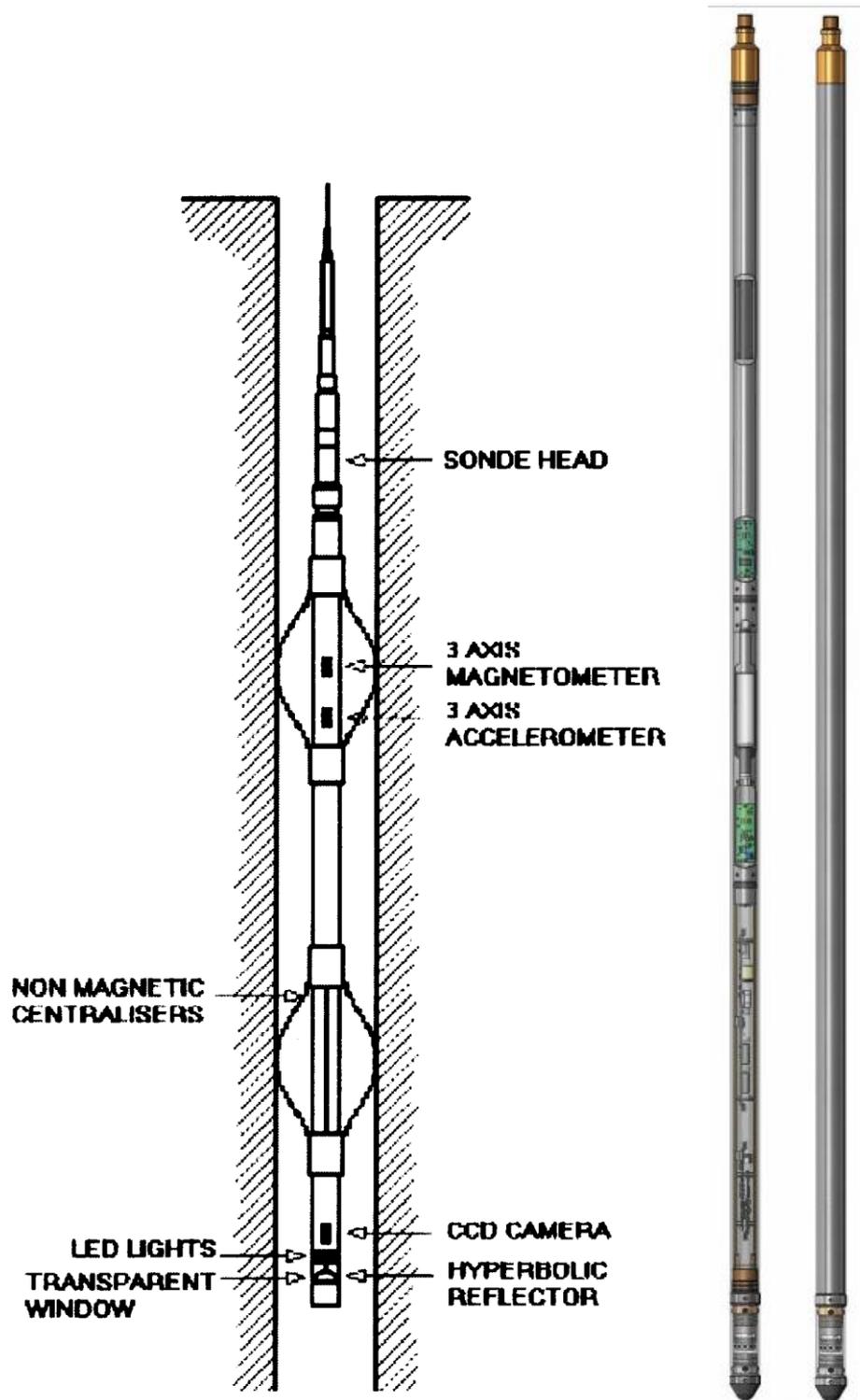


Figura 2.7 - Componentes para a centralização da sonda OPTV.



Figura 2.8 - Tripé de Suporte para o cabo de aquisição, conectado à sonda.



3. DESCRIÇÃO QUANTITATIVA DE TESTEMUNHOS VIRTUAIS PARA OBTENÇÃO DE UMA CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DO MACIÇO

No presente capítulo, é feita uma aplicação da metodologia de aproveitamento do testemunho virtual proposta em Oliveira *et al.* (2014) e Oliveira (2015) às imagens produzidas por OPTV nas minas Tamanduá e Gongo Soco.

Na Tabela 3.1 tem-se a descrição de todos os furos cujas filmagens estão disponíveis, com seus respectivos comprimentos e o total filmado. Vários furos foram filmados na Mina Capanema, porém com pouco aproveitamento, devido às condições dos furos normalmente bloqueados, produzindo registros de OPTV com pequenos comprimentos. Assim, os perfis obtidos a partir dos furos de Capanema tiveram seu uso voltado apenas à observação da qualidade das imagens (resolução e contraste de coloração entre litologias).

Tabela 3.1 - Total de furos perfilados durante os trabalhos de campo

Mina	Furos	Profundidade (m)	Intervalo Perfilado (m)	Comprimento Perfilado (m)	% Perfilada
Mina Gongo Soco	GSOFG00023	115,0	0-111	111	96,5
	GSOFG00025	110,4	0-109	109	98,7
	GSOFG00026	160,4	0	0	0,0
	GSOFG00027	150,5	0-49	49	32,5
Mina de Capanema	CAPFG00011	302,3	0	0	0,0
	CAPFG00013	217,8	0-19	19	8,7
	CAPFG00014	101,3	0-23	23	22,7
	CAPFG00019	100,0	0-67	67	67,0
	CAPFD000157	352,1	80-121	41	11,6
	CAPFD000159	302,5	174-237	63	20,8
	CAPFD000180	133,0	0-64	64	48,1
	CAPFD000192	169,4	95-110	15	8,8
Mina do Tamanduá	TAMFD00022	120,0	0 - 117	117	97,5
	TAMFD00069	151,0	0-147	147	97,3

A caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos é fundamental para a identificação de condicionantes geológicas associadas à estabilidade de escavações e estruturas subterrâneas. Várias estruturas existentes no interior dos

maciços rochosos não são normalmente acessadas ou quando observadas via sondagem testemunhada tem um custo muito elevado, tornando o adensamento de malha economicamente inviável. Essas estruturas não acessadas ou observadas podem influenciar completamente a estabilidade da rocha intacta, afetando diretamente a estabilidade de taludes em minas de céu aberto, a estabilidade de tetos em minas subterrâneas ou a estabilidade de qualquer construção urbana.

Estruturas como planos de foliação, dobras, conjunto e sistemas de fraturas, percolação de água no maciço e aberturas podem ser completamente perdidas por uma recuperação de testemunho pobre. O televisionamento surge então como um auxílio na análise dos possíveis pontos de fraqueza existentes em um maciço rochoso. As imagens geradas pelo OPTV não devem ser consideradas como um substituto para a sondagem testemunhada, mas sim um poderoso aliado em situações em que os materiais não são recuperados da melhor forma.

Oliveira (2015) observa que hoje no Brasil cerca de sete empresas fornecem o serviço de televisionamento de furos. Este necessita de máxima atenção para que o aproveitamento das imagens geradas seja o maior possível, podendo assim melhor caracterizar e classificar o maciço rochoso fornecendo valiosas informações.

O propósito do estudo realizado por Oliveira (2015) é atingir um mínimo grau de padronização na caracterização e classificação de descontinuidades em um maciço rochoso a partir de imagens das paredes de furos de sondagem. Considerando que já existe uma sugestão para a descrição quantitativa de descontinuidades de maciços em ISRM (1978), Oliveira (2015) optou por seguir as mesmas sugestões de parâmetros aí descritos, adaptando esses parâmetros às necessidades do televisionamento de furos. O próprio ISRM já admite o uso de câmeras para caracterizar descontinuidades, em especial quando se refere a aberturas no maciço, pois estas podem influenciar diretamente nas tensões cisalhantes e na percolação de água dentro do maciço.

É importante ressaltar novamente a relevância da qualidade da imagem para que se possa realizar uma análise mais proveitosa. Para que se tenha uma filmagem que gere mais benefícios, é importante que o furo esteja devidamente limpo.

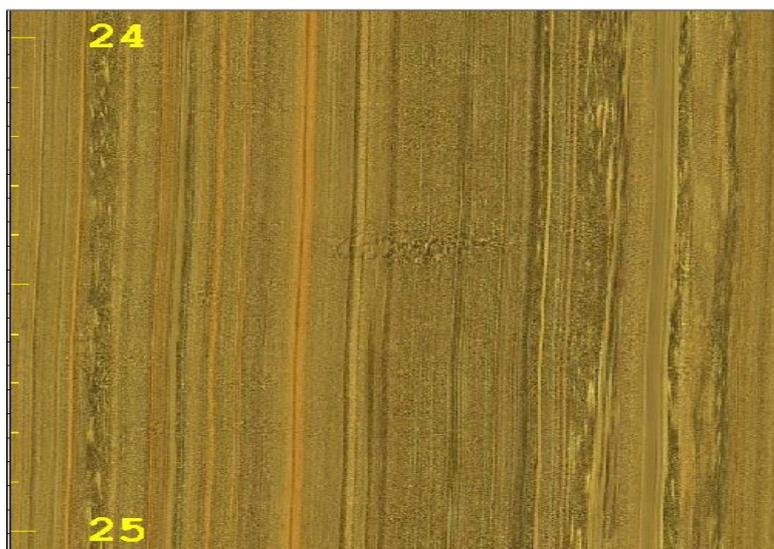
No processo de aquisição de dados efetuado durante este estudo, pode-se presenciar algumas situações que dificultaram as posteriores análises, citando-se como exemplo o excesso de lama de perfuração dentro do furo a ser televisionado.

Caso não seja feita uma limpeza do furo, torna-se impossível realizar uma boa filmagem (Figura 3.1).

Tendo em vista que um maciço rochoso pode ser representado, em muitas situações, por um conjunto de blocos de rocha intacta delimitados por descontinuidades, é essencial que sejam descritas tanto a rocha intacta quanto os tipos de descontinuidades que a limitam está pedaços intactos. Desta forma, Oliveira (2015) sugere que se faça a descrição em duas partes distintas, conforme segue:

1. Rocha Intacta
2. Descontinuidades
 - 2.a) Tipo de estrutura
 - 2.b) Rugosidade
 - 2.c) Abertura
 - 2.d) Preenchimento, percolação de água e condições de alterações das paredes
 - 2.e) Grau de Fraturamento
 - 2.f) RQD Teórico (Oliveira 2014 e 2015)

Figura 3.1 - Imagem realizada no furo GSO00026 - Mina Gongo Soco. No momento do televisionamento, mesmo tendo-se aplicado flocculante (sulfato de alumínio) com 24h de antecedência, o furo apresentou excesso de lama de perfuração impedindo a filmagem.



3.1. Geologia Local - Mina de Gongo Soco

Conforme citado em BVP-Engenharia (2008), a cava da Mina de Gongo Soco possui um alongamento segundo a direção E-W, sendo que a porção norte da cava exhibe uma menor número de bancos em relação à porção sul. A geologia da cava apresenta como principais litotipos aflorantes: solo saprolítico, rocha intrusiva metabásica, hematitas, itabiritos, quartzito, filitos e xistos.

Solo: Na porção mais elevada do talude sul, aparece uma cobertura de solo com espessura variada. À medida que se aprofunda no solo, observa-se o surgimento gradacional das estruturas geológicas devido à diminuição do grau de alteração/. O solo saprolítico apresenta coloração que varia de avermelhado/amarelado nas proximidades da superfície chegando a esbranquiçado em alguns setores mais profundos

Rocha Intrusiva: Aparece como corpos alongados na porção norte da cava com direção Leste-Oeste, descontínuos e concordantes com o bandamento da encaixante em contato abrupto. Quando em contato com o filito prateado, este adquire geralmente uma coloração típica, ciano.

Hematitas Friáveis: As hematitas se concentram na parte mais profunda e central da cava, alongadas segundo a foliação, no eixo Leste-Oeste. A Hematita friável talcosa é esbranquiçada e aparece a nordeste da cava, que pode estar associada a percolação de fluídos. Existe também um pequeno corpo de hematita friável argilosa alongado segundo o eixo noroeste sudeste aparecendo no lado norte da cava, de coloração avermelhada.

Itabirito Friável: No geral os corpos de itabirito friável são alongados na direção Leste-Oeste. Os principais tipos aflorantes são: o silicoso, o limonítico, o dolomítico e o argiloso. O itabirito friável silicoso é composto por bandas de óxidos de ferro intercaladas com bandas silicosas, ambas com espessura variada. No geral o que diferencia o itabirito friável silicoso e o itabirito friável limonítico é o grau de alteração da rocha, que no primeiro é classificada como não alterada a levemente alterada enquanto que no itabirito friável limonítico as bandas de ferro já estão completamente alteradas. O itabirito friável argiloso é constituído por bandas milimétricas a centimétricas argilosas alternadas com bandas milimétricas a centimétricas ferruginosas. O itabirito friável dolomítico aparece discretamente na

porção central do talude norte, em contato direto com a Hematita Friável Argilosa, itabirito Friável Silicoso e o filito prateado da Formação Batatal.

Itabiritos Semi-compactos: Os principais representantes desse grupo são o itabirito semi-compacto silicoso, o itabirito semi-compacto limonítico e o itabirito semi-compacto argiloso. No geral os corpos de itabirito semi-compacto são alongados segundo o eixo leste-este e aparecem interdigitados com os itabiritos friáveis silicosos. O itabirito semi-compacto silicoso é formado por bandas de espessura variada de quartzo alternada com de ferro. O itabirito semi-compacto limonítico e o itabirito semi-compacto argiloso afloram em pequenas regiões, respectivamente, a oeste e a leste da cava. O itabirito semi-compacto limonítico tem as bandas ferruginosas oxidadas alternadas com bandas quartzosas. Já o itabirito semi-compacto argiloso é formado pela alternância de bandas silicosas, argilosas e ferruginosas. A alteração das bandas ferruginosas contribui para o aumento da consistência dos litotipos.

Itabiritos Compactos: afloram predominantemente a leste da cava e são caracterizados por apresentarem consistência elevada. Os principais representantes desse grupo é o itabirito compacto silicoso e o itabirito compacto silicoso talcoso. Além da consistência elevada, geralmente são menos fraturados, quando comparados com os outros itabiritos. Ambos aparecem pouco ou não alterados.

Filito Amarelo: de coloração amarela intensa, aflora na porção noroeste da cava da mina Gongo Soco. Esse litotipo é alongado segundo o eixo leste oeste e está em contato direto com o itabirito semi-compacto limonítico, itabirito friável silicoso e o friável limonítico.

Filito Prateado: atribuído à Formação Batatal, aflora na forma de cinturão com direção leste oeste, na porção central do talude norte da casa. Sua principal característica é a coloração prateada.

Quartzitos: atribuído a Formação Moeda, aflora na forma de um cinturão, menos espesso que os filitos, alongado na direção Leste-Oeste.

Xisto: atribuído ao Grupo Nova Lima, na porção mais alta do talude norte da cava. Sua coloração varia de avermelhada para acinzentada dependendo da alteração.

Em se tratando da geologia estrutural da área, foram identificadas várias estruturas planares e lineares, sendo as principais: Bandamento (Sb), Foliação (Sn), Clivagem de fratura (Sn+1), Famílias de Fraturas (Fr), presentes nas rochas

metabásicas (IN), Lineação de intersecção (Li) e Eixo de dobra (bn). Aqui vamos discutir somente o bandamento Sb, a foliação Sn e as fraturas, que são estruturas possíveis de visualização com o OPTV.

O bandamento (Sb) é a estrutura principal e condicionante da estabilidade dos taludes na Mina de Gongo Soco, sendo possível sua identificação em todas as litologias da cava, com exceção de IN.

Outra estrutura penetrativa observada em praticamente todos os litotipos é a foliação Sn. A geração da Sn pode estar associada tanto a processos cisalhantes como a dobramentos. Considerando que o evento gerador desta foliação seja um cisalhamento, ela ocorreu concomitantemente ao estiramento mineral. Caso seja o dobramento o evento gerador desta estrutura, pode-se considerar que ela é plano axial do sinclinal isoclinal regional (Sinclinal Gandarela).

Em se tratando das fraturas, de uma maneira geral, as juntas apresentam persistência métrica, mas pode chegar a valores sub-decamétricos, correspondendo à altura da bancada. Suas superfícies são predominantemente lisas e onduladas, fechadas, sem preenchimento e com espaçamento de pequeno a moderado (centimétrico e decimétrico).

3.2. Geologia Local - Mina do Tamanduá

Segundo BVP-Engenharia (2012), o cenário final da mina Tamanduá terá direção principal N-S (direção dos principais taludes). A parte mais profunda da cava terá desnível de 570 metros em relação à parte mais alta, com elevações de 960m e 1530m respectivamente.

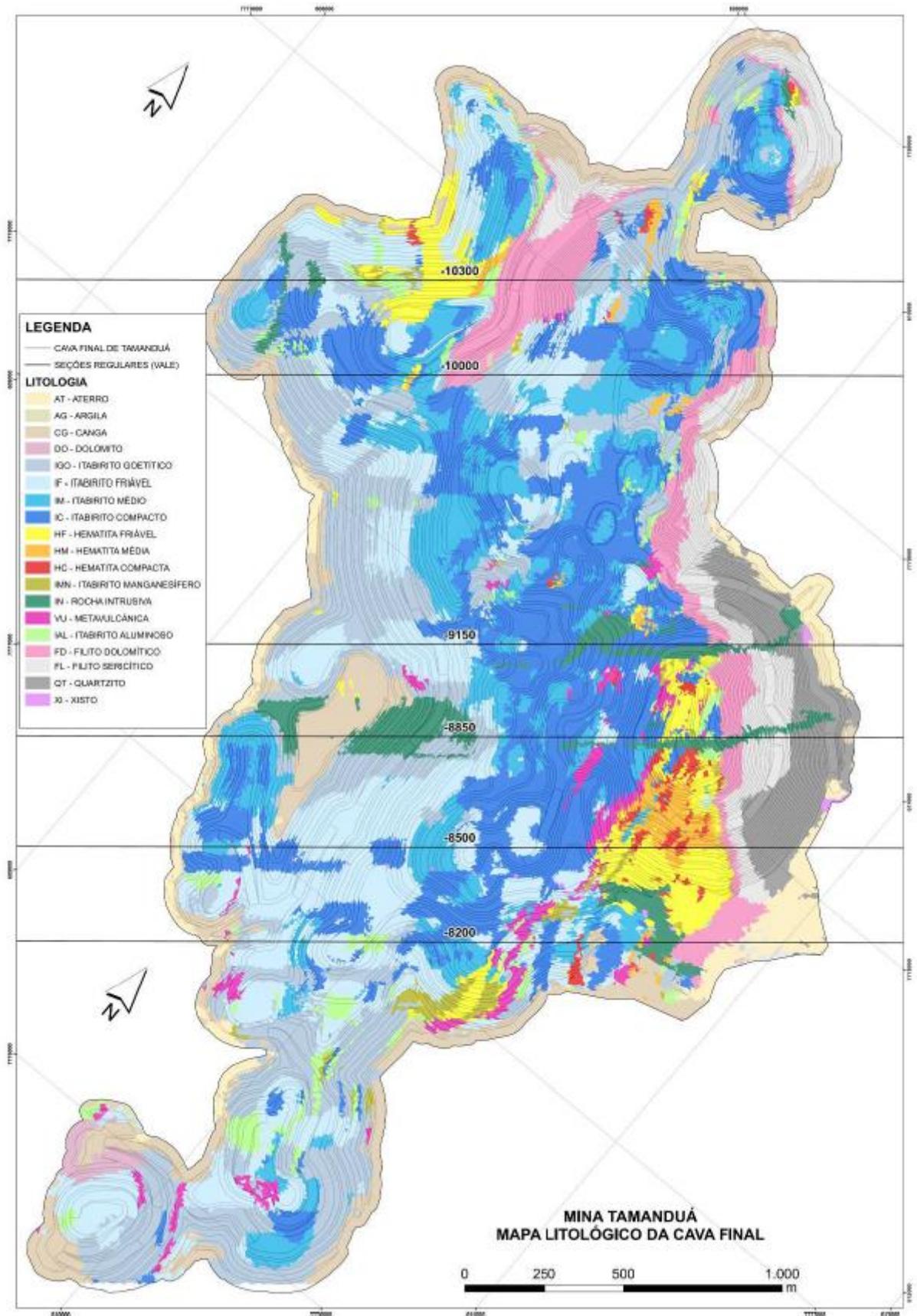
Os taludes da cava final foram projetados com mergulhos de face de 50, 55 e 65 graus, principalmente. Taludes bem suaves, com ângulos de face inferiores a 45 graus estão presentes principalmente na porção sul da cava, nas proximidades do Condomínio Morro do Chapéu e também no domínio das intrusivas, de alta ciclagem.

A cava final de Tamanduá será constituída predominantemente por itabiritos friáveis (IF, IGO), itabiritos médios (IM), itabiritos compactos (IC), filitos e quartzitos, com presença subordinada de hematitas, itabiritos argilosos (IAL, IMN), rochas intrusivas e metavulcânicas, como mostrado na Figura 3.2 abaixo.

De acordo com o modelo estrutural, a mina é desenvolvida ao longo do eixo de uma mesoestrutura sinformal denominada Sinforme do Tamanduá, de eixo **NW-SE**, caracterizado como fechado, ligeiramente assimétrico e vergente para W-SW.

Esta estrutura, definida e caracterizada em estudos anteriores, constitui dobra parasítica posicionada no flanco leste do Sinclinal Moeda, de eixo também de direção **NW-SE**. Esta direção é concordante com a direção geral do acamamento S0, medido nos filitos e quartzitos da encaixante (de atitude máxima em 074/71). Entretanto, o bandamento composicional Sb, a foliação Sn e as superfícies de cisalhamento Scis mostram-se subparalelos e com direção geral NS (com variações localizadas para NW-SE e NE-SW), com mergulhos para E, moderados a verticalizados.

Figura 3.2 - Mapa Litológico da Cava Final de Tamanduá



3.3. Rocha Intacta

Segundo Oliveira (2015), os parâmetros sugeridos para a descrição da matriz rochosa possíveis de serem observados nas imagens de televisionamento e de interesse para análises geotécnicas, são: a descrição dos litotipos, estruturas, texturas, composição mineralógica e seu grau de alteração. Oliveira alerta quanto à necessidade de se descrever os aspectos do corpo como um todo, incluindo-se estruturas ditas penetrativas como foliação, xistosidade, bandamento, acamadamentos, dobramentos e veios.

É relevante ressaltar a necessidade de familiaridade do analista das imagens com relação às litologias de interesse. Furos de sondagem podem estar "sujeitos" pela lama usada na perfuração, fazendo com que os testemunhos apresentem coloração diferente da caixa de testemunhos quando filmados ou devido à iluminação gerada pelo OPTV, ou a filmagem pode não estar bem correlacionada com o testemunho devido a alguma perda causada por fragmentação do testemunho durante a sondagem (Figuras 3.3 a 3.5). Percebe-se as possíveis perdas de informação nas figuras citadas e como elas foram "recuperadas" pelas imagens.

Figura 3.3 - Foto da caixa de testemunho (à esquerda) do furo FD00022 da Mina do Tamanduá e parte do televisionamento (à direita) do furo FD00022 da Mina do Tamanduá.

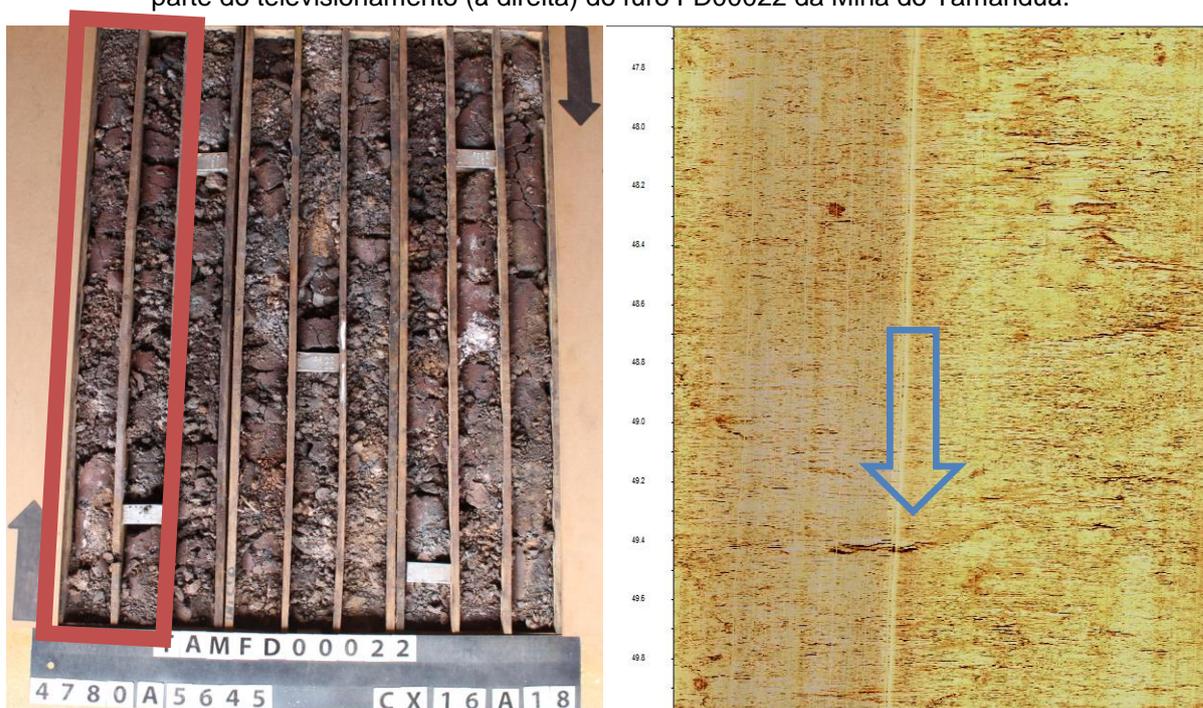


Figura 3.4 - Foto da caixa de testemunho do furo GSOFG00027 da Mina Gongo Soco e parte do televisionamento do furo, que na foto aparece bastante deteriorado.

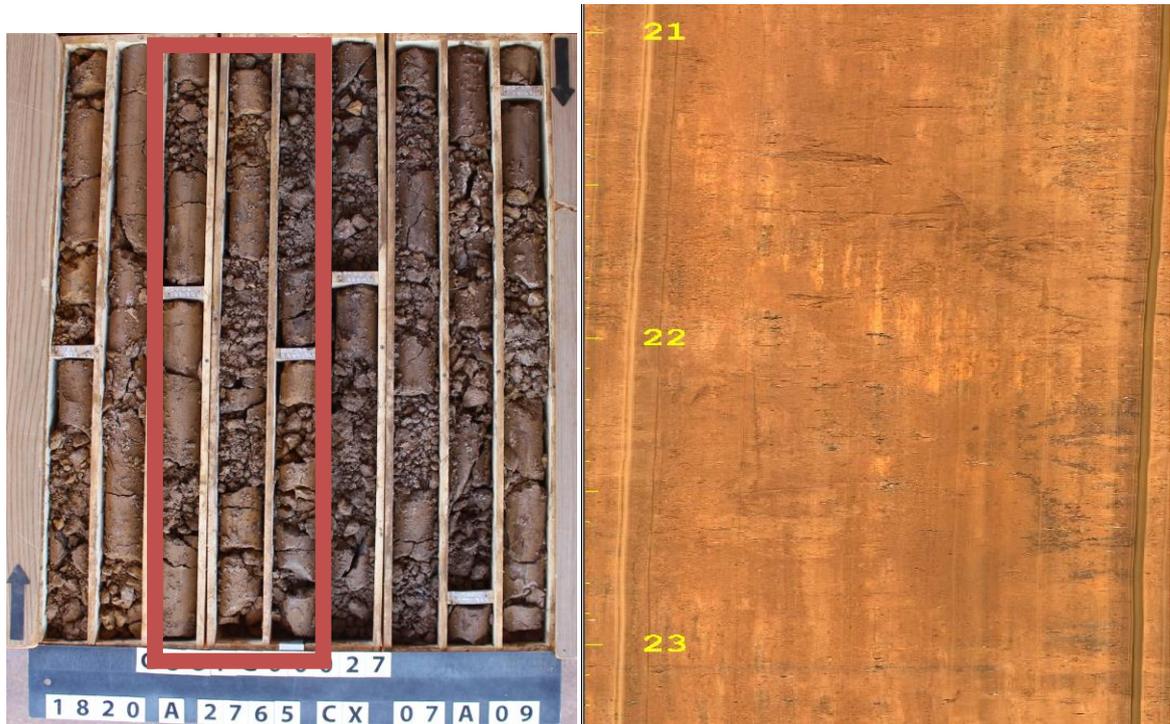


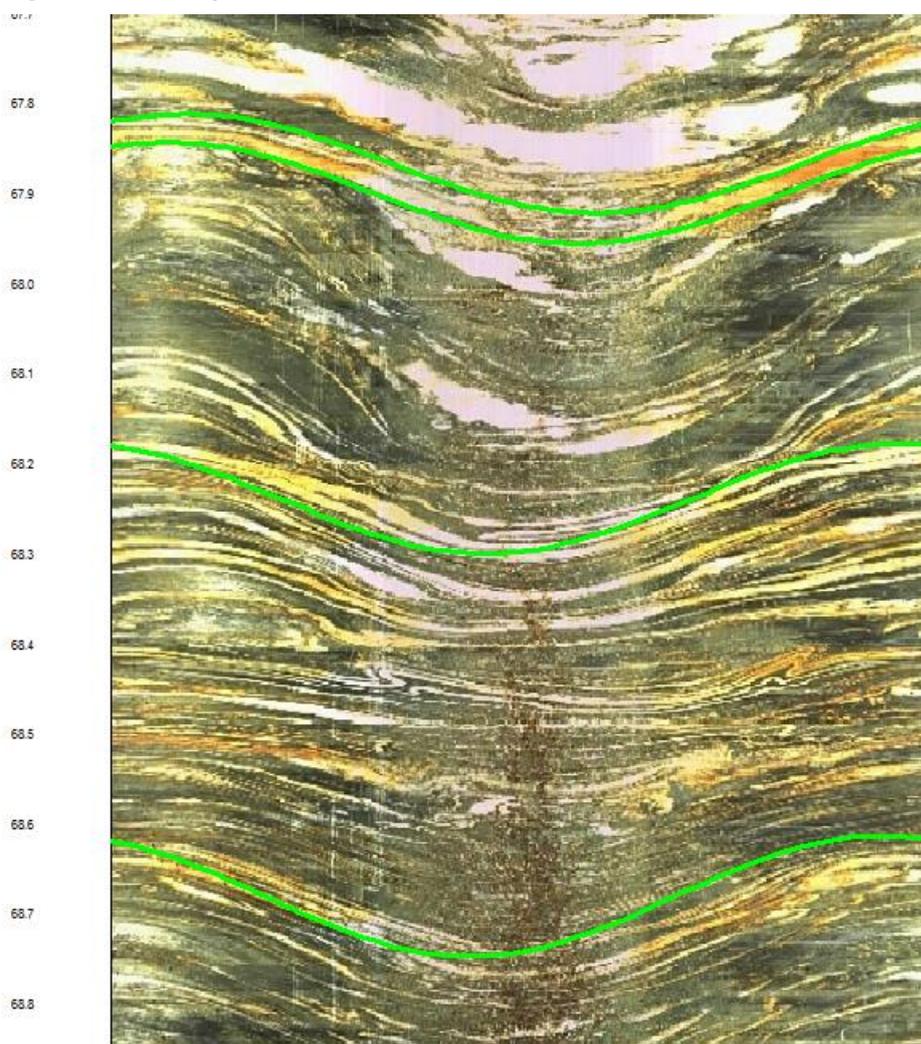
Figura 3.5 - Foto de testemunhos do furo GSOFG00025 na Mina Gongo Soco. O trecho deteriorado assinalado em vermelho, aparece na imagem de OPTV à direita.



Percebe-se nestas imagens um dos grandes vantagens no uso do OPTV, que é a observação de estruturas ainda preservadas na rocha friável mesmo após os processos geológicos ocorridos. Neste caso, análises sobre a qualidade do material podem ainda ser realizadas, já que no testemunho apenas concluiu-se que se trata de um material bastante degradado.

Oliveira (2015) ressalta a importância de se demarcar a foliação/bandamento ao longo de toda a imagem do furo de sondagem, verificando as possíveis mudanças relevantes na sua orientação, o que pode indicar alterações no perfil geotécnico e estrutural e no comportamento litológico. Na Figura 3.6, percebe-se o bandamento marcado em verde na imagem gerada por OPTV. Não foram marcados todos os bandamentos observados para que não se poluisse a imagem. A equipe de trabalho acordou que seriam marcados os bandamentos uma vez a cada um metro aproximadamente.

Figura 3.6 - Imagem das marcações dos bandamentos no furo GSOFG00023, da Mina Gongo Soco.



Outra estrutura a que deve ser apresentada e indicada na imagem gerada pelo testemunho são os veios existentes no meio da estrutura principal (figura 3.8). Estes veios são visualmente muito diferentes das rochas que o cercundam. Na Figura 3.7 vê-se um veio de quartzo de aproximadamente 70cm, cercado por filito.

Figura 3.7 - Imagem de um veio de quartzo no Furo GSOFG00025.

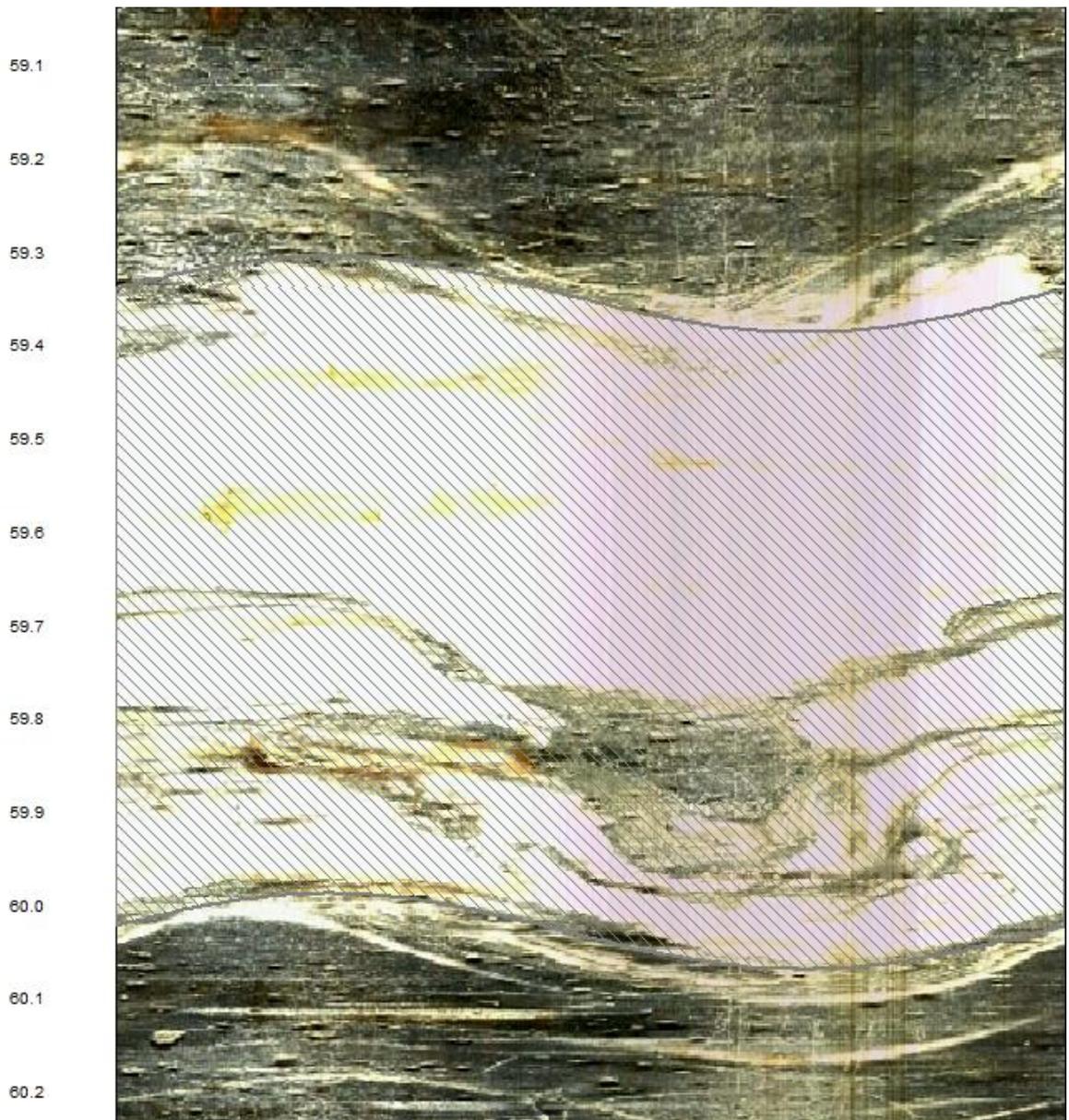
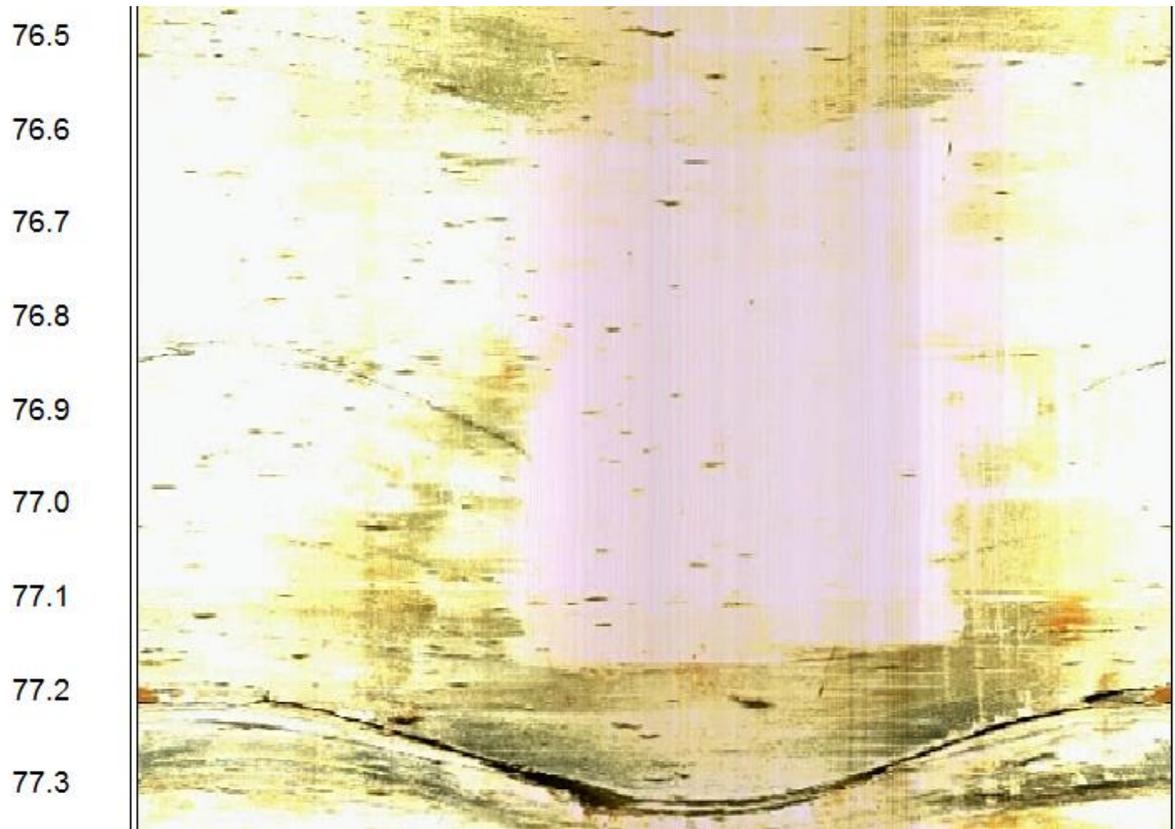


Figura 3.8 - Outro veio de quartzo com uma marcação do bandamento principal e seguido de uma fratura.



As figuras a seguir fazem referência a outras estruturas presentes nos furos perfilados que podem ser visualizadas. Na Figura 3.9 tem-se uma dobra no meio do Filito Conglomerático no furo GSOFG00025. Na Figura 3.10 vê-se o nível d'água presente no furo GSOFG00025. Na Figura 3.11, tem-se um contato de Filito Batatal com o Quartzito Sericítico, retirado do furo GSOFG00023.

Figura 3.9 - Dobra no Filito, furo GSOFG00025.

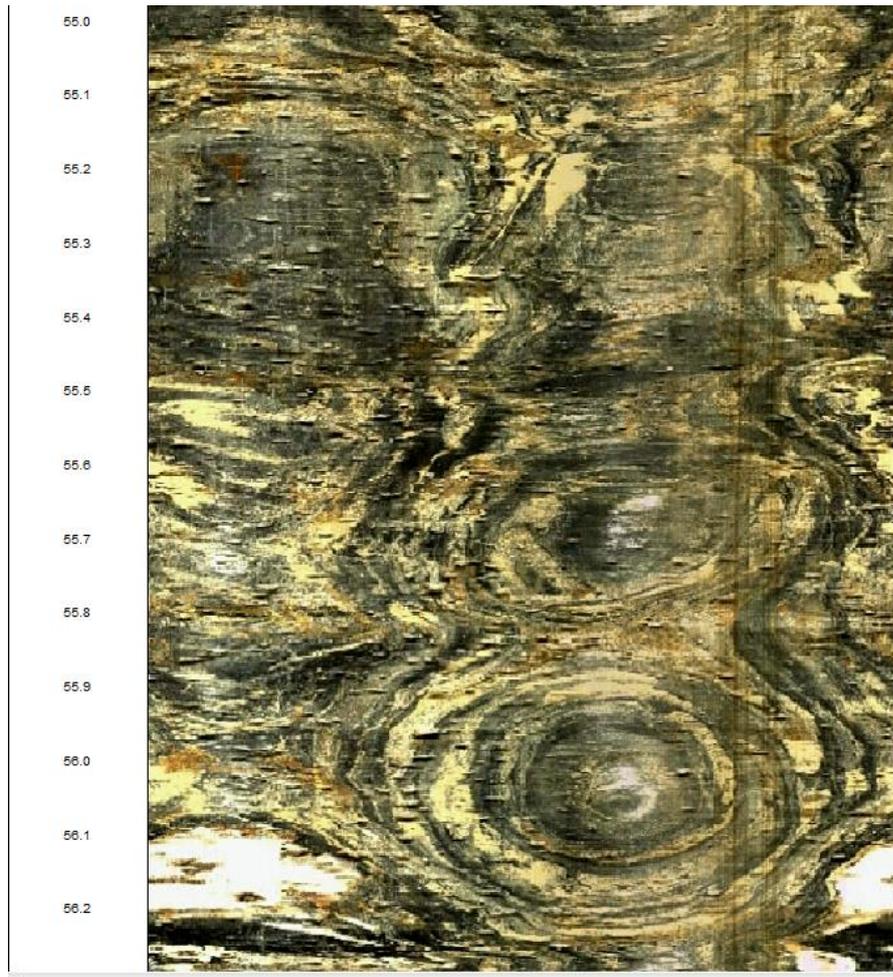


Figura 3.10 - Entrada da câmera na água, antecipada por uma fratura marcada em rosa.

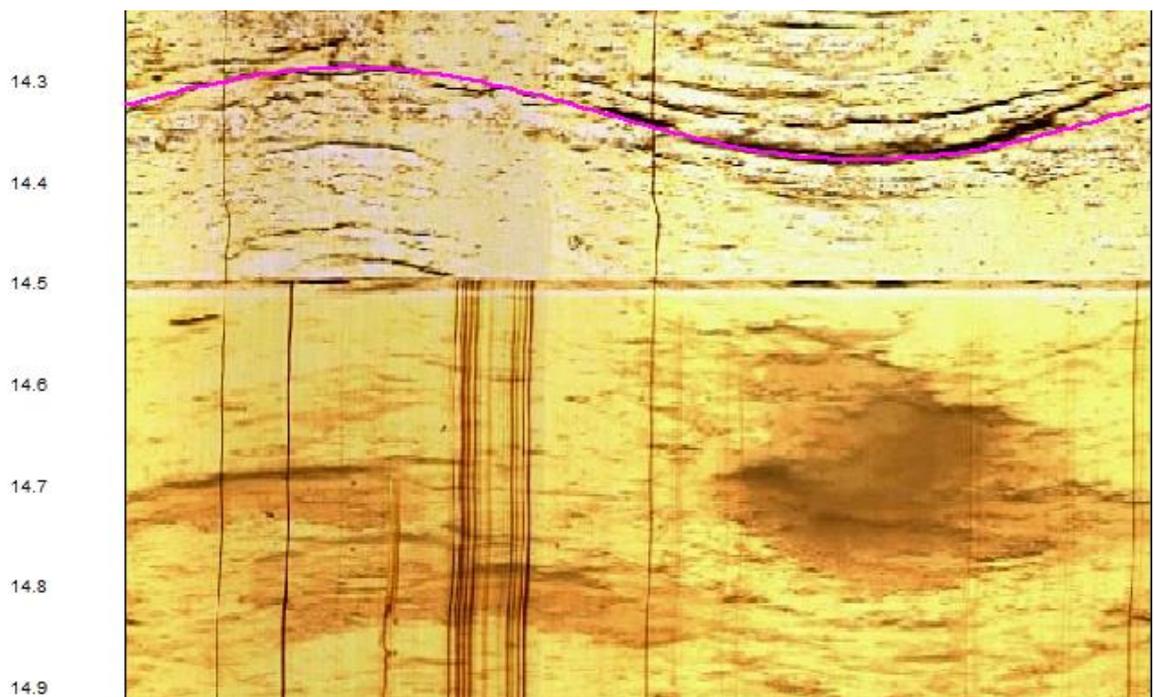
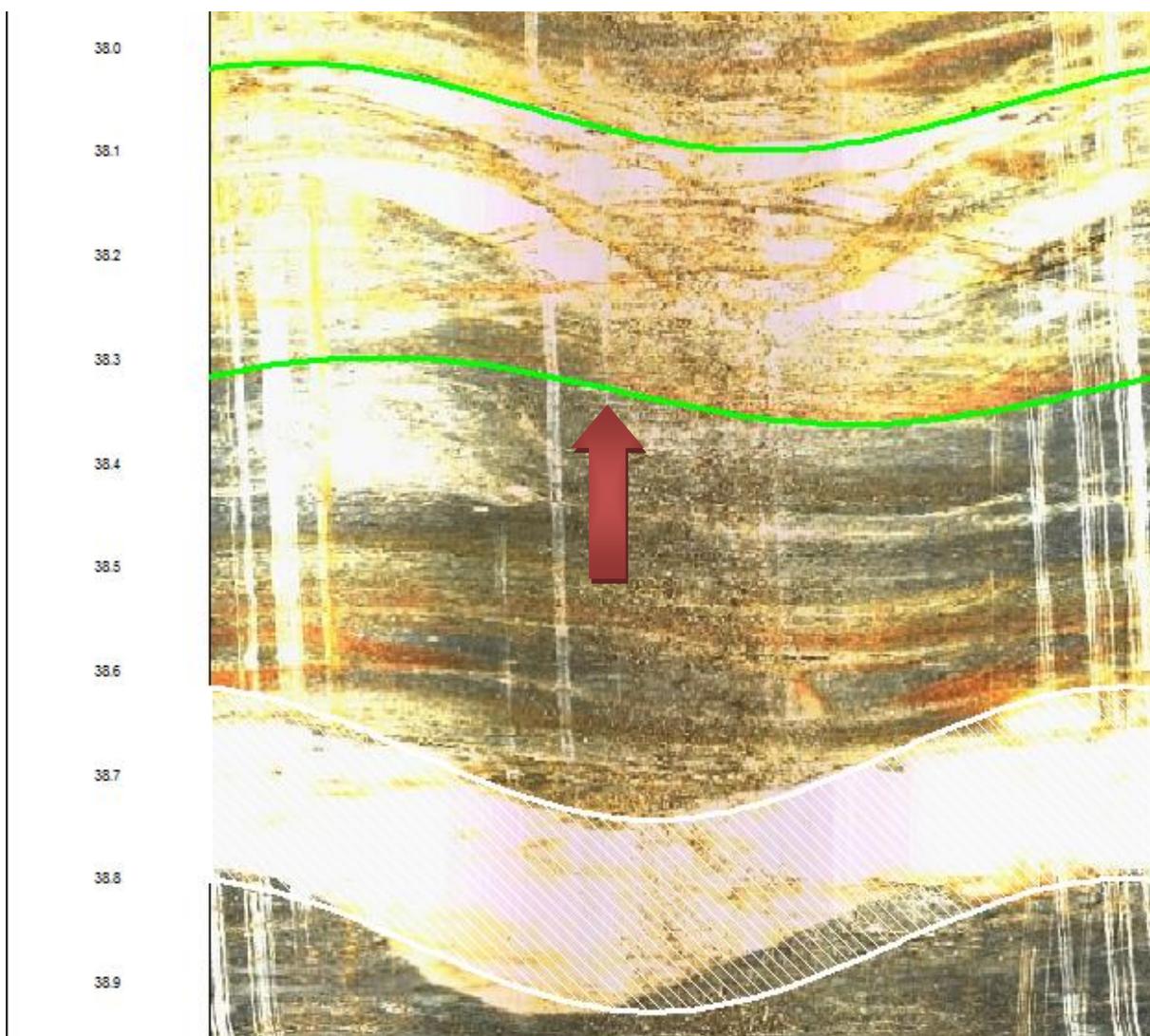


Figura 3.11 - Em 38,3m pode-se perceber o contato (indicado pela seta), com marcações de bandamentos (em verde) e um veio de quartzo (em branco).



Pode-se também, em alguns casos, inferir o estado de alteração da rocha, mesmo que esta caracterização seja bastante limitada. Pode-se elencar algumas variações no brilho e na coloração dos minerais indicando uma maior alteração da rocha com relação aos trechos de rocha sã. Nestes parâmetros pode-se avaliar a resistência mecânica. Segundo Oliveira (2015), como medida indireta desta resistência mecânica, pode-se observar a "rugosidade" das paredes, considerando que a perfuração do furo de sondagem implicaria em um desgaste nestas paredes, ficando mais evidente este desgaste quanto mais for alterada a rocha. Observa-se dois exemplos deste comportamento nas Figuras 3.12 e 3.13, com as paredes dos furos apresentando maior desgaste na rocha devido ao seu estado de alteração. No

caso do furo GSOFG00027, pode-se citar a presença de água como um das possíveis origens deste desgaste.

Figura 3.12 - A esquerda tem-se a mudança da rocha passando de lisa para rugosa. Na figura da direita tem-se em 37,9m a definição do nível d'água (indicado pela seta). As manchas brancas na figura da direita acredita-se que sejam devido ao brilho produzido por resíduos do floculante frente à luz da câmera. Imagens do furo GSOFG00027 da Mina Gongo Soco.

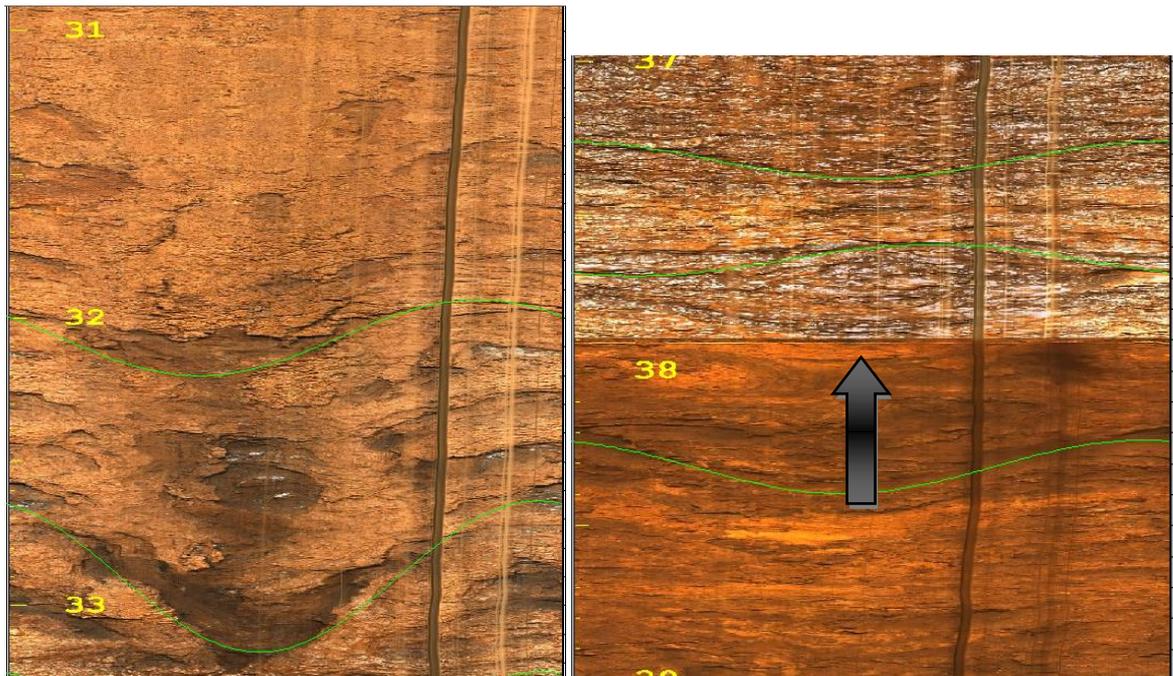
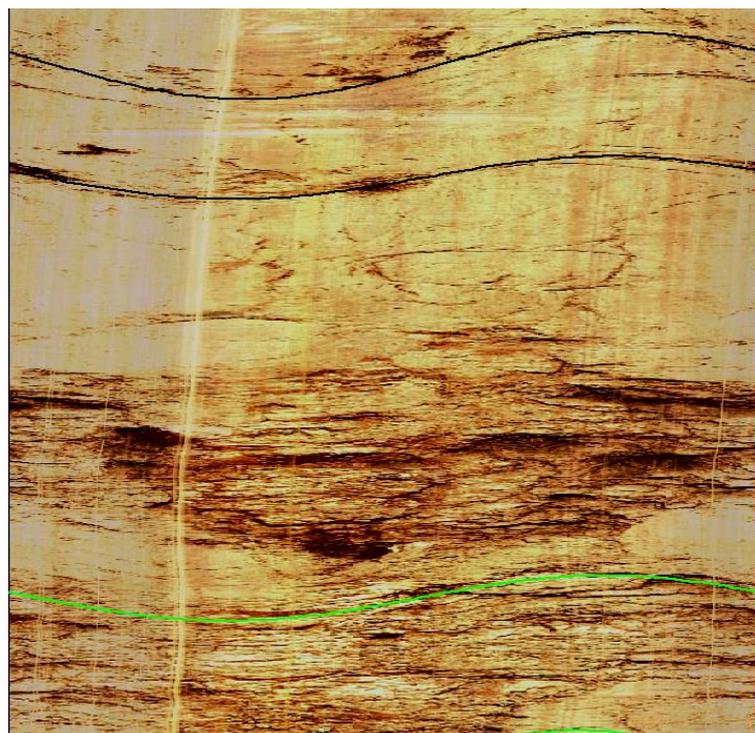


Figura 3.13 - Mudança de estrutura lisa para rugosa no furo FD00022, da Mina do Tamanduá



Conforme sugerido por Oliveira *et al.*(2014) pode-se usar a tabela adaptada IPT(1984, *apud* Serra Junior & Ojima, 1998) ou uma tabela adaptada de ISRM (1978) para caracterizar melhor o grau de alteração da rocha.

Tabela 3.2 - Graus de alteração (adaptado de IPT, 1984, *apud* Serra Junior & Ojima, 1998).

SIGLAS	DENOMINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DA ROCHA
A1	Rocha sã ou praticamente sã	Apresenta minerais sem vestígios de alteração ou minerais ligeiramente descoloridos. Minerais com brilho.
A2	Rocha medianamente alterada	Apresenta minerais com menor brilho e a rocha é bastante descolorida.
A3	Rocha muito alterada	Apresenta minerais sem brilho, rocha intensamente descolorida.
A4	Rocha extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente sem brilho e a rocha intensamente descolorida, aspecto de solo.

Fredrick *et al.* (2002) ressalta que a qualidade da rocha não pode ser determinada por OPTV sem que haja inicialmente uma calibração utilizando a geotecnia do local. O OPTV apenas oferece um indicativo da integridade da rocha de uma forma semelhante à análise de fotografias do testemunho da rocha. Fica assim evidenciado que OPTV é um auxiliar ao programa de sondagem na construção de um projeto mineiro ou civil.

3.4. Descontinuidades

"Sob a designação descontinuidade engloba-se qualquer feição geológica que interrompa a continuidade física de um dado meio rochoso, como as superfícies de fraturas, falhas, etc. Em termos práticos, pode-se designar por descontinuidade qualquer superfície natural em que a resistência à tração é nula, ou muito baixa" (ISRM, 1978).

Utilizando as ferramentas disponíveis para compilar os dados adquiridos durante a perfilagem pode-se gerar dois tipos de imagem com o furo televisionado. A primeira delas uma imagem cônica contendo uma visão tridimensional do furo televisionado, uma imagem "enrolada" do furo. A segunda imagem é uma imagem "desenrolada", onde abre-se a imagem tridimensional transformando-a em uma

imagem bidimensional. Após desenrolar a imagem, percebem-se as descontinuidades e estruturas presentes como formas senóides. Ao utilizar-se o *software WellCad*, marcações são realizadas sobre a imagem como se fosse um novo *log*; as novas marcações ficam sobrepostas às fraturas vistas nas imagens.

Realizadas estas marcações, o *software* fornece as orientações destas estruturas. Tais orientações surgem como uma grande vantagem oferecida pelo programa, e como um vislumbre das possibilidades geradas pela filmagem. Oliveira (2015) propõe que deve-se ir além destas marcações e aprofundar-se no estudo das estruturas apresentadas.

Conforme Oliveira (2015), deve-se descrever os demais parâmetros que caracterizam uma descontinuidade tais como tipo de estruturas, espaçamento, rugosidade, abertura, presença e material de preenchimento, alteração das paredes e percolação de água, os quais pode-se observar de forma indireta. Chega-se ao ponto de caracterizar o maciço rochoso fazendo uma estimativa do RQD teórico, proposto em variadas correlações por diferentes autores.

Um dos objetivos desta dissertação é constatar se a metodologia proposta por Oliveira *et al.* (2014) pode ser aplicada em todos os tipos de situações. Caso a metodologia proposta não seja aplicável em todas as situações, tentou-se vislumbrar:

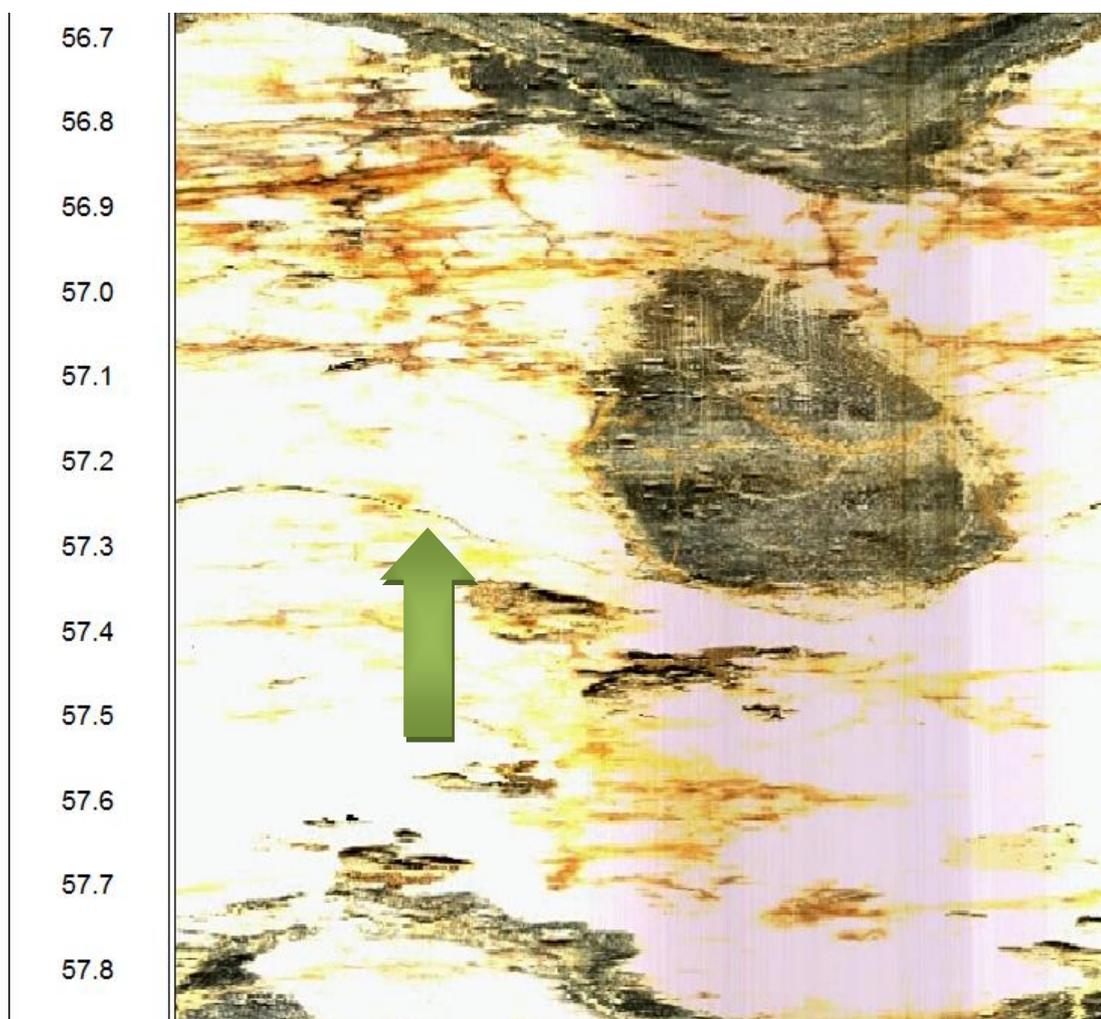
- em quais situações não é possível realizar uma relação direta da metodologia com os dados adquiridos?
- quais são as informações realmente observáveis nas imagens compiladas, entre as citadas pela metodologia ?
- quais são os possíveis empecilhos para que não se possa seguir à risca a proposta metodológica oferecida?

Algumas divergências entre a metodologia apresentada e os dados coletados podem surgir, mas pode-se ressaltar a grande valia desta proposta. De qualquer forma, mesmo que haja discrepâncias nas análises a metodologia surge como um guia em um campo onde, até então, não havia um padrão a ser comparado. Esta dissertação busca adicionar à proposta original (Oliveira, 2015) algumas situações vivenciadas em campo que podem, em algum momento, ampliar o conhecimento e diminuir os questionamentos, e desta forma aumentar as potencialidades no uso da OPTV.

3.4.1. Tipos de Estruturas

Neste momento é importante diferenciar as estruturas penetrativas das descontinuidades. Estruturas como acamadamentos, bandamentos, veios, dobras e contatos litológicos devem ser separados das fraturas e aberturas. Mesmo com esta tentativa de separação algumas vezes mais de um tipo de estrutura ocorrerá em um mesmo trecho. Na Figura 3.14, pode-se perceber a ocorrência de uma fratura (marcada em rosa) dentro de um veio de quartzo, presente no furo GSO00025 da Mina Gongo Soco.

Figura 3.14 - No Furo GSO00025 pode-se ver, através do OPTV, um veio de quartzo de comprimento 1 m, cortado por uma fratura.



Na Figura 3.15, tem-se a demonstração do mesmo veio de quartzo visualizado na filmagem. Pode-se perceber como, neste caso, o OPTV torna a

identificação desde veio, bem como sua real localização no interior do furo de sondagem, mais precisa assim facilitando a identificação de possíveis zonas de fraqueza.

Figura 3.15 - Caixa de testemunho onde encontramos uma correspondência com o veio da Fig 3.14



Conforme *Baillet et al. (2004)* no caso de sondagem testemunhada em maciços rochosos com fraturas incipientes, as forças e vibrações geradas pela perfuratriz podem induzir um aumento na frequência de fraturas nas amostras, gerando assim uma redução no RQD da rocha, levando assim a uma estimativa inferior na qualidade da rocha. Existem casos, como no furo GSOFG00027 (Figura 3.16) onde não se percebe, na imagem do OPTV, nenhum tipo de fratura existente e ainda assim o testemunho está completamente desagregado, fazendo com que o RQD da rocha seja zero. Não se pode, neste caso, inferir que o causador destas quebras seja somente o equipamento de sondagem (no furo GSO00027, as

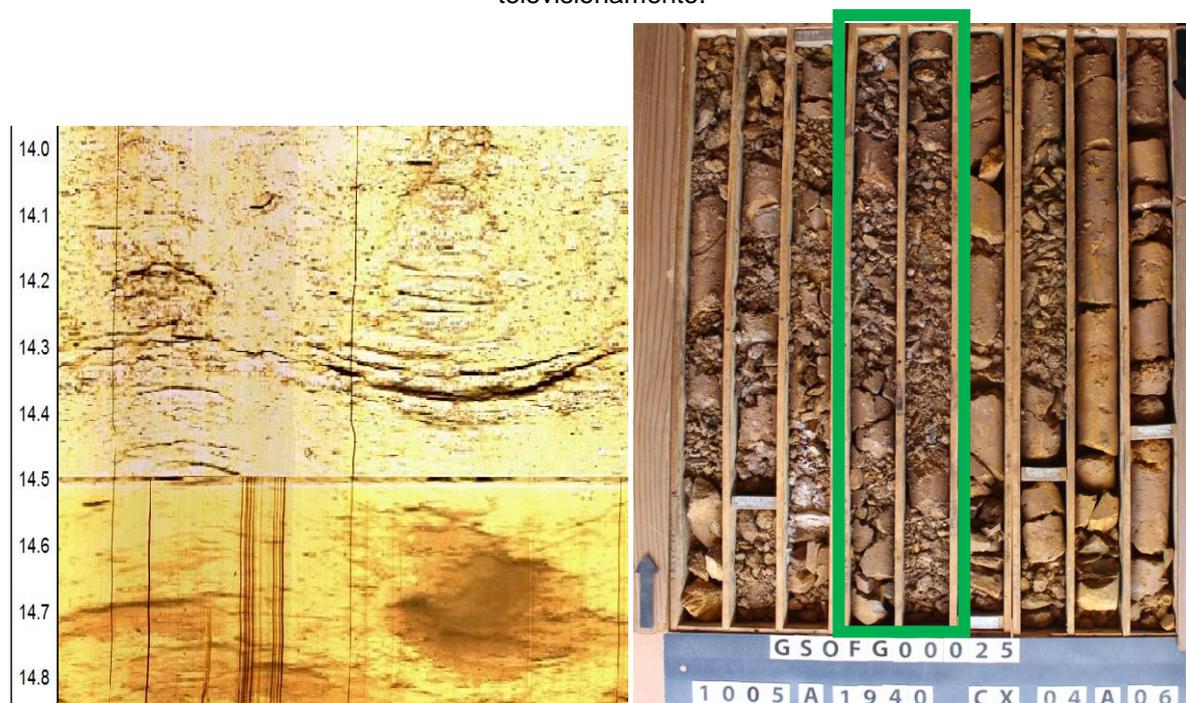
litologias apresentam areia fina em suas composições, reduzindo assim a resistência da rocha).

Figura 3.16 - Foto do testemunho do furo GSO00027, entre 18m e 27m. Muitas estruturas não podem ser visualizadas pelo fato do material ser friável. À direita, a imagem ilustrando a real situação da rocha in situ.



Há casos em que não é possível visualizar uma estrutura na sondagem testemunhada, devido a uma recuperação mais baixa. O televisionamento dos furos de sondagem surge desta forma como um complemento das informações perdidas no testemunho. Pode-se, como já citado, ter uma maior precisão na localização das estruturas e sem perda na informação. Percebe-se na Figura 3.17, referente ao furo GSOFG00025, uma fratura levemente aberta pouco antes da sonda mergulhar na água. Na foto do testemunho, não se reconhece, em lugar algum, esta mesma fratura. Caso esta sondagem não tivesse sido televisionada, esta informação teria sido perdida.

Figura 3.17 - Fratura, marcada em rosa, do furo GSOFG00025 e Foto do testemunho de sondagem do furo GSOFG00025, em nenhum momento conseguiu-se identificar a fratura visível no televisionamento.



3.4.2. Rugosidade

Conforme Oliveira (2015) e ISRM (1978) a rugosidade de discontinuidades é um importante fator de influência na resistência ao cisalhamento, em especial no caso onde há contato parede-parede. Em termos gerais a rugosidade é caracterizada em função das irregularidades existentes (também definida como a rugosidade em si) e ondulações. Na prática a ondulação afeta a direção inicial de deslizamento sobre um plano, enquanto que as rugosidades afetarão a resistência ao cisalhamento.

Segundo ISRM (1978) e Oliveira (2015) tem-se duas formas de quantificar a rugosidade em imagens de televisionamento. A primeira delas seria considerar a linha traçada para a marcação de estruturas como uma referência para a rugosidade, quanto mais esta linha ficar contida no traço da discontinuidade da imagem, menos rugosa esta seria a fratura, quanto menos contida no traço da discontinuidade mais rugosa esta discontinuidade seria. Na Figura 3.18, vemos a esquerda os perfis de rugosidade sugeridos por Barton (1987) e, à direita, uma modificação para as fraturas observadas em furos televisionados. Os perfis de

Barton foram modificados e separados para perfis de menor detalhe, reduzindo assim a análise apenas para rugosa, lisa ou polida. O termo "polida" só pode ser usado em caso de grande evidência de deslocamento por cisalhamento, conforme o ISRM (1978).

Na Figura 3.19 (Oliveira 2014), segue a segunda sugestão a ser aplicada no televisionamento, com o objetivo de detalhar e buscar maior exatidão no cálculo da rugosidade dos planos de descontinuidade, conforme sugerido por Barton (2013). A linha apresentada nesta figura, no canto superior esquerdo, nas imagens de televisionamento de sondagem, deve ser a linha traçada pelo programa, conforme indicado na Figura 3.19.

Mesmo com os dois métodos apresentados, nota-se que se trata de métodos qualitativos e empíricos. O técnico que realizar a análise da filmagem pode ser levado por seus conhecimentos prévios do local a uma análise errônea da rugosidade das fraturas. De acordo com Oliveira existem casos de fraturas que não são facilmente definidas como lisas, rugosas, outras, entretanto, são bastante evidentes. Essa dificuldade de reconhecer a rugosidade pode acontecer também no testemunho de sondagem. De qualquer forma o procedimento é bastante qualitativo e altamente dependente do analista.

Durante o processamento dos dados optou-se pelo primeiro método, mais qualitativo e empírico. Pode-se elencar dois fatores que podem influenciar na análise da rugosidade de uma descontinuidade. O primeiro seria que nem sempre a linha marcada sobre a imagem está perfeitamente alinhada com a fratura a ser analisada, outros dois pontos bastante relevantes é que na maioria das vezes as fraturas não são abertas o suficiente ou o televisionamento não possui a qualidade necessária para que se possa perceber as ondulações nas fraturas (Figura 3.23).

Figura 3.18 - Perfis de rugosidade de Barton *et al.* (1974). Adaptação dos perfis de rugosidade de Barton para aplicação em imagens de televisionamento.(Oliveira 2014)

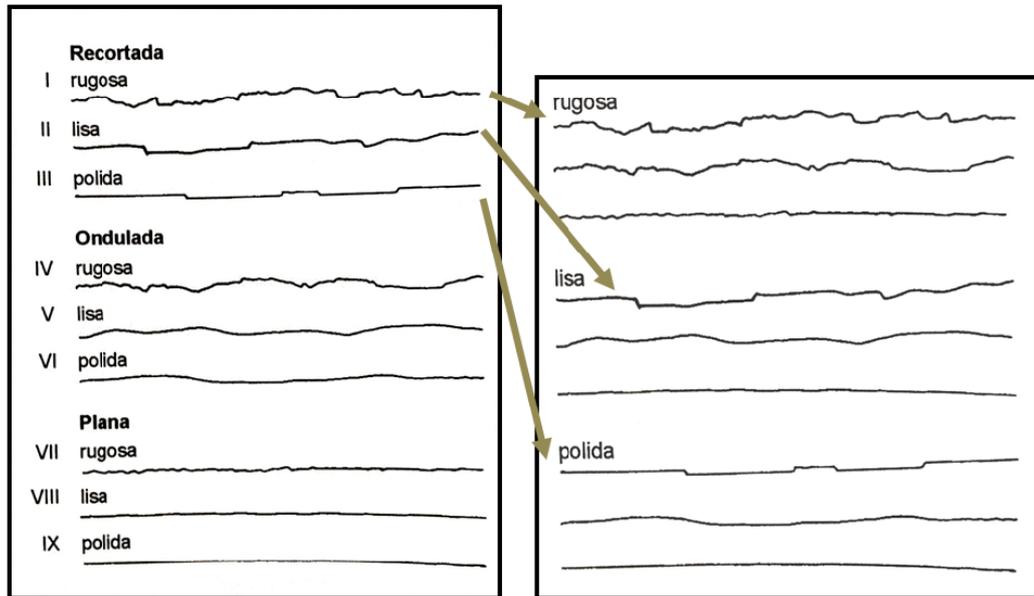


Figura 3.19 - Cálculo da amplitude de perfis de rugosidade em superfície rochosa, considerando a amplitude da rugosidade (a) e o tamanho dos grãos (Barton, 2013)

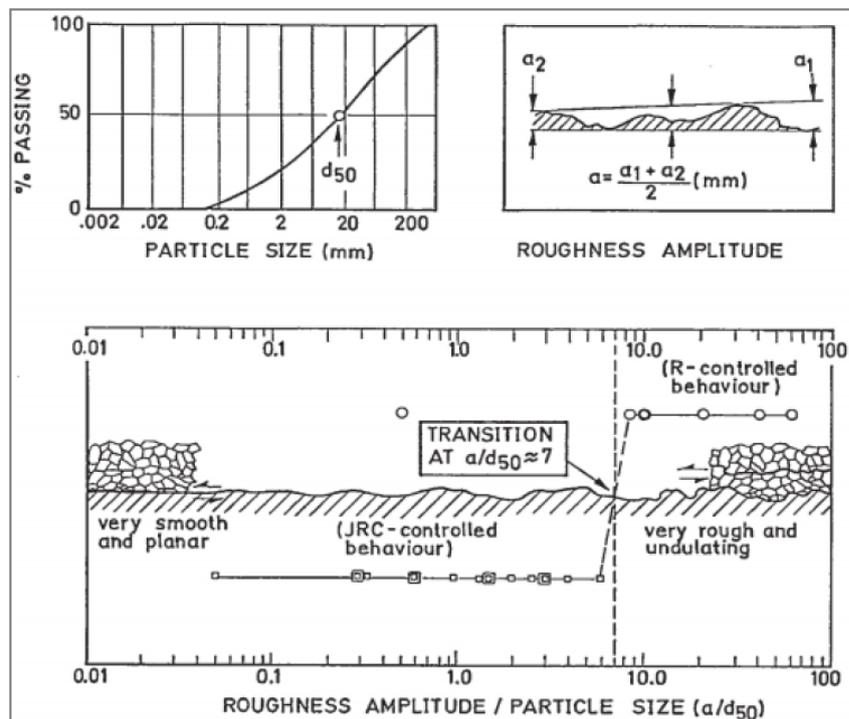


Figura 3.20 - Imagem do furo GSOFG00025, com rugosidade de classe “lisa”.

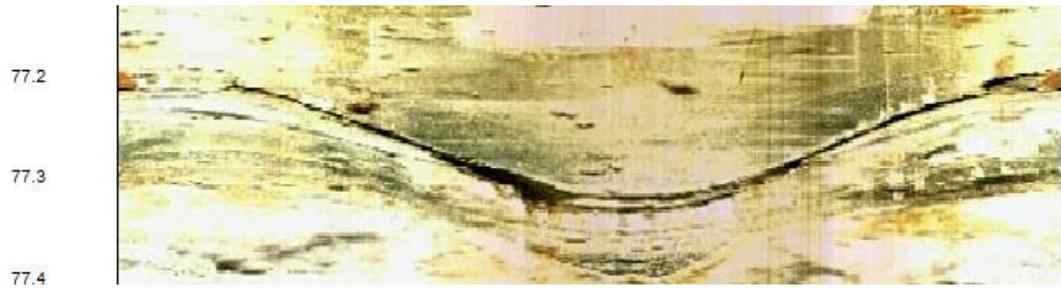


Figura 3.21 - A fratura não apresenta forma perfeitamente senoidal (furo GSOFG00027).

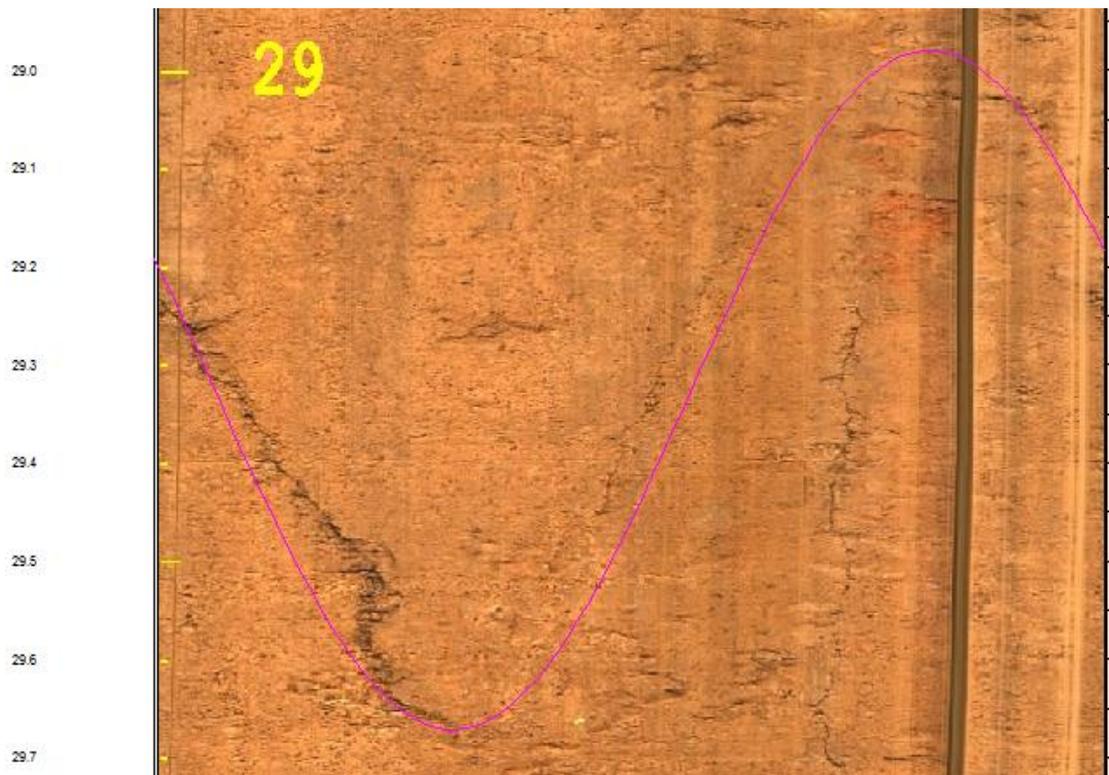


Figura 3.22 - Fratura superior pouco visível e sem formato perfeitamente senoidal. A fratura inferior pode ser considerada rugosa, conforme a classificação de ISRM (Figura 3.18).

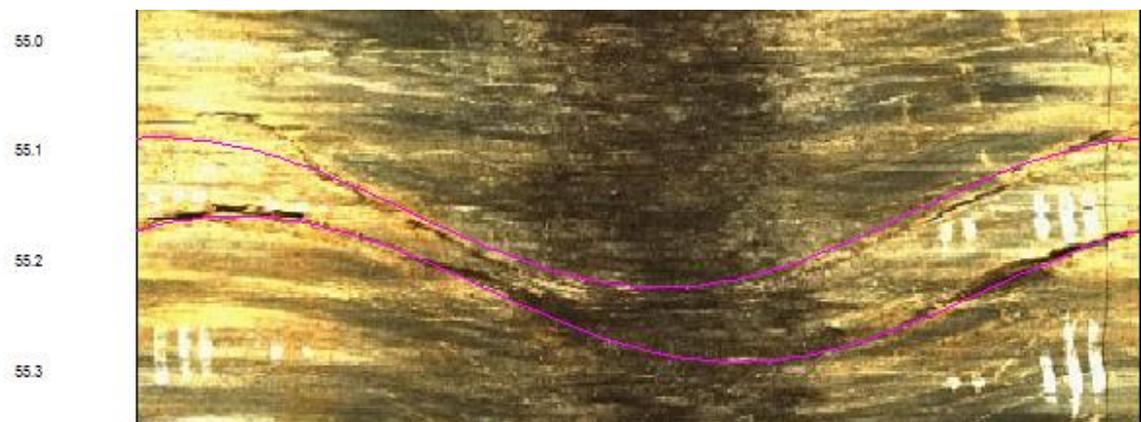
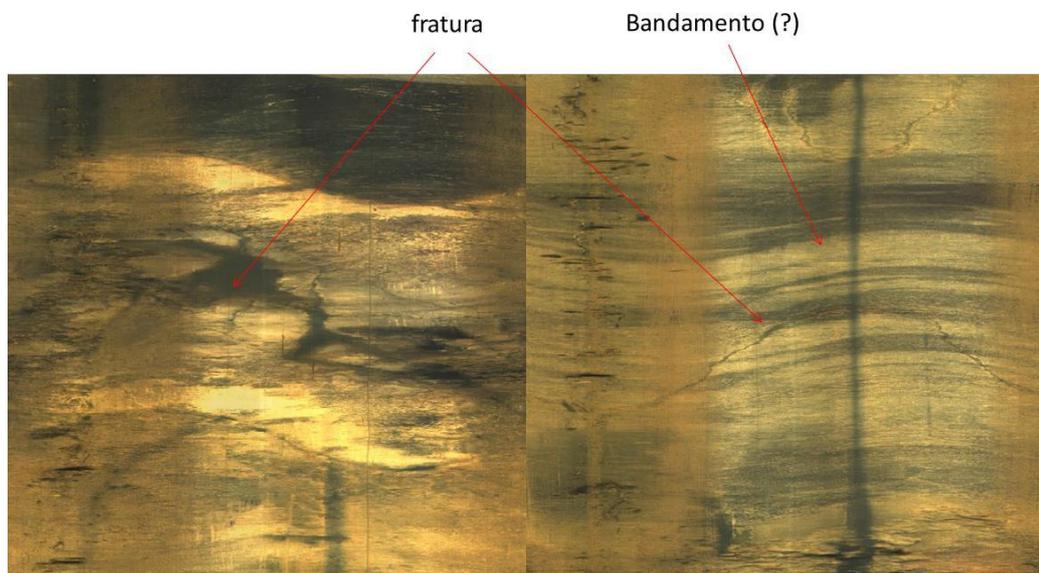


Figura 3.23 – À esquerda, presença de fratura aberta e rugosa aos 55m de profundidade no furo CAPFD00019, com abertura obtida pelo software de aprox. 15cm; à direita, fratura aberta e presença de bandamento com bandas pretas e brancas.



3.4.3. Aberturas

A distância entre as paredes de uma descontinuidade, medida no sentido ortogonal, corresponde à sua abertura. No caso do testemunho virtual, há a oportunidade de observar com detalhe a abertura da descontinuidade que, praticamente, se perde na operação de sondagem, quando da recuperação dos testemunhos. Já há recomendação do uso de equipamentos de filmagem na definição deste parâmetro pela ISRM (1978).

Para *Baillet et al.* (2004), uma das principais vantagens do *Optical Televiewer* é fornecer dados que dão um vislumbre do interior do furo de sondagem, assim se aproximando da realidade do maciço rochoso. Isto se deve ao fato de que em testemunhos de sondagem, geralmente, a recuperação é menor quanto pior for a qualidade da rocha amostrada. Desta forma, as “piores” partes do maciço são aquelas com menor recuperação. Ao utilizar o OPTV, os pontos onde se tem menor qualidade de rocha, devido à falta de uma recuperação apropriada, pela presença de solo e fraturas abertas, podem ser observados e devidamente identificados.

Portanto, este parâmetro deverá ser incluído nas observações dos testemunhos virtuais e sempre que uma fratura não for selada, deverá ser indicada a sua abertura, considerando a distância ortogonal entre as duas paredes que contemplam o topo e a base desta abertura. Para indicação da abertura de uma

descontinuidade sugere-se a utilização da Tabela de abertura fornecida nos métodos de descrição e caracterização de descontinuidades da ISRM (1978), conforme indicado na Tabela 3.3. Oliveira *et al.* (2015) propõe que simplesmente que se utilize uma classificação em termos de fechada, semiaberta e aberta. Nas Figuras a seguir apresentam-se exemplos de aberturas, estas apenas ocorreram no furo GSOFG00023. É possível perceber que estas aberturas são completamente ignoradas no testemunho, isso leva a crer na ocorrência de uma fratura apenas não indicando corretamente a abertura que é visível na imagem feita pelo OPTV. No furo GSO00023, a descrição geológica menciona um “plano de falha na profundidade 95,9m, com marcas de degraus, fragmentando a rocha e espessura de 40cm”. Porém, a imagem ilustra a forma como esta zona se apresenta in situ, com o correto posicionamento em profundidade.

Tabela 3.3 - Caracterização das aberturas de descontinuidades, traduzido de ISRM 1978 (*op.cit.*).

ABERTURA	DESCRIÇÃO	
<0,1 mm	Muito apertado	Feições Fechadas
0,1 - 0,25 mm	Apertado	
0,25 - 0,50 mm	Parcialmente Aberto	
0,50 - 2,50 mm	Aberto	Feições semi - abertas
2,50 - 10 mm	Moderadamente Largo	
>10 mm	Largo	
1 - 10 cm	Muito Largo	Feições Abertas
10 - 100 cm	Extremamente largo	
> 1 m	Cavidade	

Figura 3.24 – Apresenta-se na imagem estruturas marcadas no furo GSO00023..

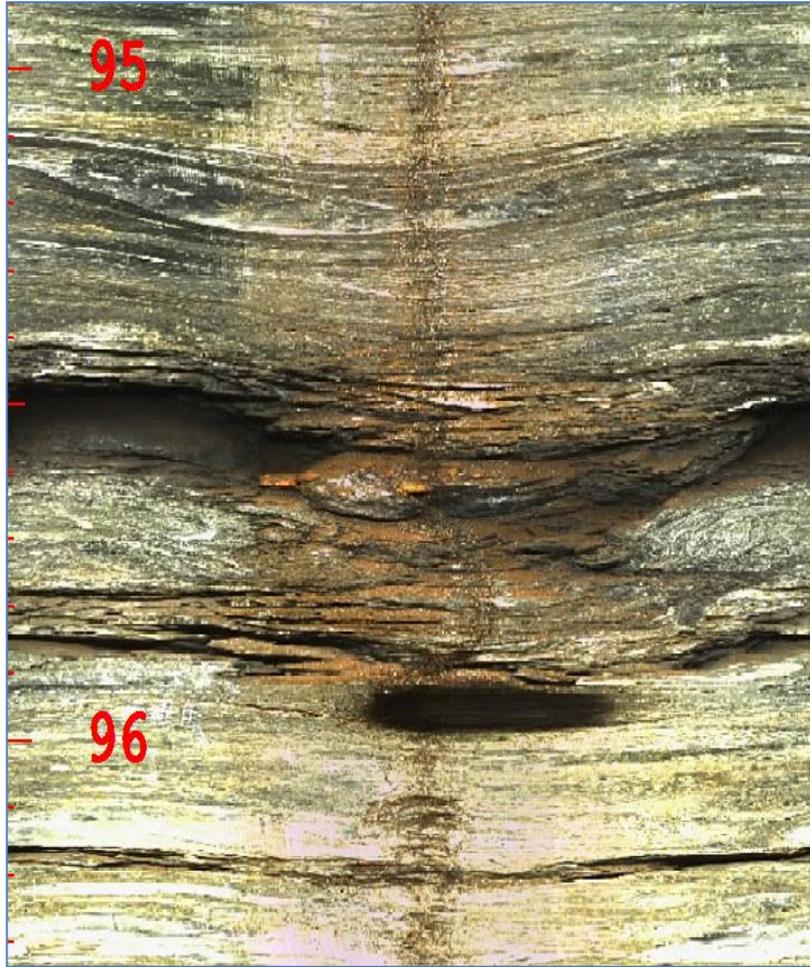


Figura 3.25 - Testemunho do furo GSOFG00023, sem condições de identificar as aberturas vistas na imagem gerada pelo OPTV.



3.4.4. Preenchimento, percolação d'água e condições de alterações das paredes

A descrição das condições de alteração das paredes denota as mesmas limitações e subjetividade que a caracterização do grau de alteração da rocha. Entretanto, é possível inferir estados de alteração das paredes de descontinuidades, levando-se em consideração o brilho dos minerais o longo das feições. Conforme citado na seção 3.1, de rocha intacta, pode-se ter alguns vislumbres da transformação da rocha fazendo pequenas inferências sobre as causas da alteração. Como já mencionado anteriormente a presença de água nos furos pode ser uma das causas da alteração, em especial no caso de materiais mais friáveis.

No caso do preenchimento é factível uma descrição, mesmo que somente visual, deste material. Aconselha-se a diferenciação, sempre que possível, de materiais que selam as fraturas, como preenchimento quartzo-feldspático, de epidoto e carbonáticos, daqueles que são materiais soltos, como areia, argila e fragmentos de rocha. Ainda que esta seção faça referência a preenchimentos acima disto é uma seção de comparações dos dados apresentados na revista da ABGE, e os dados adquiridos no projeto conjunto entre LPM e Vale. Em nenhum dos furos perfilados foram encontradas quaisquer aberturas com qualquer tipo de preenchimento.

Para Oliveira (2015) também é possível observar evidências de percolação d'água, quando existente, como paredes oxidadas e a própria surgência de água no interior do furo, fator muito importante para a qualidade geotécnica de um maciço. Os dados adquiridos no projeto levam a crer que a abertura no furo GSOFG00023, apresentada na Figura 3.24 e Figura 3.25, pode ter sido gerada por um fluxo de água. No momento da realização da perfilagem este furo apresentava água surgente.

3.4.5. Grau de Fraturamento

Pode-se definir de forma bem direta o que seria o grau de fraturamento, basicamente é o número de fraturas existentes na sondagem testemunhada por metro. O grau de fraturamento visa caracterizar a distribuição de descontinuidades

em testemunhos de sondagem. O fraturamento pode ser expresso em graus de intensidade, conforme segue a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Grau de Fraturamento (IPT, 1984, apud Serra Juniro e Ojima, 1998)

SIGLAS	FRATURAS/m	DENOMINAÇÕES DO MACIÇO
F1	< 1	ocasionalmente fraturado
F2	1 a 5	pouco fraturado
F3	6 a 10	medianamente fraturado
F4	11 a 20	muito fraturado
F5	> 20	extremamente fraturado

Para Oliveira *et al* (ano 2014) mesmo parâmetro pode ser utilizado nos testemunhos virtuais, levando-se em consideração que um testemunho de sondagem poderá apresentar maior incidência de fraturamento devido a quebras mecânicas, dependendo das condições na perfuração e posterior descrição, podendo haver modificações significativas que dependem da experiência da equipe técnica envolvida no procedimento.

Outro parâmetro essencial a ser descrito é o espaçamento, que corresponde à distância entre descontinuidades adjacentes de uma mesma família, fator que controlará o tamanho dos blocos em um maciço rochoso. Esta distância entre descontinuidades de um mesmo *set* deverá ser medida ortogonalmente a estas. Na Tabela 3.4 apresenta-se a classificação dos espaçamentos.

Tabela 3.5 - Classificação de espaçamento, modificado de ISRM (1978)

DESCRIÇÃO	ESPAÇAMENTO
Espaçamento extremamente fechado	<20 mm
Espaçamento muito fechado	20 - 60 mm
Espaçamento fechado	60 - 200 mm
Espaçamento moderado	200 - 600 mm
Espaçamento amplo	600 - 2000 mm
Espaçamento muito amplo	> 2000 mm

Pode-se ver alguns exemplos destes espaçamentos/graus de fraturamento nas figuras 3.26, 3.27 e 3.28, com espaçamentos muito pequenos (centimétricos) entre as fraturas. Por outro lado, há casos em que o grau de fraturamento é

praticamente inexistente, como no furo GSOFG00027, onde é vislumbrada apenas uma fratura durante os 50 metros de filmagem, como apresentado na Figura 3.21.

Figura 3.26 - Fraturas no furo GSOFG00023, com espaçamento de aproximadamente de 30cm, logo um espaçamento modificado.

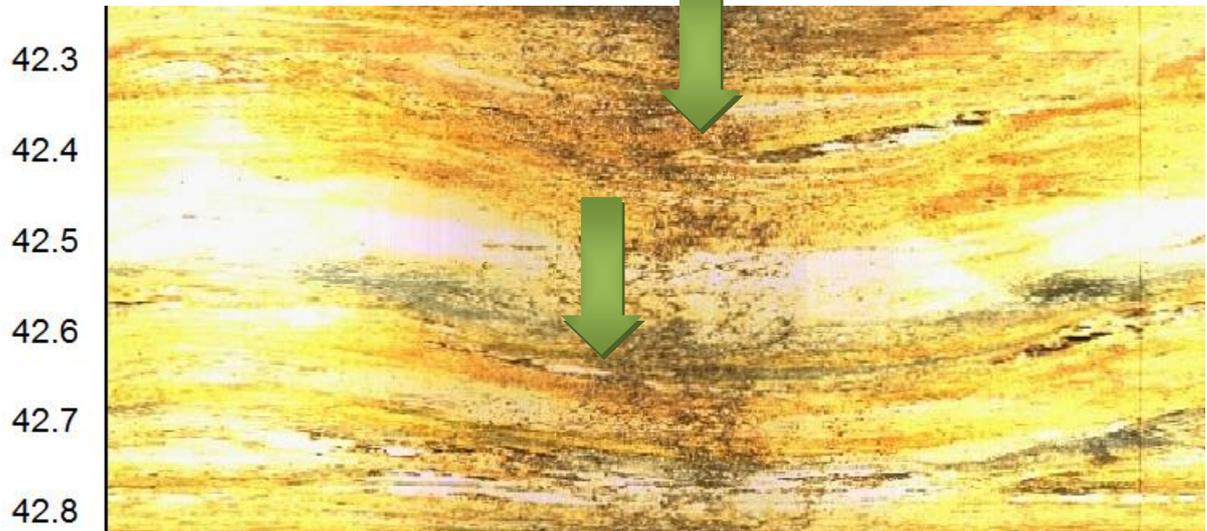


Figura 3.27 - Neste caso, no furo GSOFG00025, tem-se duas fraturas que acabam coincidindo, dificuldade a delimitação da distância entre elas.

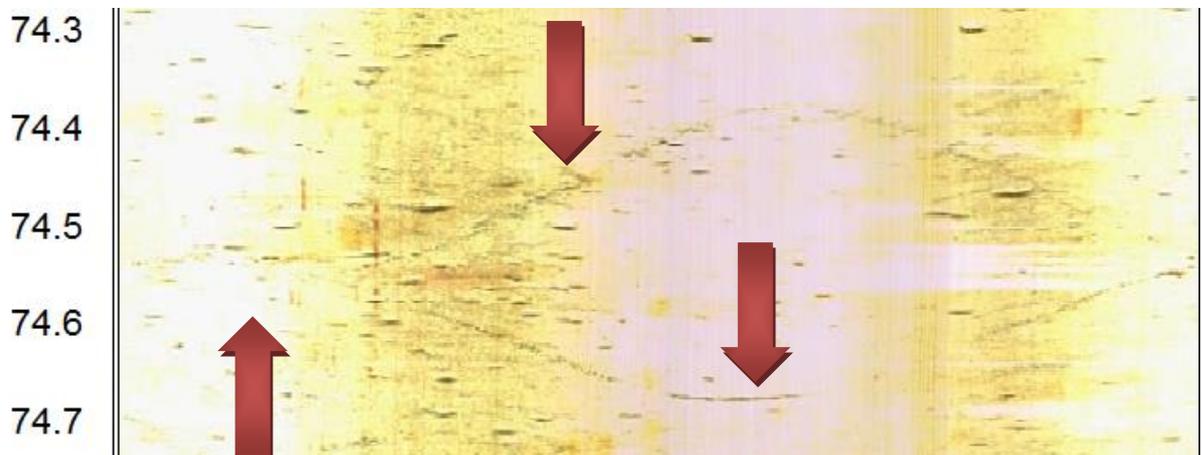
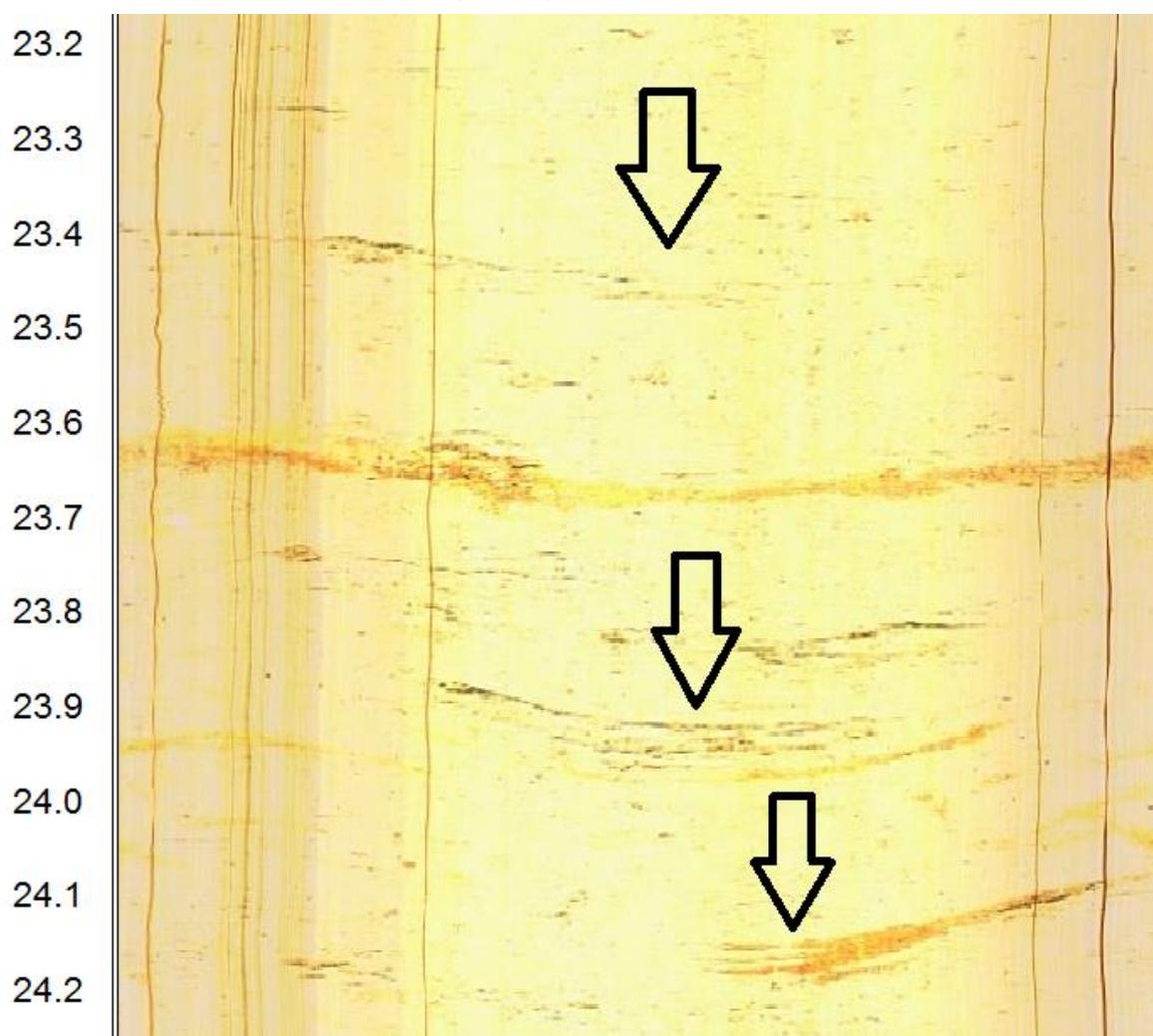


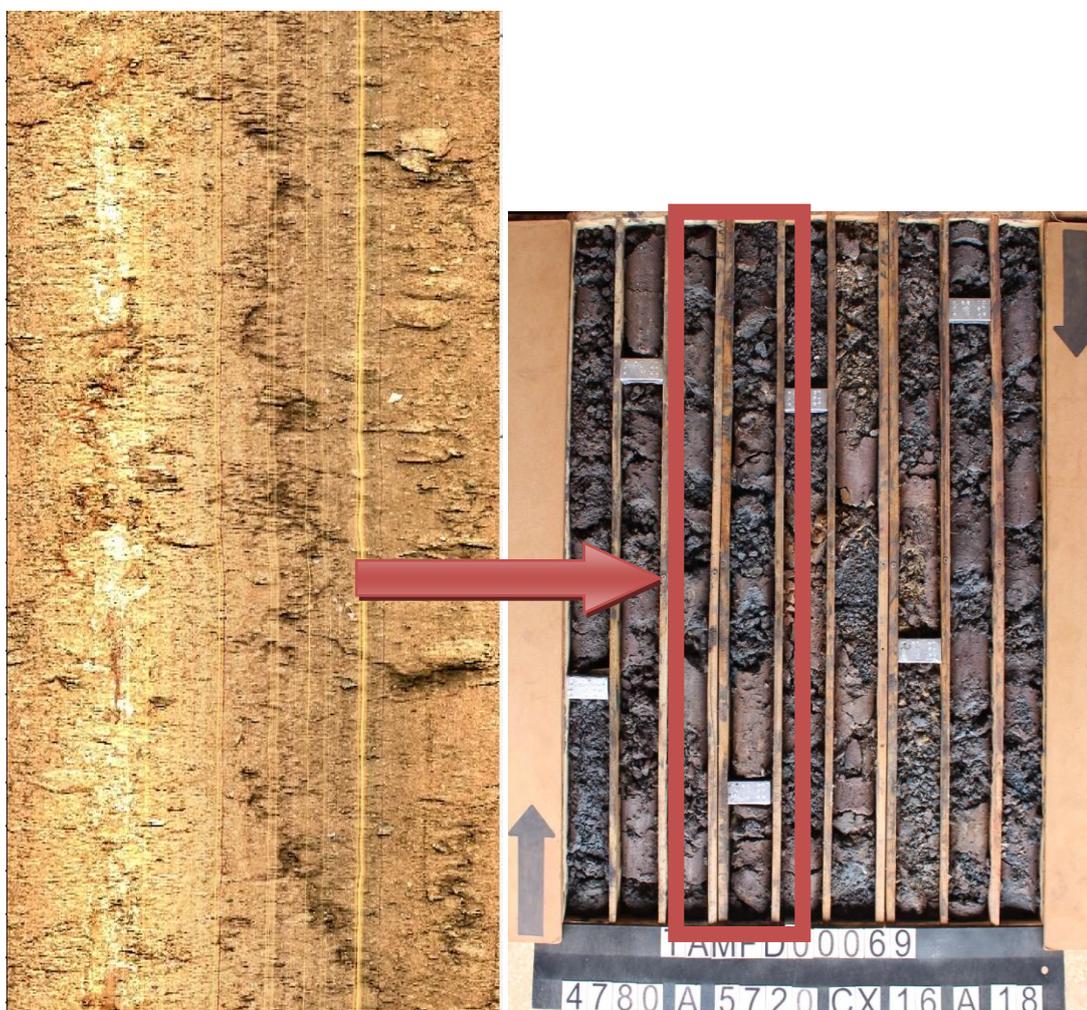
Figura 3.28 - Três fraturas em sequência no furo GSOFG00025, a última com uma pequena abertura. Pode-se considerar essa região de 1m de comprimento como sendo pouco fraturada, conforme a classificação do grau de fraturamento.



Oliveira *et al.* (2014) faz referência às fraturas presentes nos furos de sondagem que não podem ser demarcadas pelos *softwares*, isso ocorre com descontinuidades que estão na vertical. É importante citar que, muitas vezes, ocorrem fraturas verticais a subverticais com relação à inclinação do furo televisado, onde nem sempre é possível a marcação destas na fase de interpretação de imagens. Isso ocorre, pois, os *softwares* não permitem o fechamento de curvas senoidais extremamente abertas. Entretanto é essencial que estas feições estejam caracterizadas e façam parte dos demais parâmetros a serem descritos, como o espaçamento e o grau de fraturamento. Nas Figuras 3.29 e 3.30, pode-se observar a ocorrência de algumas fraturas verticais, dentro do furo FD00069 localizado na Mina

do Tamanduá. Estas fraturas não possuem qualquer referência na caixa de testemunhos.

Figura 3.29 - No furo FD00069, observa-se a existência de uma fratura vertical, que se estende por cerca de dois metros. Esta fratura não é vista no testemunho.

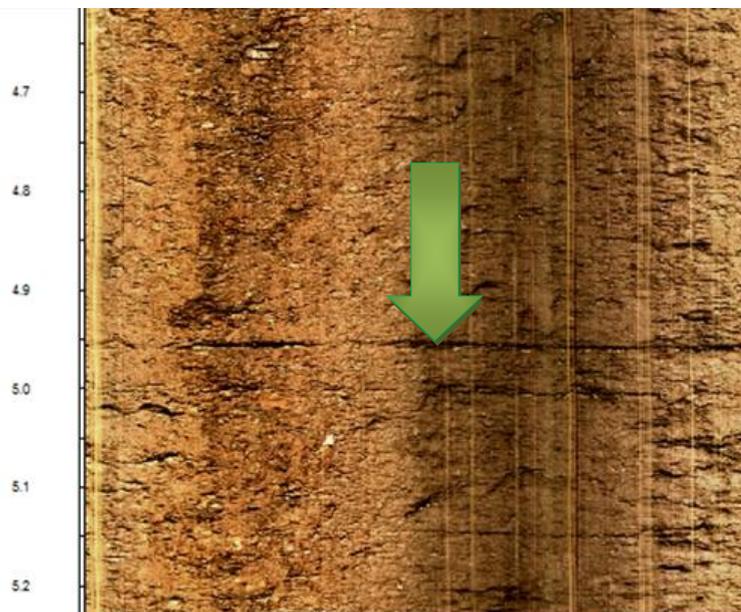


Dentro da proposta sugerida por Oliveira *et al.* (2014), um ponto passou despercebido, que é o fato da perfuratriz causar fraturas por quebra no maciço rochoso e essas fraturas aparecerem na imagem formada a partir do televisionamento. A Figura 3.31 apresenta uma descontinuidade que se acredita ter sido causada por uma quebra mecânica. Esta fratura não apresenta nenhuma semelhança com as marcações realizadas, sendo praticamente horizontal. A direção da estrutura principal deste furo não se relaciona de forma alguma com a fratura, acreditando-se que ela tenha sido causada por uma quebra mecânica.

Figura 3.30 - Nesta imagem visualiza-se uma zona do testemunho a esquerda, sem perda de informações, ilustrando a real situação da rocha in situ. Observa-se até uma fratura horizontal e outra vertical.



Figura 3.31 - Furo FD00069 da Mina do Tamanduá, uma fratura que acreditasse ser causada quebra mecânica (marca na parede do furo causada pelo equipamento de sondagem).



3.4.6. RQD Teórico

A última parte da metodologia proposta por Oliveira *et al.* (2014) faz referência à construção de um RQD teórico a partir do testemunho virtual, tratando de forma análoga a uma *scanline*. Oliveira aconselha a utilização do parâmetro espaçamento médio das descontinuidades, também aconselha comparar o RQD teórico com o RQD medido no testemunho de sondagem.

Analisando o furo GSO00023, da Mina Gongo Soco, o qual apresentou artesianismo, realizou-se uma comparação entre o RQD estipulado pela Vale a partir da sondagem testemunha e um RQD retirado da filmagem com o OPTV e após a marcação de fraturas no software *Wellcad*.

As imagens oferecidas pelo OPTV nas condições apresentadas pelo furo foram consideradas boas e os contatos mais expressivos na perfilagem geralmente podem ser visualizados com facilidade. Uma observação prática a respeito dos perfis é que quando as litologias apresentam grandes contrastes de cor (contraste claro/escuro), existe a necessidade de ajustar os diferentes intervalos em profundidade com uma combinação de brilho e contraste específica para cada trecho, mesmo assim há muita clareza na distinção destas litologias e seus contatos o que facilita a comparação proposta.

Alguns dos pontos analisados foram os tipos de **Descontinuidades**, a **Rugosidade** de uma fratura, com uma análise simples entre *Rugosa* ou *Lisa*, a espessura das **Aberturas** existentes.

A cada contato entre litologias, observado tanto na imagem quanto no testemunho, é calculado um RQD até que se perceba um novo contato entre litologias. Desta forma pode-se calcular o RQD para seções do furo, e estes variam conforme o fraturamento apresentado nestas seções. Isso se deve a visualização do material *in situ*, sem a existência de "falsas" fraturas e quebras geradas na sondagem às vezes pela fragilidade do material ou por quebra mecânica devido à atividade do equipamento de sondagem.

Na Tabela 3.6 são apresentadas as marcações realizadas em parte do furo GSO00023, compreendendo bandamentos, fraturas e veios. Na Figura 3.32 é realizada uma comparação entre o testemunho retirado do furo e a imagem gerada por OPTV.

Tabela 3.6 - Comparação entre as estruturas marcadas no OPTV e as vistas no testemunho de sondagem

	Estruturas Marcadas no OPTV	Estruturas Observadas no Testemunho
Furo GSO00023 96,25m - 104,6m	11	53

A forma de relacionar as estruturas marcadas nas imagens comparando-as ao testemunho é apresentada por *Milloy et al. (2015)*, que em seu artigo separa também os tipos de fraturas entre causadas de forma natural e de forma induzida. Neste trabalho ainda não é possível realizar esta distinção, mas pode-se perceber um número menor de estruturas marcadas que as passíveis de serem analisadas no testemunho, como se pode comparar analisando as figuras 3.32 e 3.33. *Milloy (2015)*, *Thomas (2015)* e *Gwynn (2013)* observam que não é aconselhável confiar em um RQD calculado diretamente a partir da imagem gerada pelo OPTV, isso se deve ao fato de que, na imagem, o maciço ainda não possui o alívio de tensões, fator crucial para um maior fraturamento visto em testemunhos.

Percebe-se que o número de estruturas visualizadas no testemunho é muito maior que as observadas na imagem. Acredita-se que isso deva ocorrer devido às quebras induzidas na retirada do testemunho. O material se mostra bem mais íntegro quando observado no OPTV.

Figura 3.33 - Testemunho do Furo GSO00023 no intervalo 96,25m a 104,6m.



3.5. Análise dos resultados obtidos no Quadrilátero Ferrífero (QF)

Na Tabela 3.7 é apresentado um resumo das comparações realizadas entre a metodologia de aproveitamento das imagens de OPTV sugerida por Oliveira (2015) e os resultados obtidos no minério de ferro. Para melhor visualização desta comparação, cada um dos tópicos considerados ao longo do Capítulo 3 está representado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Comparações entre a proposta metodológica de Oliveira(2015) e os resultados obtidos no Quadrilátero Ferrífero (QF).

ITENS COMPARADOS	Proposta Oliveira et al. (2014)	Resultados no QF
1. Rocha Intacta	Possibilidade de distinção direta entre tipos litológicos	Distinção altamente dependente dos tipos litológicos presentes. Distinção apenas visual impossível para várias litologias. Por diversas vezes, a falta de limpeza adequada dos furos prejudicou a observação de diferenças.
2.a) Tipo de estrutura	Possibilidade de diferenciação clara entre as estruturas geológicas presentes	Quando o furo está limpo, a diferenciação de estruturas é favorecida. Bandamentos e veios são facilmente identificáveis. Contatos litológicos nem sempre visíveis, em especial quando envolvem litologias friáveis.
2.b) Rugosidade	Possibilidade de distinção utilizando os perfis de rugosidade de Barton <i>et al.</i> (1974)	Verificou-se diferenciação apenas qualitativa entre estruturas lisas e rugosas.
2.c) Abertura	Classificações possíveis: fechada, semiaberta e aberta	Principal foco está na comparação com o testemunho, onde a informação das aberturas é comumente perdida. Fraturas fechadas são muito difíceis de serem observadas.

2.d) Preenchimento, percolação d'água e condições de alterações das paredes	Oliveira (2015) cita que é possível observar evidências de percolação d'água, quando existente, como paredes oxidadas e a própria surgência de água no interior do furo	Não foram visualizadas aberturas preenchidas. A percolação d'água pareceu ser de fácil identificação, como ficou evidente no furo GSOFG00023.
2.e) Grau de Fraturamento	Possibilidade de utilização direta do Grau de Fraturamento (IPT, 1984, apud Serra Juniro e Ojima, 1998) e Classificação de espaçamento, modificado de ISRM (1978)	Houve dificuldade de visualização de fraturas fechadas, levando a um grau de fraturamento errôneo. Essa dificuldade comumente ocorreu por questões operacionais (sujeira existente no furo e/ou por uma utilização de uma velocidade de televisionamento inapropriada, causando a perda de informações).
2.f) RQD Teórico	Na metodologia proposta por Oliveira <i>et al.</i> (2014), faz-se referência à construção de um RQD teórico a partir do testemunho virtual, tratando de forma análoga a uma <i>scanline</i> .	Milloy (2015), Thomas (2015) e Gwynn (2013) observam que não é aconselhável confiar em um RQD calculado diretamente a partir da imagem gerada pelo OPTV; isso se deve ao fato de que, na imagem, o maciço ainda não mostra o alívio de tensões que é fator crucial para um maior fraturamento visto em testemunhos.

Com base nas informações resumidas na Tab. 3.7, conclui-se que o OPTV pode fornecer valiosas informações, com foco principal no posicionamento espacial (*dip* e *dip direction*) de discontinuidades e outras estruturas (veios, bandamentos, acamadamentos) quando estas são feições são identificáveis. Conforme *Gwynn et al (2013)* e *Thomas et al (2015)* o erro previsto na determinação da posição espacial das feições acima, considerando a técnica de sondagem orientada, pode chegar a 13°, enquanto que o OPTV apresenta um erro cumulativo de $\pm 1,7^\circ$ para o *dip* e $\pm 4^\circ$ para o *dip direction* das mesmas. Assim, é uma ferramenta de grande auxílio na construção de estereogramas e na análise de estabilidade cinemática.

4. INFORMAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DAS ÁREAS EM ESTUDO

Nesta seção do trabalho serão apresentados os locais de trabalho e a aquisição de dados realizada a partir das filmagens realizadas. Primeiramente serão apresentadas as informações geológicas da Mina Gongo Soco em seguida as informações da Mina do Tamanduá.

As informações de cada mina foram obtidas a partir de dados cedidos pela empresa Vale S.A. (BVP–Engenharia, 2004; 2008 e 2012).

4.1. Mina Gongo Soco.

4.1.1. Informações de geologia estrutural em Gongo Soco

Neste capítulo será apresentado um resumo dos estudos de geologia estrutural realizados na Mina de Gongo Soco até o momento, elaborado a partir de resultados de mapeamento lito-estrutural e geomecânico em superfície (BVP-Engenharia, 2008) e informações complementares (Neto, 2008).

O resumo servirá de base para as comparações dos dados do mapeamento de superfície com aqueles obtidos por OPTV para esta dissertação.

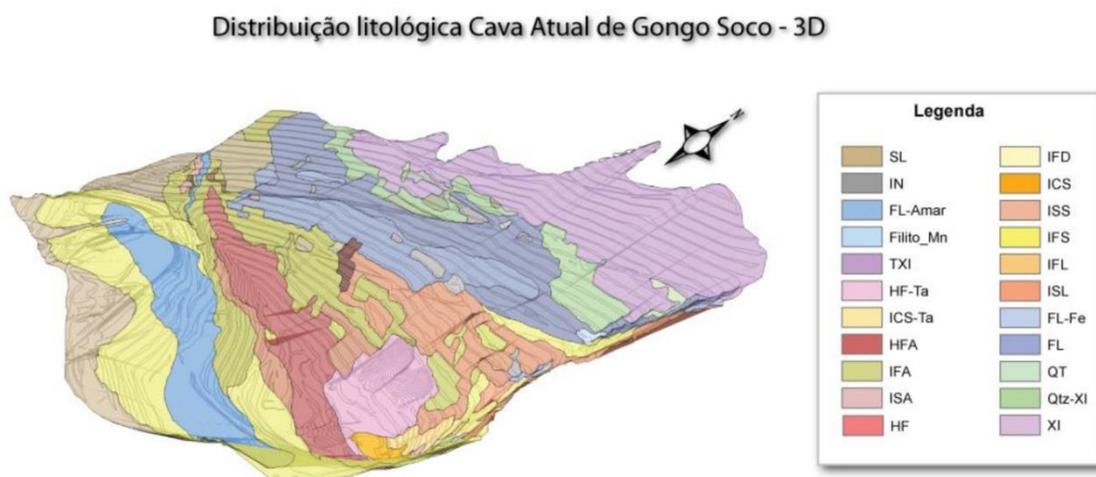
Em BVP-Engenharia(2008) apresenta-se os resultados deste mapeamento geológico-estrutural de superfície, gerando a compartimentação da cava em domínios lito-estruturais e geomecânicos, a elaboração de seções geológico-estruturais e a análise de estabilidade cinemática da cava da Mina Gongo Soco.

Em um primeiro momento, os dados de mapeamento estrutural obtidos em BVP-Engenharia (2008) permitem determinar as atitudes das estruturas principais nas litologias presentes na cava de Gongo Soco (taludes norte e sul), gerando os estereogramas destas estruturas (bandamento, foliações, lineações e fraturas). Em um segundo momento, foi realizada a análise de estabilidade cinemática para os diversos setores da cava da mina.

A Figura 4.1 apresenta o mapa geológico local da cava da Mina de Gongo Soco. A cava possui um alongamento segundo a direção E-W, sendo que a porção norte exibe um número maior de bancadas que a porção sul.

A geologia da cava apresenta como principais litotipos aflorantes: solo saprolítico, rocha intrusiva metabásica, hematitas, itabiritos, quartzito, filitos e xistos.

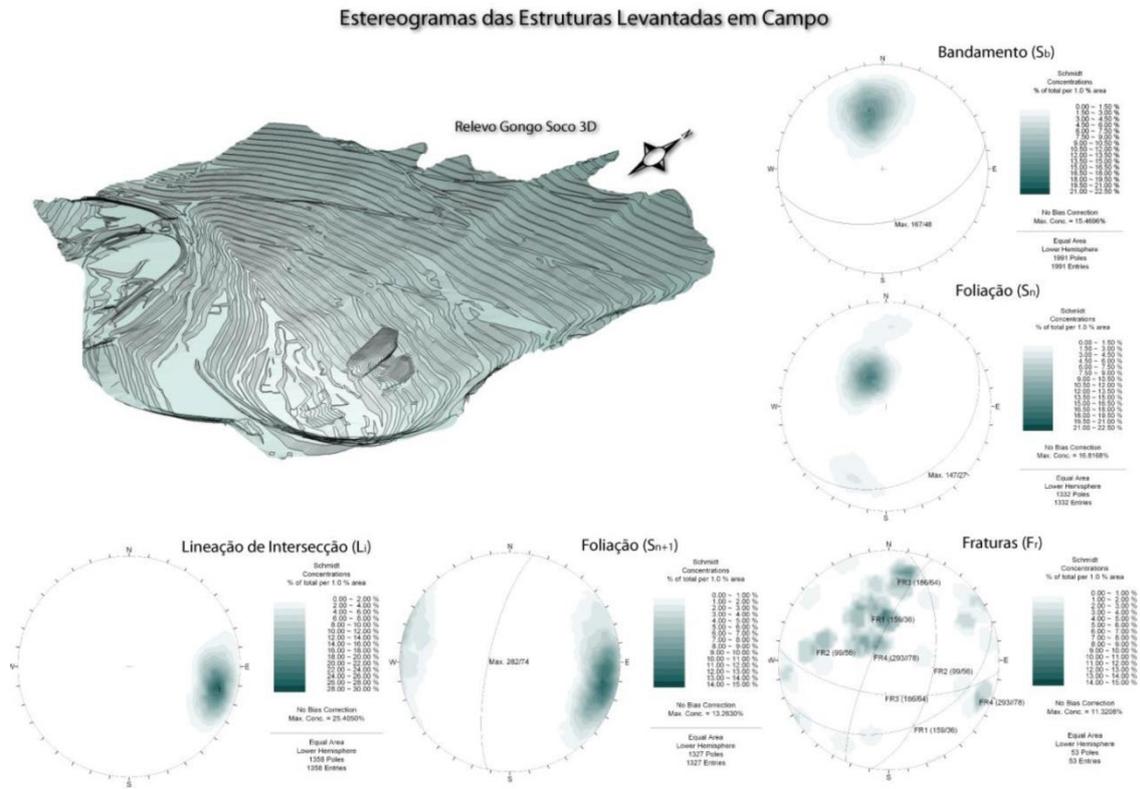
Figura 4.1 – Mapa da geologia local da cava da Mina de Gongo Soco. (Fonte: Vale/BVP-Engenharia, 2008).



Em se tratando da geologia estrutural da área, foram identificados em BVP-Engenharia (2008) várias estruturas planares e lineares, sendo as principais: Bandamento (Sb), Foliação N (Sn), clivagem de fratura (Sn+1), Famílias de Fraturas (Fr), presentes nas rochas metabásicas (IN), Lineação de intersecção (Li) e eixo de dobra (bn). Aqui vamos discutir somente sobre o bandamento Sb, a foliação Sn e as fraturas, que são estruturas possíveis de visualização com o OPTV.

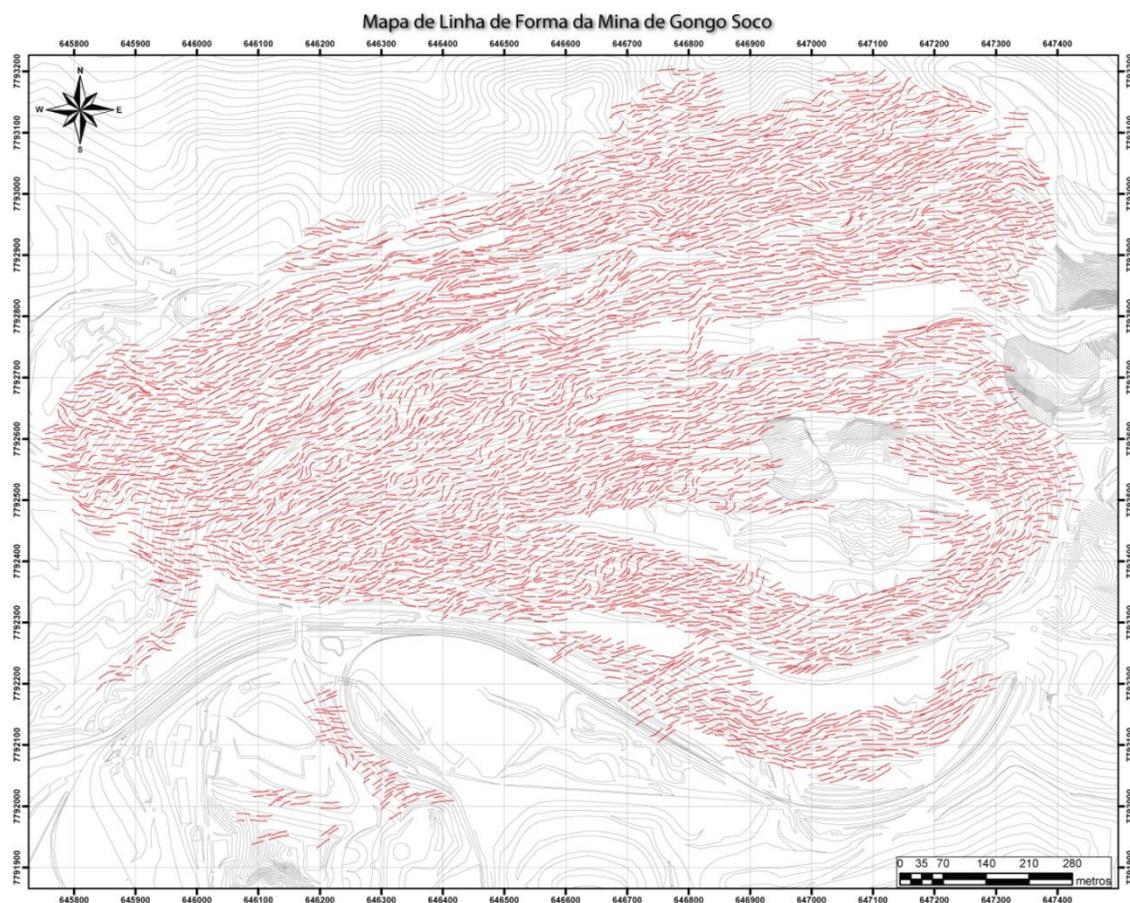
A Figura 4.2 ilustra os estereogramas destas estruturas na cava. É importante observar que a declinação utilizada foi de 21°.

Figura 4.2 – Topografia da cava e estereograma das estruturas de Gongo Soco. (Fonte: Vale/BVP Engenharia).



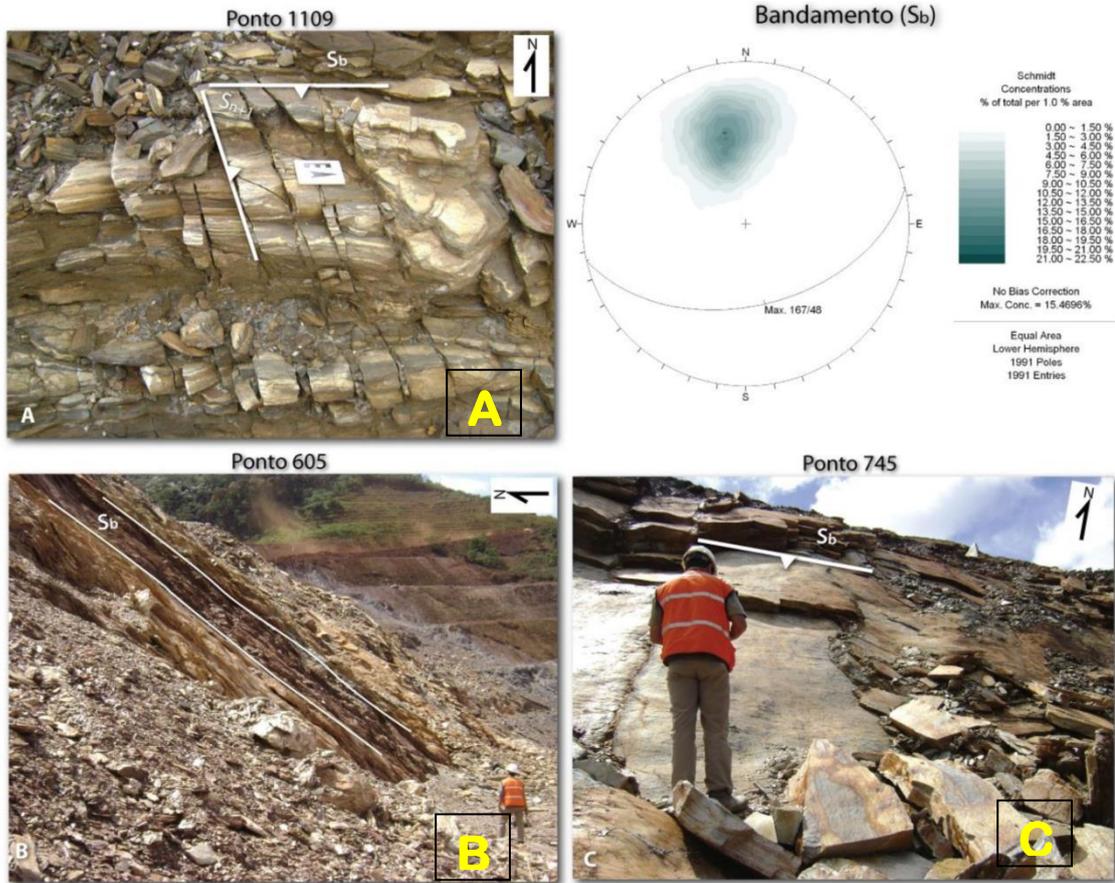
O bandamento (S_b) é a estrutura principal e condicionante da estabilidade dos taludes na Mina de Gongo Soco, sendo possível sua identificação em todas as litologias da cava, com exceção da IN. Um mapa de linhas de forma foi gerado em BVP-Engenharia (2008), conforme Figura 4.3, representando a tendência da direção do bandamento na extensão da cava.

Figura 4.3 – Mapa de linhas de forma da cava de Gongo Soco. (Fonte: Vale/BVP Engenharia).



Conforme a BVP-Engenharia (2008), o plano médio de bandamento (S_b) para a cava é $167^\circ/47^\circ$ (*dip direction/dip*), definida a partir de 1991 medidas. O (S_b) é bastante homogêneo em toda cava, não apresentando variações consideráveis em sua direção. É uma estrutura penetrativa, persistente e fechada e geralmente aparece levemente dobrado (ondulado) em quase toda extensão da cava. A Figura 4.4 ilustra como este bandamento aparece na mina.

Figura 4.4 – Bandamento Sb na Mina de Gongo Soco. Em B tem-se o Sb no xisto Nova Lima e em C tem-se o Sb no quartzito levemente dobrado (ondulado). Atitude Média $167^{\circ}/47^{\circ}$. (Fonte: Vale/BVP Engenharia).



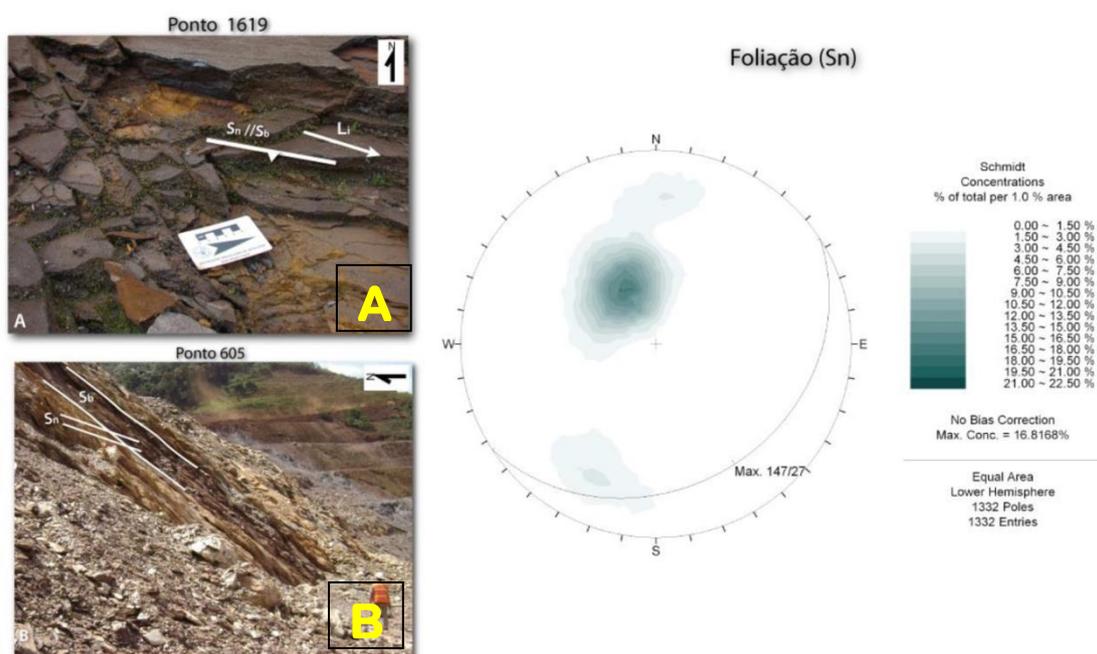
Nos itabiritos o bandamento é marcado pela alternância de bandas silicosas/argilosas e ferruginosa. Nas hematitas, o bandamento é observado quando existe uma diferença de porosidade dentro da hematita, mostrando bandas cinza clara intercaladas com cinza escura ou quando ocorre películas de material argiloso, silicoso ou talcoso intercalado com os níveis de ferro. O Sb no quartzito é definido pela intercalação de níveis sericiticos com quartzosos. Os filitos e xistos têm o Sb marcado pela alternância de bandas argilosas/silicosa com diferentes tonalidades e textura.

Outra estrutura penetrativa observada em praticamente todos os litotipos é a foliação Sn. O plano médio representativo da Sn, obtido a partir de 1332 medidas é $147^{\circ}/27^{\circ}$, que é praticamente paralelo ao plano médio do Sb $168^{\circ}/47^{\circ}$. A intersecção entre as duas estruturas gera uma estrutura linear (Li), porém está não será

discutida aqui, já que não foi evidenciada nas nas imagens do OPTV. A Figura 4.5 ilustra a foliação na cava da Mina.

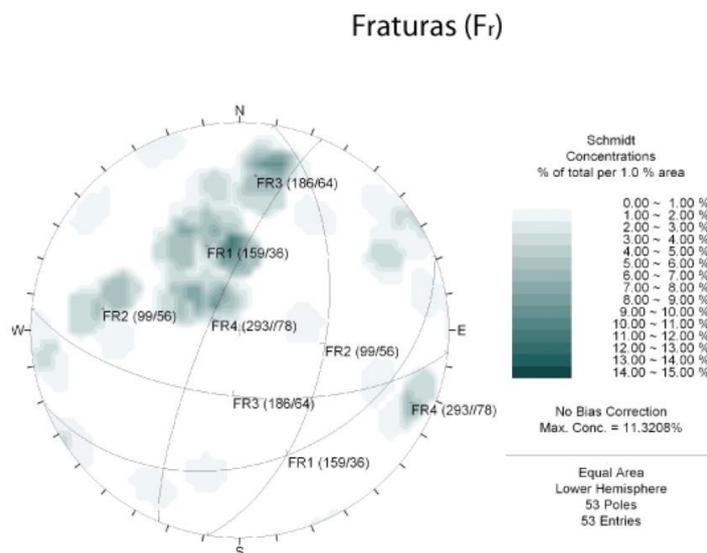
A geração da S_n pode estar associada tanto a processos cisalhantes como a dobramentos. Considerando que o evento gerador desta foliação seja um cisalhamento, ela ocorreu concomitantemente ao estiramento mineral. Caso seja o dobramento o evento gerador desta estrutura, pode-se considerar que ela é plano axial do sinclinal isoclinal regional (Sinclinal Gandarela).

Figura 4.5 – Foliação S_n na Mina de Gongo Soco. Em A e B tem-se a foliação S_n que apresenta atitude média de $147^\circ/27^\circ$. (Fonte: Vale/BVP Engenharia).



Em se tratando das fraturas, conforme pode ser verificado no estereograma da Figura 4.6, realizado a partir de 53 medidas, a distribuição geral das juntas na IN resulta em quatro concentrações máximas representativas: FR1=159/38, FR2=099/56, FR3=186/64 e FR4=293/78. As rochas metabásicas (IN) de Gongo Soco, como já postulado no tópico geologia local, apresentam foliações similares as das encaixantes na região de contato.

Figura 4.6 – Estereograma dos planos médios das juntas na IN (Fonte: Vale/BVP Engenharia).

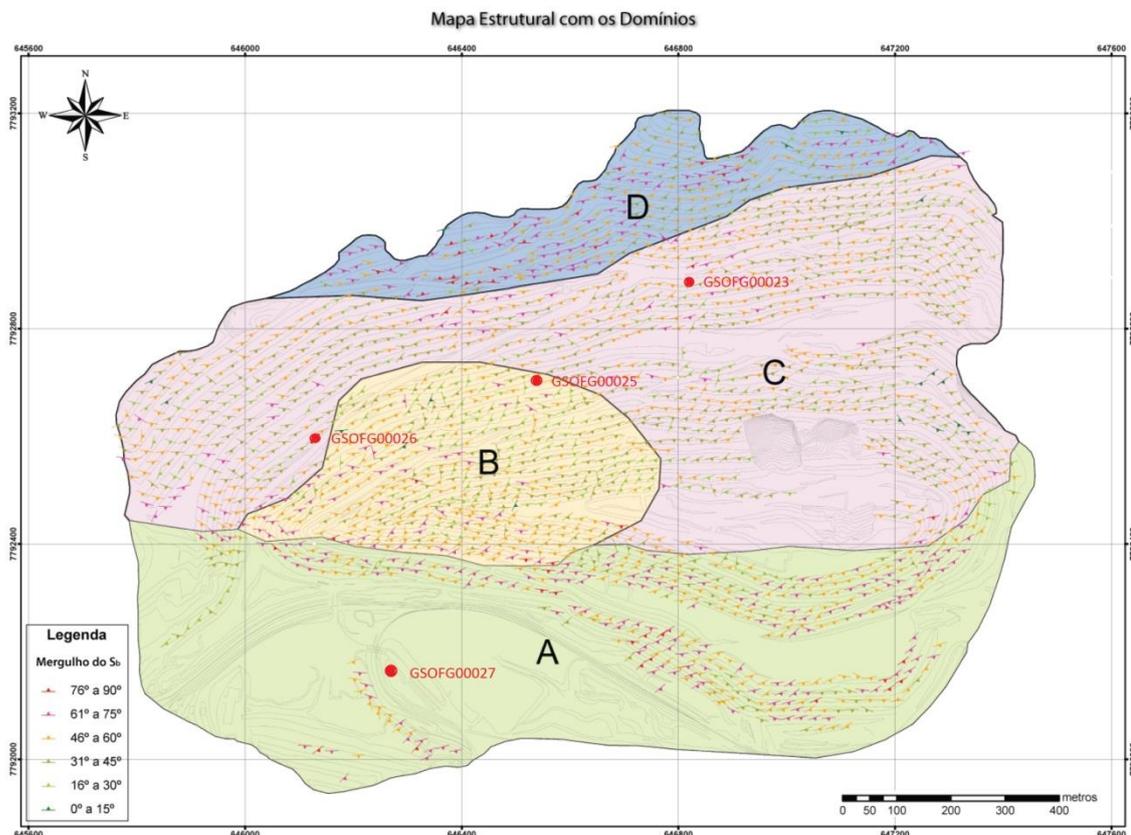


De uma maneira geral, as juntas apresentam persistência métrica, mas pode chegar a valores sub-decamétricos, correspondendo à altura da bancada. Suas superfícies são predominantemente lisas e onduladas, fechadas, sem preenchimento e com espaçamento de pequeno a moderado (centimétricos e decimétricos).

4.1.2. Domínio Estrutural

A BVP-Engenharia (2008) gerou, por meio do mapa do bandamento, o mapa de linhas de formas (Figura 4.7). As linhas de formas são traços que representam à tendência de orientação do bandamento e são inferidos mediante extrapolação de atitudes medidas no campo nas (pequenas) áreas de entorno do ponto de medição. Com este mapa foi possível determinar quatro domínios estruturais na cava em função da direção do bandamento. Apesar da pouca variação do bandamento na mina, os estereogramas do bandamento de cada domínio estrutural confirmam as variações espaciais desta estrutura.

Figura 4.7 – Mapa das linhas de forma e dos domínios estruturais da cava com a localização dos furos filmados. (Fonte: Vale/BVP Engenharia).



Mediante a análise dos dados litológicos e estruturais levantados, foi possível dividir a área em quatro domínios litoestruturais com características distintas. Além da direção do plano de bandamento, foi considerado o mergulho do bandamento para a setorização em domínios da cava.

Segundo a BVP-Engenharia (2008), o domínio A é constituído praticamente pelos litotipos argilosos (SL, IFA e FL-Mn), muito alterados e com baixas consistências. Como o bandamento dos litotipos presentes mergulha para sul e o domínio A está localizado no talude sul (plano de corte do talude mergulhando para norte), a probabilidade de ocorrência de ruptura planar pelo bandamento é inexistente. O mesmo não ocorre para análise da susceptibilidade ao tombamento, que deve ser considerado em alguns setores neste domínio.

O domínio B é composto por hematitas, itabiritos e filitos. Esse domínio tem como característica a falta de orientação preferencial da direção do S_b e a variação de seu ângulo de mergulho. A falta de padrão está relacionada a dobramentos mais expressivos sofridos pelo bandamento.

O domínio C é o maior e abrange boa parte do fundo da cava e do talude norte. É caracterizado pela alta diversidade litotípica (filitos, xistos, itabiritos, hematitas, quartzitos, etc), pela homogeneidade da direção e mergulho intermediário do Sb.

O domínio D está na porção norte da cava e é formado praticamente pelo xisto Nova Lima (XI). A principal característica desse domínio é o maior ângulo de mergulho do (Sb).

4.2. Mina do Tamanduá

A Mina do Tamanduá posiciona-se na região centro-norte do Quadrilátero Ferrífero e se insere no domínio geológico do Supergrupo Minas, representado pelos quartzitos da Formação Moeda e filitos da Formação Batatal (Grupo Caraça) e formações ferríferas da Formação Cauê (Grupo Itabira).

No mapeamento da BVP-Engenharia (2004) foram descritos litotipos das formações ferríferas, constituídos pelos itabiritos argilosos, itabiritos silicosos de consistência friável, média e compacta e hematitas de consistência friável, média e compacta, sendo também mapeadas as rochas da encaixante leste (Grupo Caraça) e as metavulcânicas e intrusivas máficas presentes na área.

Durante o mapeamento foi identificado um grande acervo de estruturas geológicas planares e lineares, como o acamamento S_0 , bandamento composicional (Sb), foliações (S_n , FL), clivagens (S_{n+1} , S_{n+2}), lineação de interseção (Li), eixos de dobras (B_n , B_{n+1} , B_{n+2}), superfícies de cisalhamento (Scis), fraturas e falhas.

Porém, para efeitos de comparação com a perfilagem, acredita-se que só podem ser visualizados o acamamento S_0 , o bandamento composicional (Sb) e as foliações, as quais tem atitudes muito similares com mergulhos gerais para nordeste leste.

4.2.1. Acamamento S_0

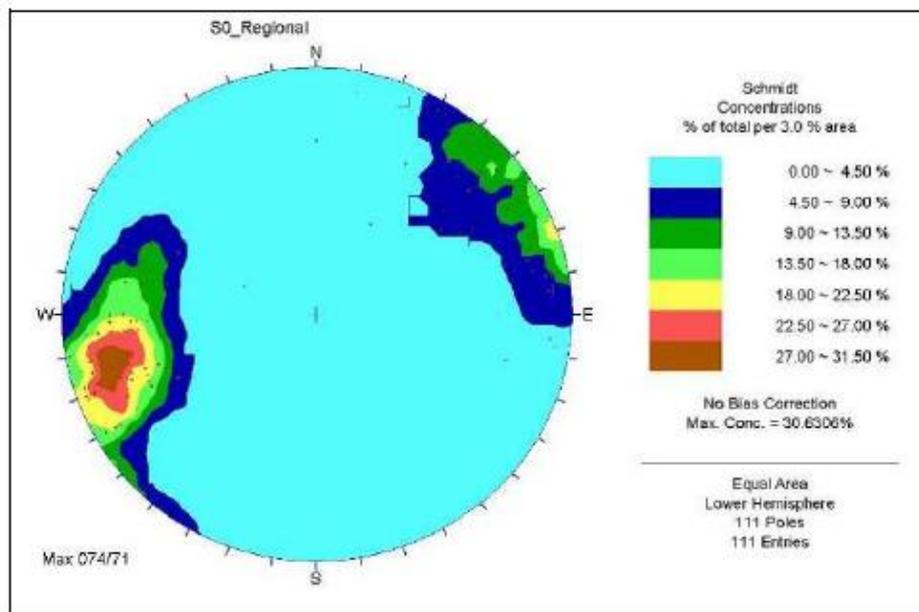
O acamamento das rochas da Mina do Tamanduá foi reconhecido nos litotipos do Grupo Caraça, encaixante leste do minério. Esta estrutura apresenta direção geral NWN, com mergulhos de alto ângulo para ENE, com máximo em 074/71. O estereograma de S_0 colabora com a tese de subverticalização do flanco E

do Sinclínório Tamanduá mostrando maior concentração de medidas em flanco reverso do que normalmente.

Figura 4.8 - Acamadamento no Filito.



Figura 4.9 - Estereograma do Acamadamento S_0 , concentração máxima em 074/71



4.2.2. Bandamento S_b

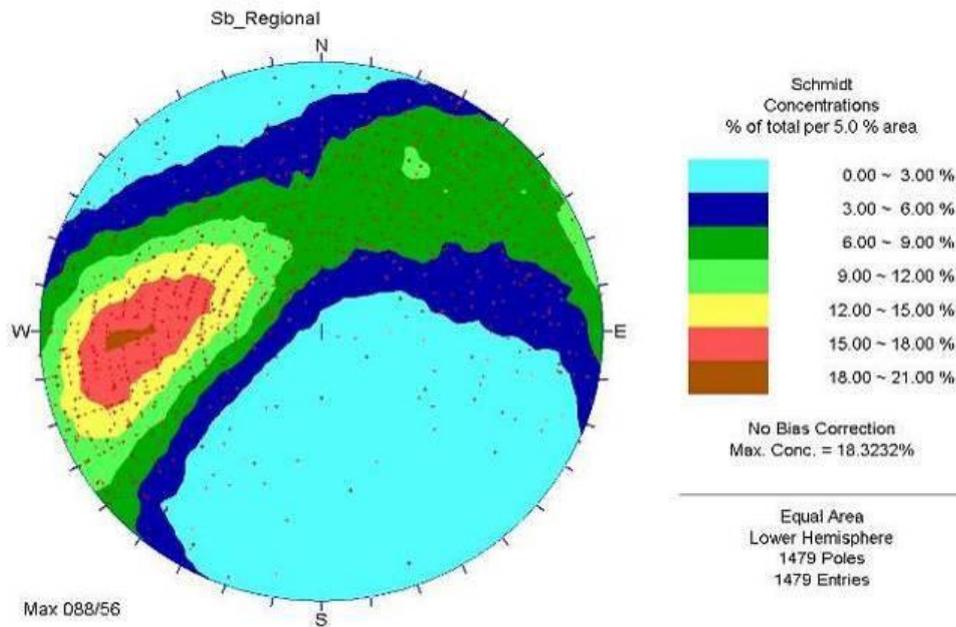
O bandamento composicional S_b foi definido nas formações ferríferas em geral, sendo caracterizado, nos itabiritos silicosos, pela alternância milimétrica a centimétrica de bandas de quartzo e de hematita, e nos itabiritos argilosos pelas bandas de argila marrom, hematita e filmes de argila branca.

Esta estrutura é penetrativa, persistente e fechada, e possui direção geral NS, com maioria dos mergulhos para E. Seu estereograma forma uma guirlanda de dispersão configurando eixo SE, com máxima concentração dos pólos em 088/56.

Figura 4.10 - Bandamento S_b



Figura 4.11 - Estereograma dos pólos da superfície S_b , máxima concentração em 088/56



4.2.3. Foliação S_n

A foliação S_n é bem marcada em toda mina, observada em todos os litotipos, sendo sua identificação mais difícil nas hematitas friáveis. Estrutura persistente em todos os litotipos, penetrativa nos filitos e mais espaçada nos quartzitos e itabiritos. Apresenta estereograma com pouca dispersão de pólos e concentração máxima na direção N-S, com mergulho para E (088/53).

Figura 4.12 - Estrutura Sn configurando microfalhamentos em Sb no Itabirito Compacto (ICS).

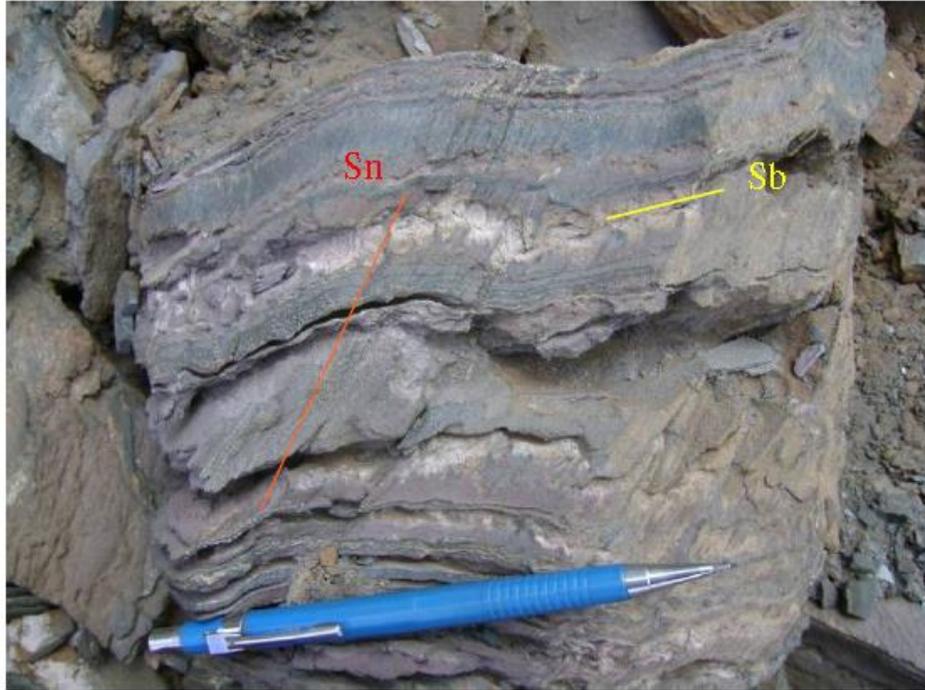
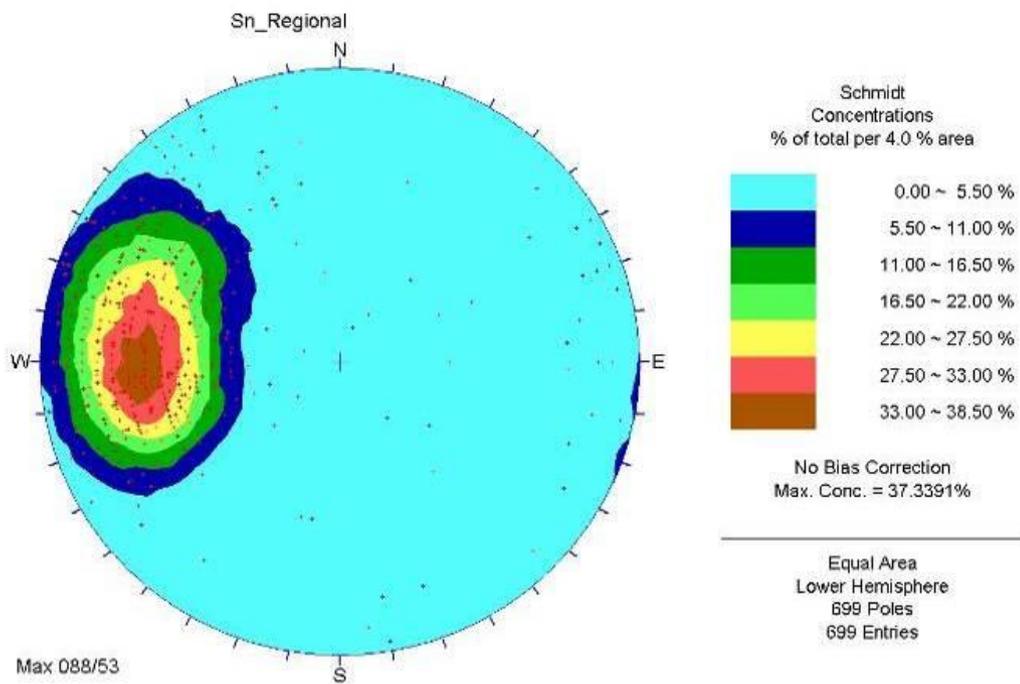


Figura 4.13 – Estereograma dos pólos da superfície Sn – máximo: 088/53.



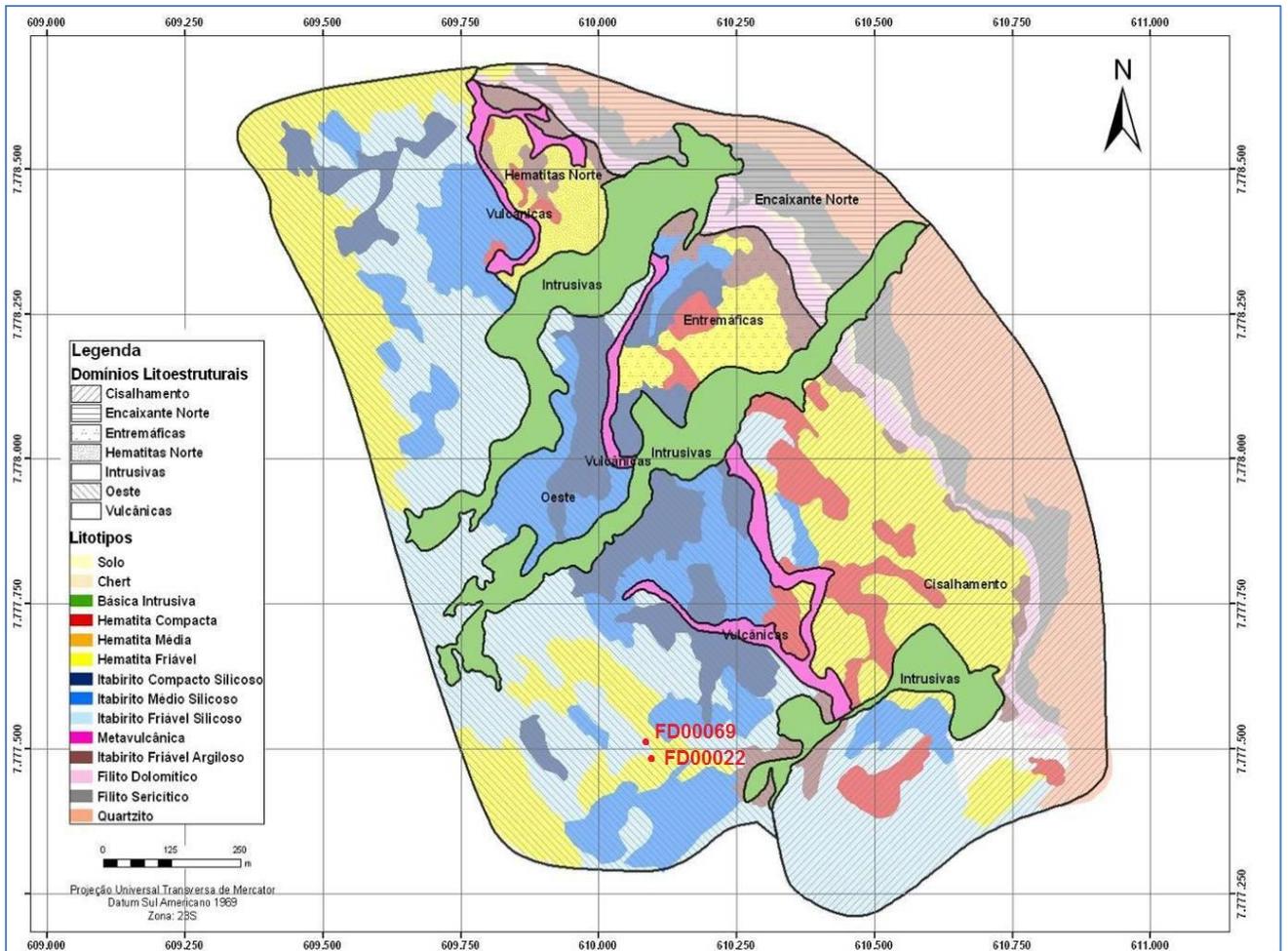
4.2.4. Domínios Litoestruturais da Cava Atual de Tamanduá

Os domínios litoestruturais da Mina do Tamanduá foram definidos com base nas linhas de formas das principais estruturas mapeadas, sendo consideradas ainda as variações nos mergulhos de Sb, os quais foram agrupados em classes de mergulho abaixo de 30, entre 30 e 60 e acima de 60 graus. Foram então definidos oito domínios estruturais, sendo quatro deles subdivididos, com base nas características litológicas, em quatorze subdomínios, conforme mostrado na Tabela 4.1 e mapa na figura 4.14 abaixo.

Tabela 4.1 - Domínios e Subdomínios definidos na cava atual de Tamanduá

COD	DOMÍNIO	SUBDOMÍNIOS
I	CISALHAMENTO	Quartzitos
		Filitos Sericíticos
		Filitos Dolomíticos
		Hematitas
		Itabiritos Friáveis e Argilosos
		Itabiritos e Hematitas friáveis
		Itabiritos Silicosos
II	OESTE	Itabiritos Médios e Compactos Silicosos
		Itabiritos Friáveis Silicosos
III	ENCAIXANTE NORTE	Quartzitos
		Filitos Sericíticos
		Filitos Dolomíticos
IV	ENTREMÁTICAS	Itabiritos e Hematitas compactos
		Itabiritos e Hematitas friáveis
V	CENTRAL	Sem divisão em Subdomínios
VI	HEMATITAS NORTE	Sem divisão em Subdomínios
VII	METAVULCÂNICAS	Sem divisão em Subdomínios
VIII	INTRUSIVAS	Sem divisão em Subdomínios

Figura 4.14- Domínios Litoestruturais da Mina do Tamanduá. Os furos televisionados se encontram no Domínio Oeste e entre os Subdomínios de Hematita Friável e Itabirito Friável Silicoso



5. ANÁLISE DE DADOS

Nesta seção da dissertação será apresentada a análise dos dados coletados em campo e dos dados processados em laboratório. Os dados coletados foram retirados das filmagens realizadas a partir da sonda OPTV e do geoposicionamento oferecido pela sonda; as análises de laboratório tais como marcação de estruturas sobre as imagens capturadas com OPTV, correção da declinação magnética e as análises cinemáticas foram realizadas nos softwares *Wellcad e Dips*.

5.1. Declinação Magnética

Durante a aquisição de dados utilizando a sonda OPTV, o posicionamento terrestre apresentado pela sonda é orientado em função do eixo magnético da Terra. Devido ao uso de magnetômetros para a orientação da sonda, os dados obtidos para o posicionamento do furo de sondagem são dados em Graus, em função do campo magnético terrestre. Sendo assim é necessária a correção de posicionamento das análises realizadas nos *softwares* utilizados.

Para *Willians (2004)* as imagens orientadas devem sofrer o ajuste desta declinação magnética durante o processo de aquisição de dados ou no processamento dos dados. Mas para *Oliveira (2015)*, a aquisição das imagens deverá ser realizada considerando-se o norte magnético, e apenas no processamento das imagens estas deverão ser declinadas com relação ao norte geográfico.

Os dados utilizados nesta dissertação seguiram a proposição de *Oliveira (2015)*, devido à dificuldade encontrada pelo grupo de trabalho em realizar a correção da declinação magnética durante a aquisição de dados. Para os dados coletados em furos verticais, a correção da declinação magnética era realizada descontando a diferença entre o eixo magnético, medido pela sonda, e o eixo do norte verdadeiro. A declinação magnética assumida aqui foi de $23,5^\circ$. Nos furos inclinados, durante o período de processamento de dados era necessária uma correção na declinação das marcações efetuadas em função do norte verdadeiro e do azimute, somente após essa correção era feita o reparo na declinação magnética do furo.

A correção na declinação era realizada pelo *software Wellcad*, onde era realizada uma transformação a partir do azimute obtido na aquisição de dados do OPTV. Nesta transformação, as estruturas inicialmente marcadas como se o furo fosse vertical eram "corrigidas" fazendo o uso do azimute verdadeiro.

O desconto da declinação magnética era realizado após a marcação de estruturas tanto em furos inclinados quanto em furos verticais. Este desconto é realizado apenas no *Dip Direction* das fraturas.

Durante o processo de aquisição de dados a equipe de trabalho também fez uso de uma Sonda de Susceptibilidade Magnética, para que esta apontasse possíveis locais onde teríamos maior influência na imagem devido à presença de materiais magnéticos. A influência dos materiais pode ser observada a partir dos valores apontados pela sonda e comparados com a Figura 5.1, que traz uma tabela com os valores de susceptibilidade magnética para diferentes tipos de rochas. Na Figura 5.2, visualizam-se os valores máximos e mínimos das susceptibilidades averiguadas para cada um dos furos. Percebe-se que mesmo usando os valores máximos como base e comparando com a tabela, em nenhum momento observou-se a presença de materiais com alta susceptibilidade magnética. Desta forma, pode-se inferir que em nenhum dos furos houve grandes distorções nas imagens causadas pelo magnetismo dos materiais.

Figura 5.1 - Tabela com Valores de Susceptibilidade Magnética (Hearst, J.R., Nelson, P.H., Paillet, F.L., 2000. Well Logging for Physical Properties, 2nd Edit. John Wiley & Sons, Chichester)

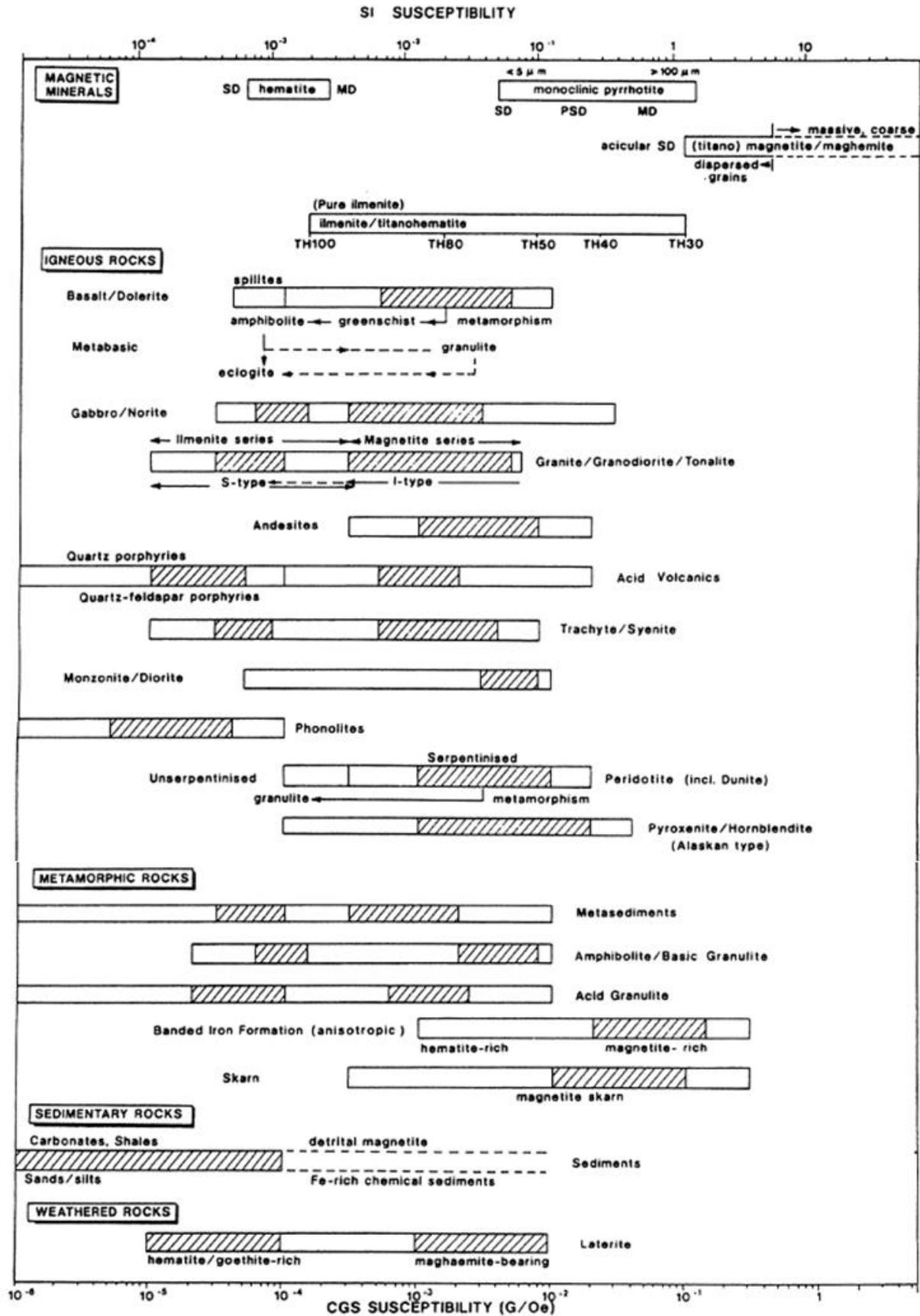


Figura 5.2 - Valores de Susceptibilidade Magnética encontrados para cada furo em cada Mina.

	CGS	SI		
Valor Mínimo	0.009	0.046	Furo GSOFG00025	MINA GONGO SOCO
Valor Máximo	0.030	0.157		
Valor Mínimo	0.009	0.04	Furo GSOFG00026	
Valor Máximo	0.046	0.227		
Valor Mínimo	0.009	0.046	Furo GSOFG00027	
Valor Máximo	0.009	0.047		
Valor Mínimo	0.009	0.047	Furo TAMFD00022	MINA DO TAMANDUÁ
Valor Máximo	0.009	0.048		
Valor Mínimo	0.009	0.047	Furo TAMFD00069	
Valor Máximo	0.009	0.049		

5.2. Comparação das Análises Cinemáticas da BVP com OPTV

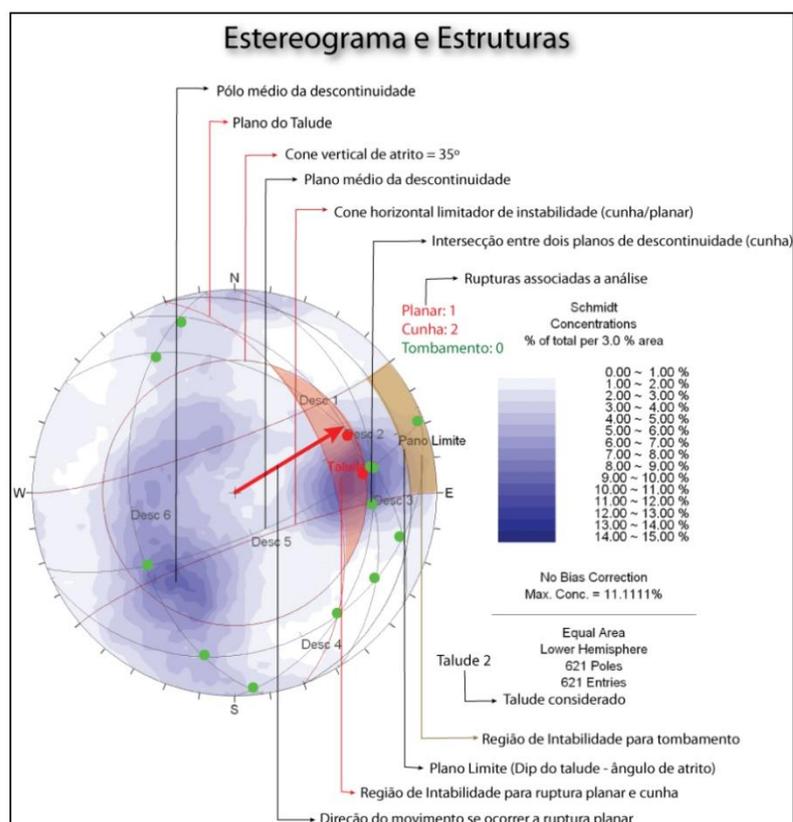
Neste ponto será feita uma comparação entre os dados retirados pela BVP-Engenharia (2004, 2008 e 2012), dados retirados de seus relatórios, e os dados processados a partir das imagens geradas pelo OPTV. É importante ressaltar a grande semelhança, ao menos visual, entre os estereogramas apresentados pela BVP-Engenharia (2004, 2008 e 2012) e os estereogramas construídos a partir das marcações realizadas nas imagens geradas pelo OPTV.

5.2.1. Mina Gongo Soco - Análise Cinemática BVP

O estudo realizado pela BVP-Engenharia (2008) foi feito para os domínios A, B, C e D sendo utilizada a metodologia de *Markland* para análise de rupturas. Os ângulos de atrito utilizados para construção do cone de atrito foram de 25° e 35°, que representam dois ângulos que abrangem todos os litotipos apresentados na descrição (ângulo de atrito obtido para filitos e itabiritos friáveis, respectivamente).

Foram analisadas possibilidades de ocorrência de rupturas planares, cunha e tombamento, considerando-se todas as estruturas planares levantadas na mina. A Figura 5.3 mostra os elementos considerados na análise cinemática.

Figura 5.3 – Identificação dos elementos considerados na análise cinemática. (Fonte: Vale/BVP Engenharia).



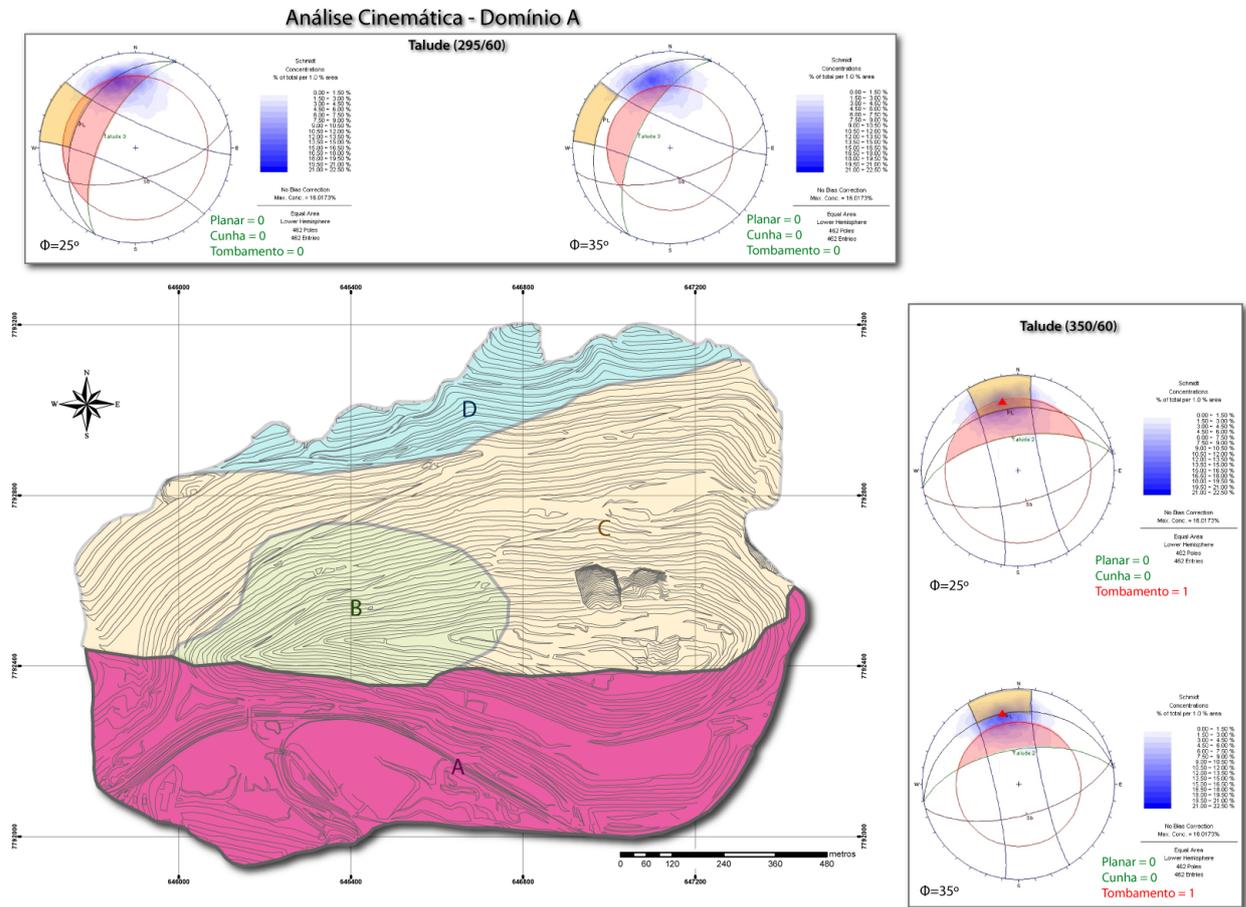
A área vermelha da Figura acima corresponde à zona de instabilidade para rupturas em cunha e planares. A área marrom corresponde à zona de instabilidade para tombamentos. Os pontos correspondem às intersecções entre os planos das descontinuidades. Os pontos em verde indicam as intersecções entre planos sem potencial de ruptura e os pontos em vermelho indicam as intersecções entre os planos com potencial de ruptura em cunha. As setas vermelhas indicam as descontinuidades com potencial de ruptura planar.

A análise cinemática do domínio A foi baseada em dois planos de talude médios (295/60 e 350/60). Para os dois foram realizadas análises considerando o ângulo de atrito igual a 25° e igual a 35°.

O talude 295/60 não apresentou nenhum potencial de instabilidade associado a ele.

A análise cinemática para o talude 350/60 apresentou-se favorável ao desenvolvimento de ruptura do tipo tombamento (para o Sb) para os dois ângulos de atrito (Figura 5.4).

Figura 5.4 –Análise cinemática do Domínio A. (Fonte: Vale/BVP Engenharia).



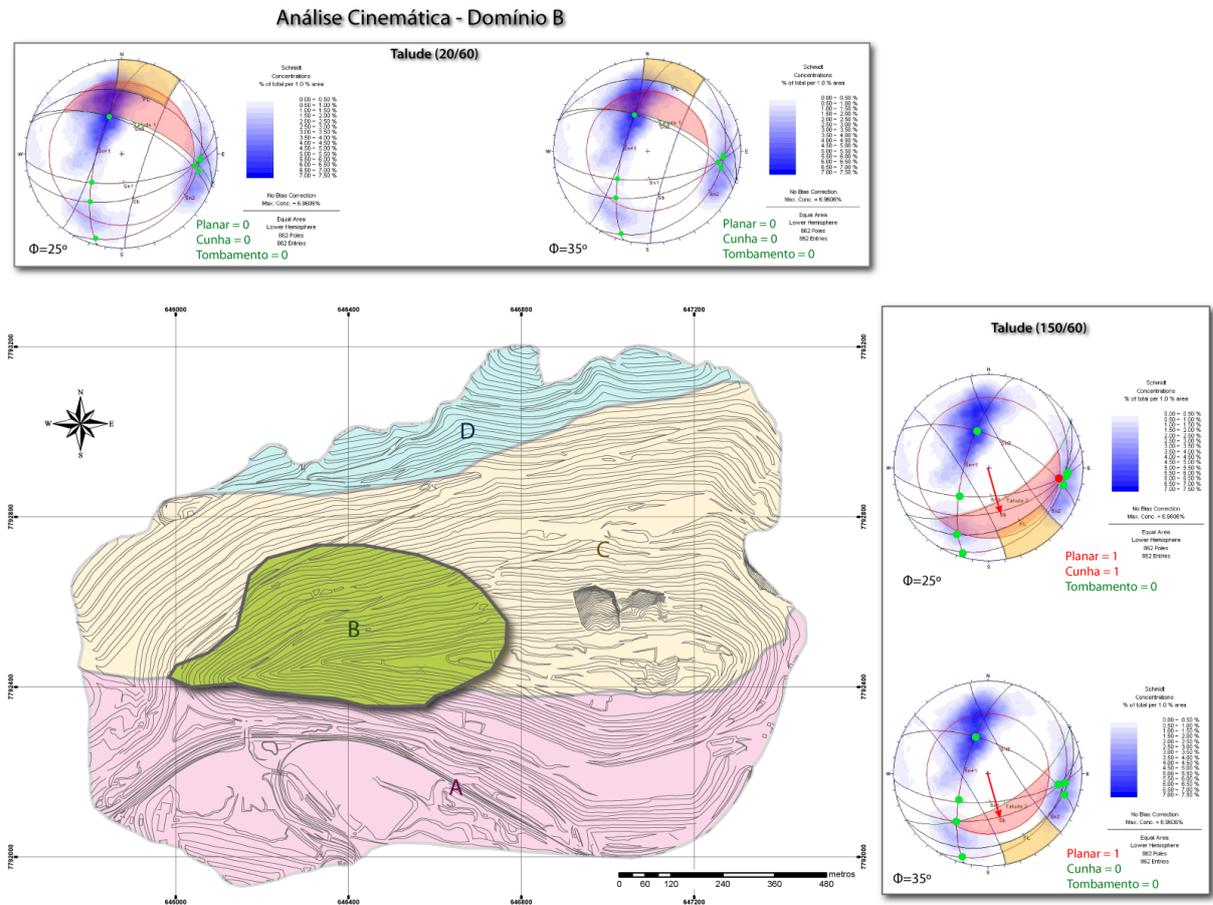
A análise cinemática do domínio B foi realizada considerando dois planos de talude médios (020/60 e 150/60). Para ambos foram realizadas análises para ângulos de atrito igual a 25° e 35° .

O talude 020/60 não apresentou nenhum potencial de instabilidade associado a ele.

A análise para o talude 150/60 e o ângulo de atrito igual a 25° , deu favorável ao desenvolvimento de ruptura planar (para Sb) e a ruptura em cunha (intersecção entre Sn e Sn+1).

A análise para o mesmo talude e ângulo de atrito igual a 35° , deu uma situação favorável ao desenvolvimento da ruptura planar (para Sb) (Figura 5.5).

Figura 5.5 – Análise cinemática do Domínio B. (Fonte: Vale/BVP Engenharia).



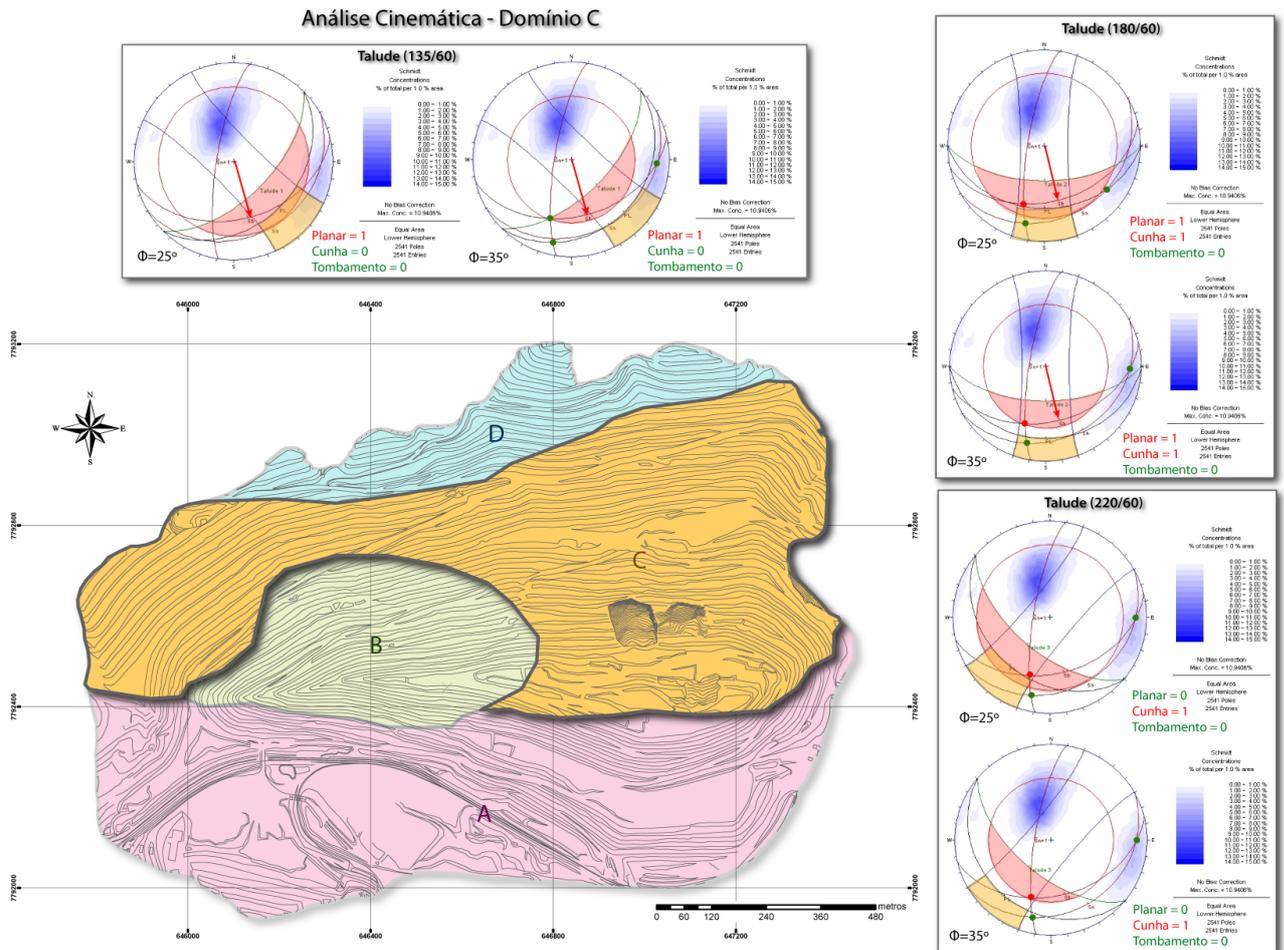
Para a análise cinemática do domínio C foram considerados três planos de talude (135/60, 180/60 e 220/60). Para os três planos foram realizadas análises para os ângulos de atrito igual a 25° e 35° .

O talude 135/60 apresentou duas situações favoráveis ao desenvolvimento de ruptura planar (para S_b), uma para o ângulo de atrito igual a 25° e outra para o ângulo igual a 35° (Figura 5.6).

A análise para o talude 180/60 para os dois ângulos de atrito, deu favorável ao desenvolvimento de rupturas planares (para S_b) e a rupturas em cunhas (intersecção entre a S_b e S_{n+1}) (Figura 5.6).

Por último, a análise cinemática para o talude 220/60 deu condições favoráveis ao desenvolvimento de rupturas em cunha para os dois ângulos de atrito (intersecção entre a S_b e S_{n+1}) (Figura 5.6).

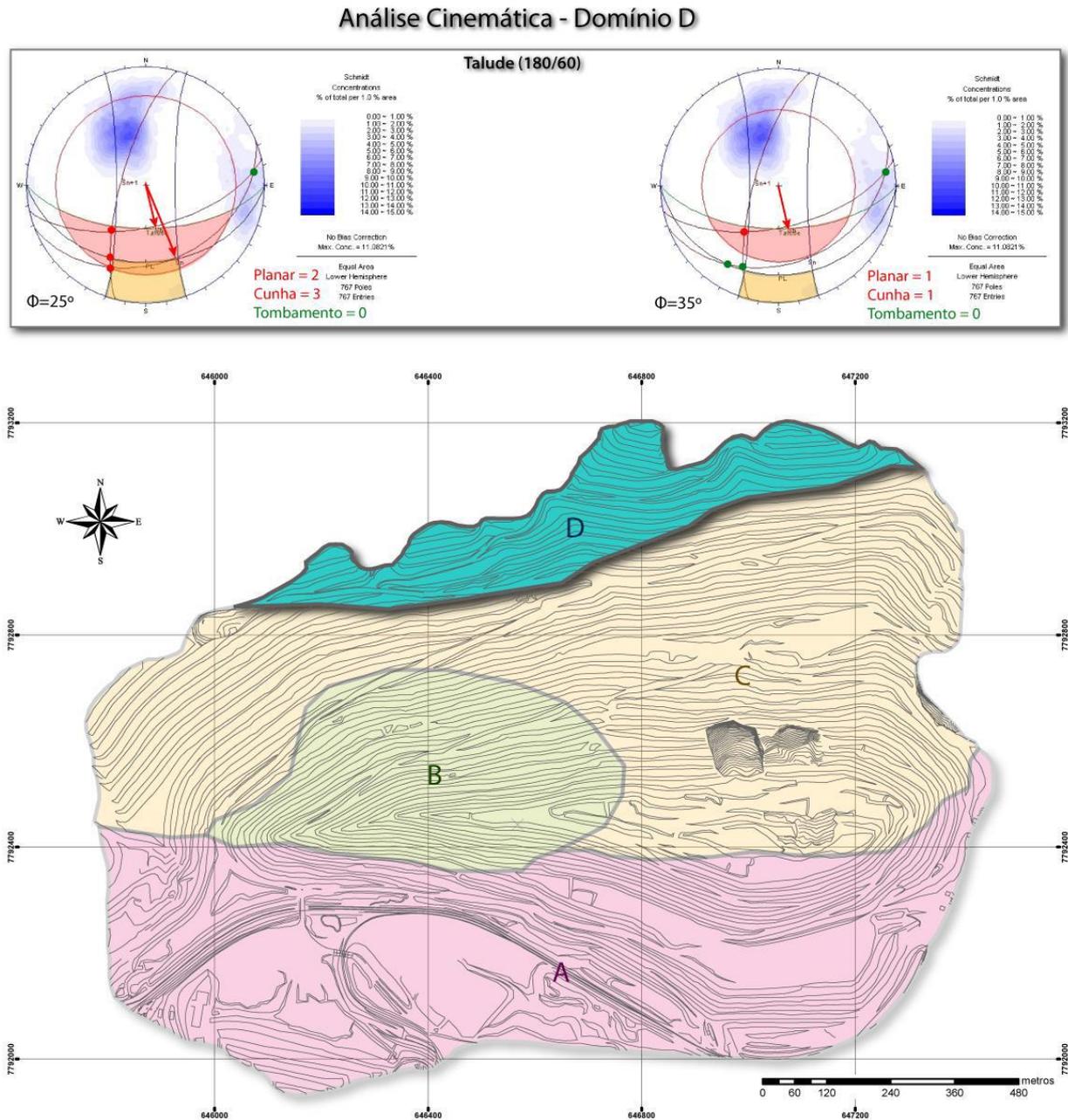
Figura 5.6 –Análise cinemática do Domínio C. (Fonte: Vale/BVP Engenharia).



A análise cinemática do domínio D foi realizada com base em um único talude (180/60). Bem com as situações anteriores, as análises foram feitas considerando dois ângulos de atrito (25° e 35°).

A análise cinemática para o talude 180/60 e ângulo de atrito de 25°, deu favorável ao desenvolvimento de duas situações com potencial de desenvolvimento de rupturas planares (para Sb) e três situações favoráveis ao desenvolvimento de rupturas em cunha (intersecção entre a Sb e Sn+1) (Figura 5.7).

Figura 5.7 –Análise cinemática do Domínio D. (Fonte: Vale/BVP Engenharia).



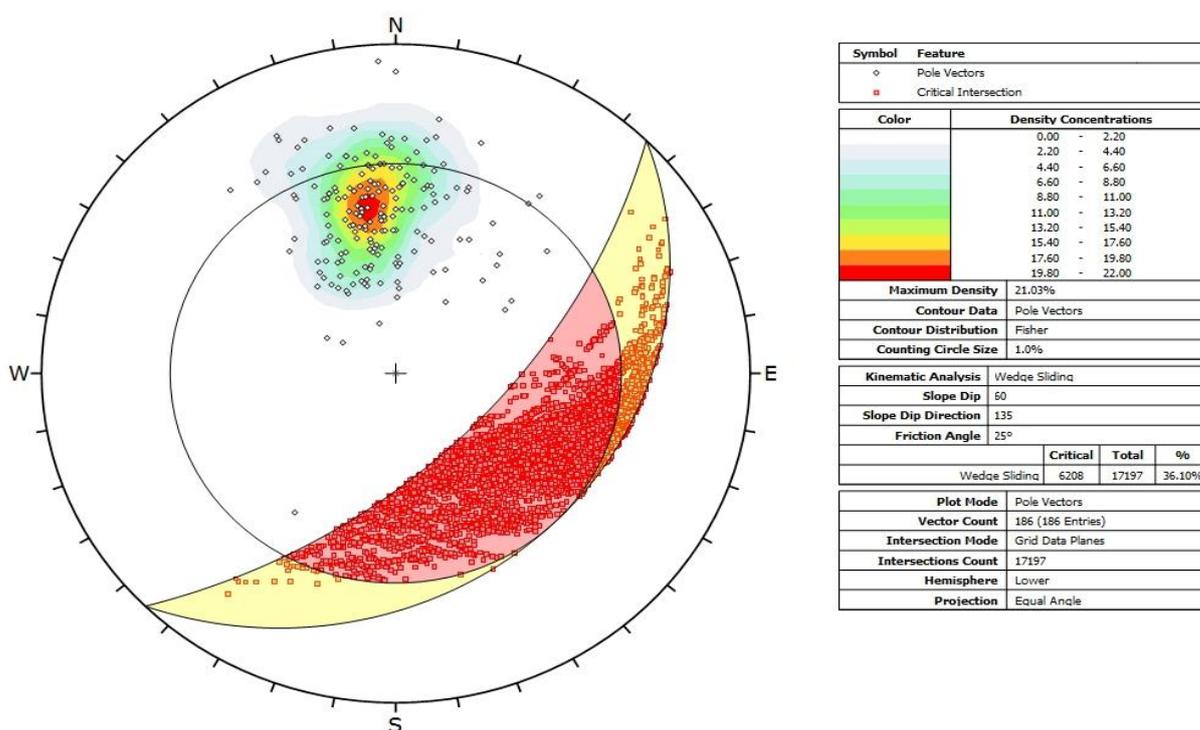
5.2.2. Mina Gongo Soco - Análise Cinemática com dados do OPTV

A análise cinemática do Furo GSOFG00023, localizado no domínio C, foi realizada baseada em três planos de talude médios ($135^\circ/60^\circ$, $180^\circ/60^\circ$ e $220^\circ/60^\circ$). Para os três foram realizadas análises considerando o ângulo de atrito igual a 25° e igual a 35° . Para cada talude médio foram avaliadas as possibilidades de ruptura planar, em cunha, tombamento de deslocamento circular ou de base.

Serão apresentadas a seguir as imagens que se referem à possibilidade mais crítica, ou seja, a maior possibilidade de ruptura dentre os parâmetros com possibilidade de serem controlados (tipo de ruptura e ângulo de atrito).

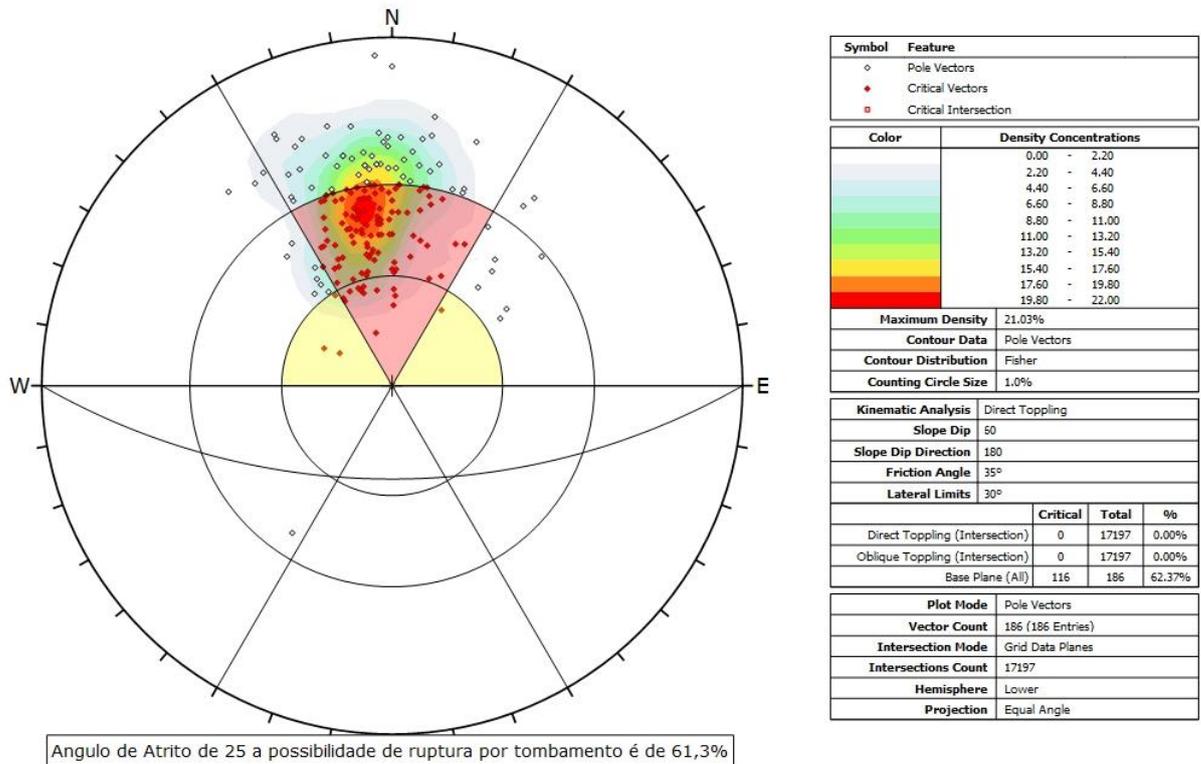
O talude 135°/60° (Figura 5.8) apresenta a probabilidade de deslocamento em cunha, com 36,1% de possibilidade, para um ângulo de atrito de 25°.

Figura 5.8 – Análise cinemática do Domício C, talude médio 135°/60°, ângulo de atrito 25°.



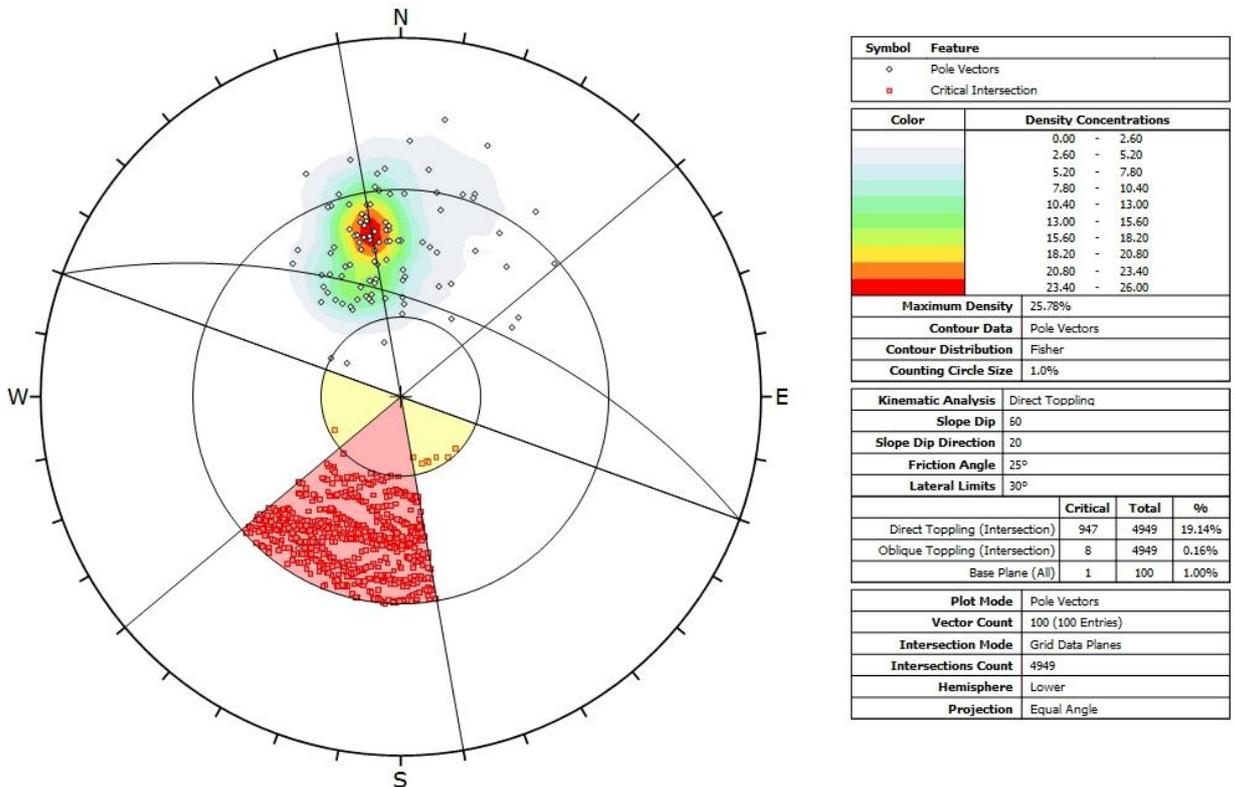
A análise cinemática para o talude 180°/60° (Figura 5.9) foi favorável ao desenvolvimento de ruptura do tipo tombamento (para o Sb) para os dois ângulos de atrito, com a probabilidade de queda atingindo 62,37%. Apresentam-se mais crítico que foi o ângulo de atrito de 35°.

Figura 5.9 – Análise cinemática do Domício C, talude médio 180°/60°, ângulo de atrito 35°.



A análise cinemática para o talude 220°/60° (Figura 5.10) foi favorável ao desenvolvimento de ruptura do tipo cunha (para o Sb) para os dois ângulos de atrito, com a probabilidade de queda atingindo 28,12%. Apresentam-se o mais crítico que foi o angulo de 25°.

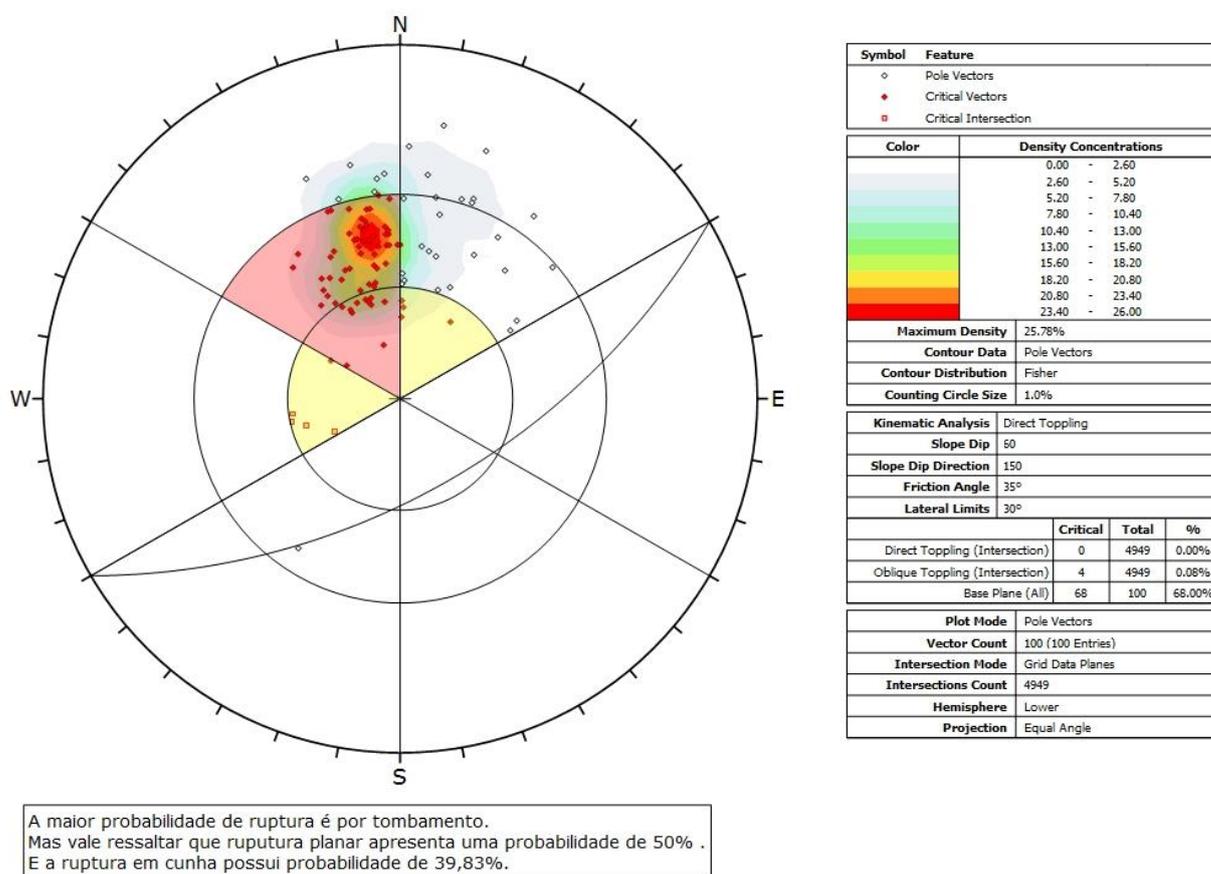
Figura 5.11 – Análise cinemática do Domício B, talude médio 020°/60°, ângulo de atrito 25°



Para o Ângulo de atrito 35, temos a mesma probabilidade de tombamento direto que o apresentado.

O talude 150°/60° (Figura 5.12) apresenta a probabilidade de ruptura do tipo deslocamento de base, com 68% de possibilidade, para um ângulo de atrito de 35°. É importante ressaltar que independentemente do tipo de ruptura e do ângulo de atrito, todas as possibilidades de ruptura superam os 40% de possibilidade de ocorrência. Com destaque para o ângulo de atrito de 25°, onde a ruptura em cunha apresenta uma probabilidade de 58,8% de ocorrência, a ruptura planar apresenta uma probabilidade de 59% de ocorrência e a ruptura do tipo deslocamento de base com 64% de possibilidade de ocorrência.

Figura 5.12 – Análise cinemática do Domício B, talude médio 150°/60°, ângulo de atrito 35°.

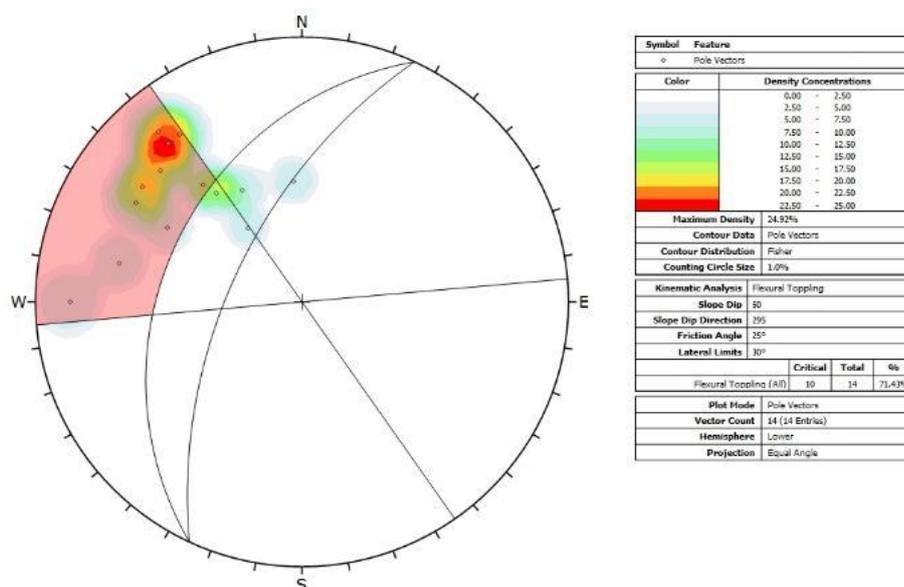


A análise cinemática do Furo GSOFG00027, localizado no domínio A, foi realizada baseada em dois planos de talude médios (295°/60° e 350°/60°). Para os ambos foram realizadas análises considerando o ângulo de atrito igual a 25° e 35°. Para cada talude médio foram avaliadas as possibilidades de ruptura planar, em cunha, tombamento de deslocamento circular ou de base.

Neste momento serão apresentadas as imagens que se referem a possibilidade mais crítica, a maior possibilidade de ruptura, dentre os parâmetros com possibilidade de serem controlados (tipo de ruptura e ângulo de atrito).

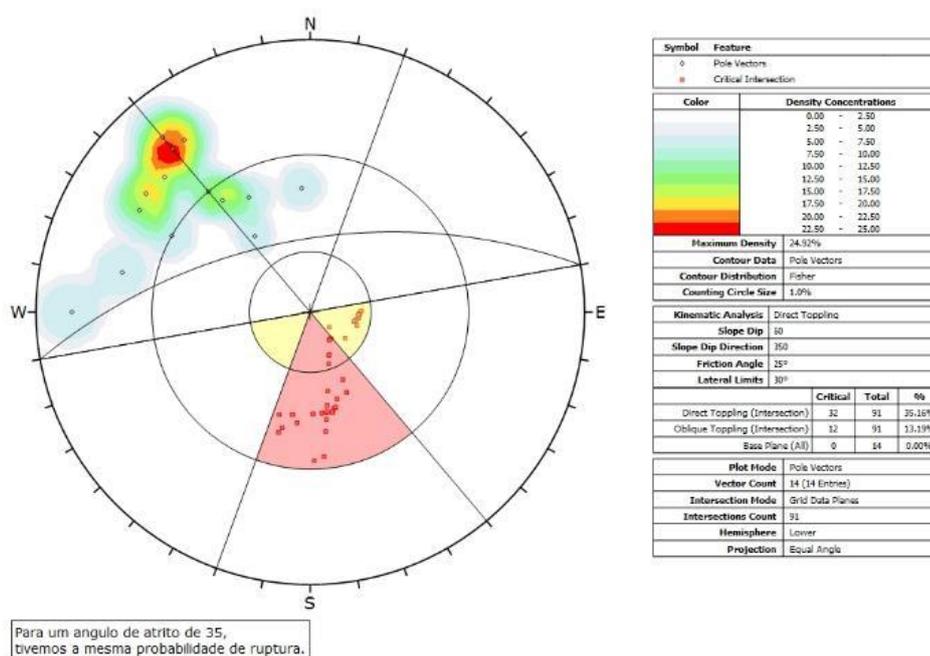
A análise cinemática para o talude 295°/60° (Figura 5.13) é favorável ao desenvolvimento de ruptura do tipo tombamento (para o Sb) para os dois ângulos de atrito, com a probabilidade de queda atingindo mais de 50%. Apresenta-se o mais crítico que foi o ângulo de 25°, com uma probabilidade de ruptura de 71,43%.

Figura 5.13 – Análise cinemática do Domício A, talude médio 295°/60°, ângulo de atrito 25°.



A análise cinemática para o talude 350°/60° (Figura 5.14) é favorável ao desenvolvimento de ruptura do tipo tombamento (para o Sb) para os dois ângulos de atrito, com probabilidades iguais de 35% de chances de ruptura.

Figura 5.14 – Análise cinemática do Domício A, talude médio 350°/60° e ângulo de atrito 25°.



Para um ângulo de atrito de 35, tivemos a mesma probabilidade de ruptura.

5.2.3. Mina do Tamanduá - Análise Cinemática BVP

O estudo realizado pela BVP-Engenharia (2004 e 2012) foi feito para o Domínio Oeste sendo utilizada a metodologia de *Markland* para análise de rupturas. O ângulo de atrito utilizado para construção do cone de atrito foi de 36°. Foram analisadas possibilidades de ocorrência de rupturas planares, cunha e tombamento, considerando-se todas as estruturas planares levantadas na mina. Os dois furos perfilados estão localizados no Domínio Oeste da mina.

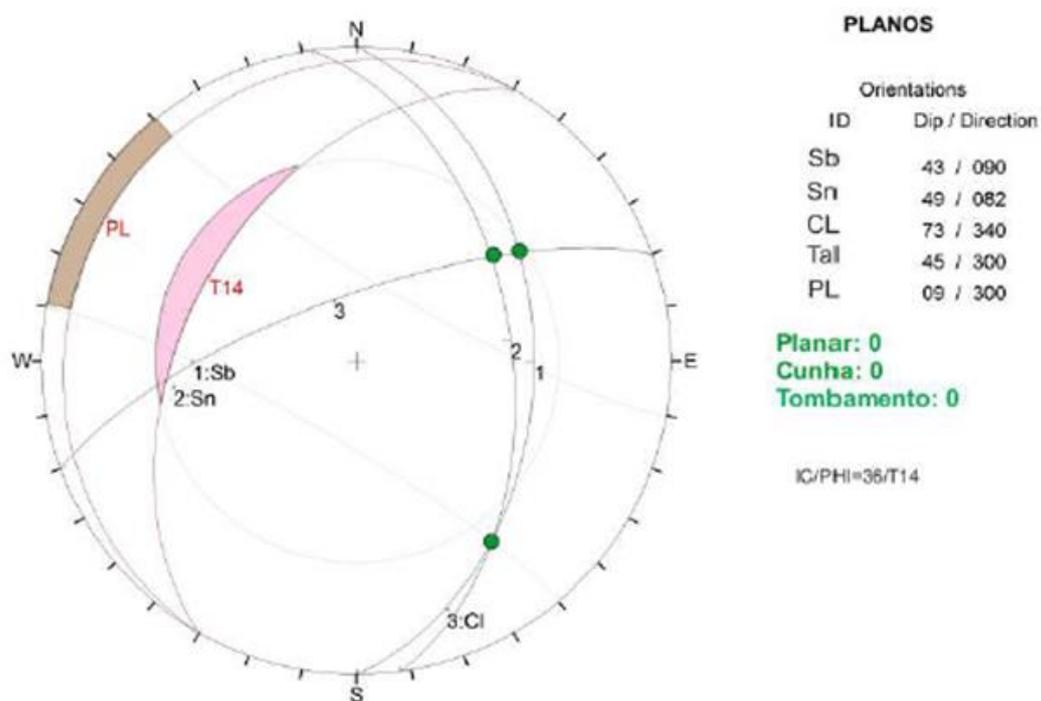
A comparação foi realizada com os resultados obtidos pela BVP em relatório de 2012, conforme seguem. Foi focado o Itabirito Friável (uma das subseções da região), da seção oeste. A análise foi realizada para vários taludes (conforme Tabela 5.1) do Domínio Oeste. Foram analisadas possibilidades de ocorrência de rupturas planares, cunha e tombamento, considerando-se todas as estruturas planares levantadas na mina.

Tabela 5.1 - Taludes do Domínio Oeste, Subdomínio Itabirito Friável da Mina do Tamanduá

DOMÍNIO	SUB-DOMÍNIO	TALUDE	SEÇÃO			ÂNGULO DE ATRITO (GRAUS)
			Nº	INCLINAÇÃO (GRAUS)	DIP DIRECTION (GRAUS)	
OESTE	Itabirito Friável	14	45	300	7	36
		15	65	300	7	
		19	55	95	9	
		20	50	94	9	
		21	45	38	10	
		23	50	50	11	
		26	50	90	12	
		30	55	67	14	

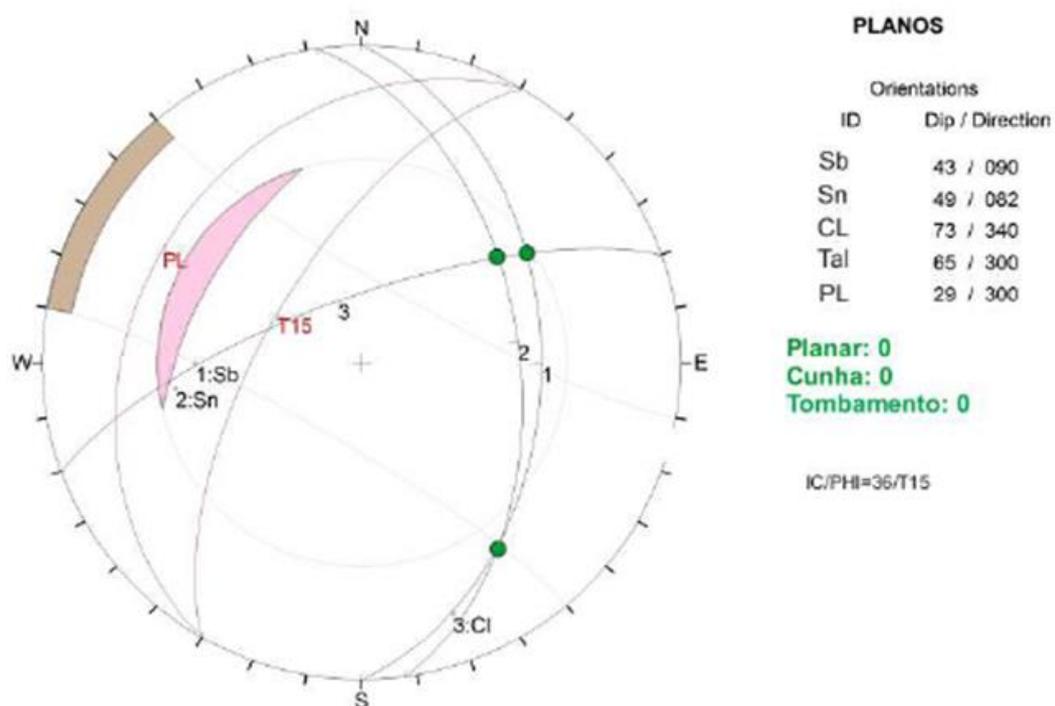
O primeiro dos taludes para o Domínio Oeste e Subdomínio Itabirito Friável, o Talude 14, segundo o relatório da BVP, não apresenta nenhuma possibilidade de Ruptura, conforme Figura 5.15.

Figura 5.15 - Análise Cinemática Talude 14, Mina do Tamanduá.



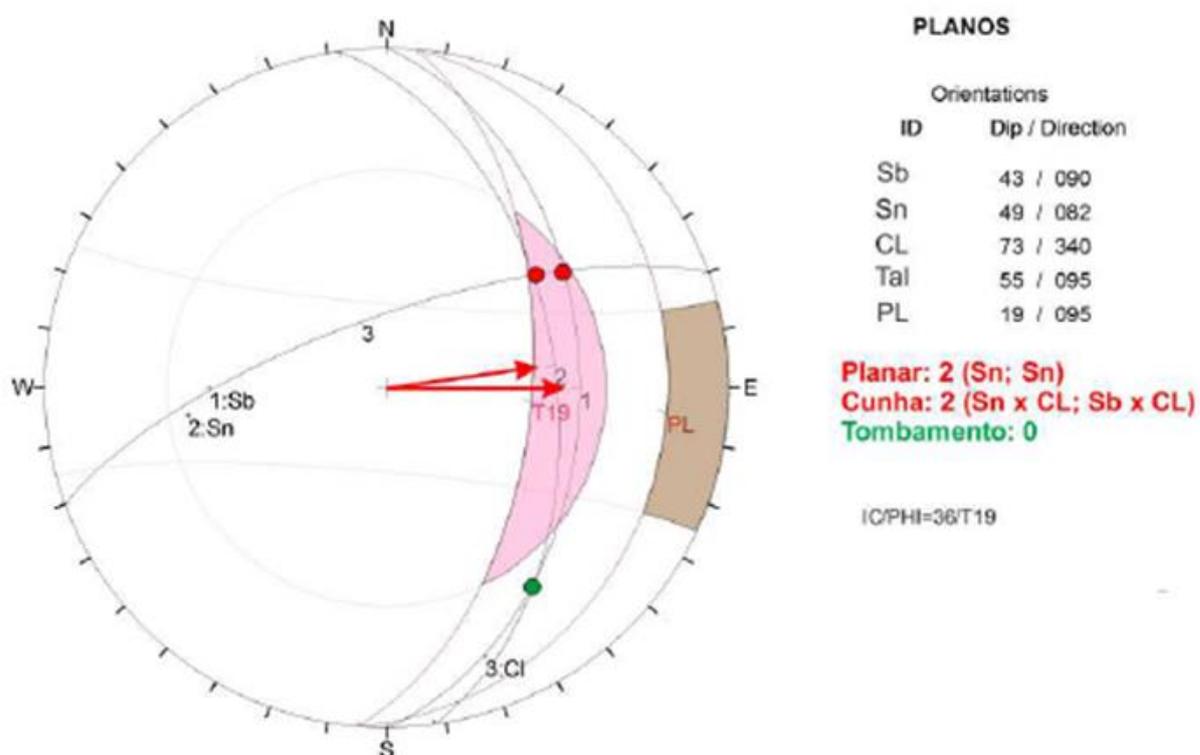
A análise cinemática efetuada pela BVP-Engenharia (2004) para o Talude 15 também não apresentou nenhuma possibilidade de ruptura, conforme Figura 5.16

Figura 5.16 - Análise Cinemática Talude 15, Mina do Tamanduá.



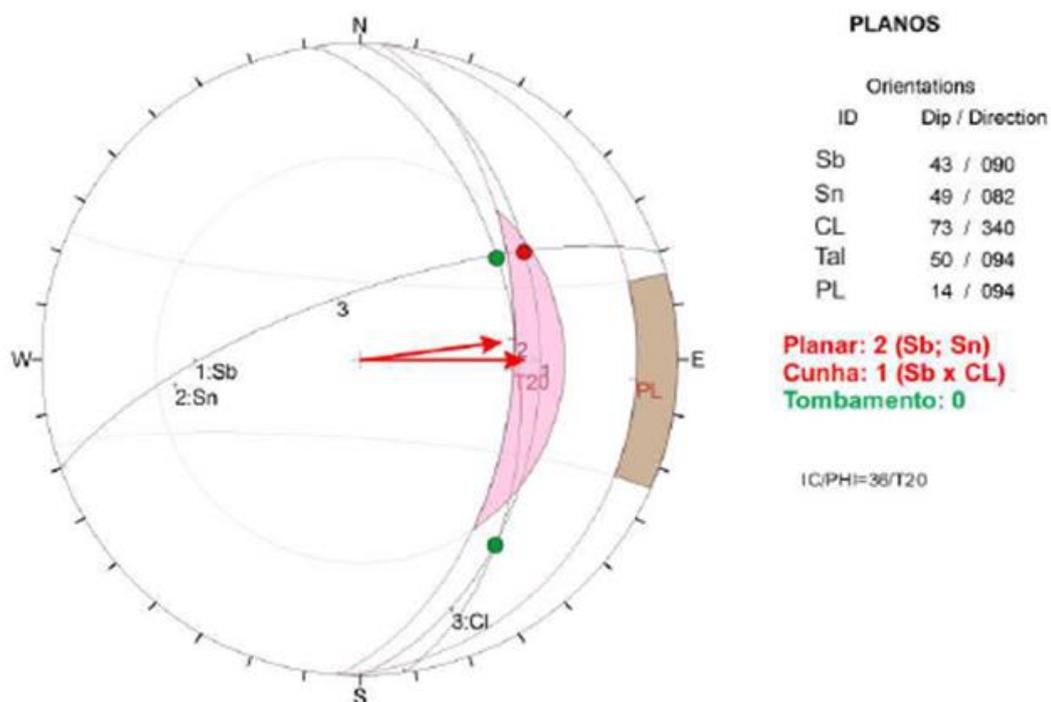
Segundo análise cinemática efetuada pela BVP-Engenharia (2012) para o Talude 19 apresentou a possibilidade de rupturas Planar e em Cunha, conforme a Figura 5.15. A parte em rosa da Figura 5.17 indica a possibilidade de ruptura em cunha, que acontece na intersecção de duas curvas na área compreendida no interior da curva limite, dada pela inclinação do talude. As setas indicam a possibilidade de queda planar.

Figura 5.17 - Análise Cinemática Talude 19, Mina do Tamandú



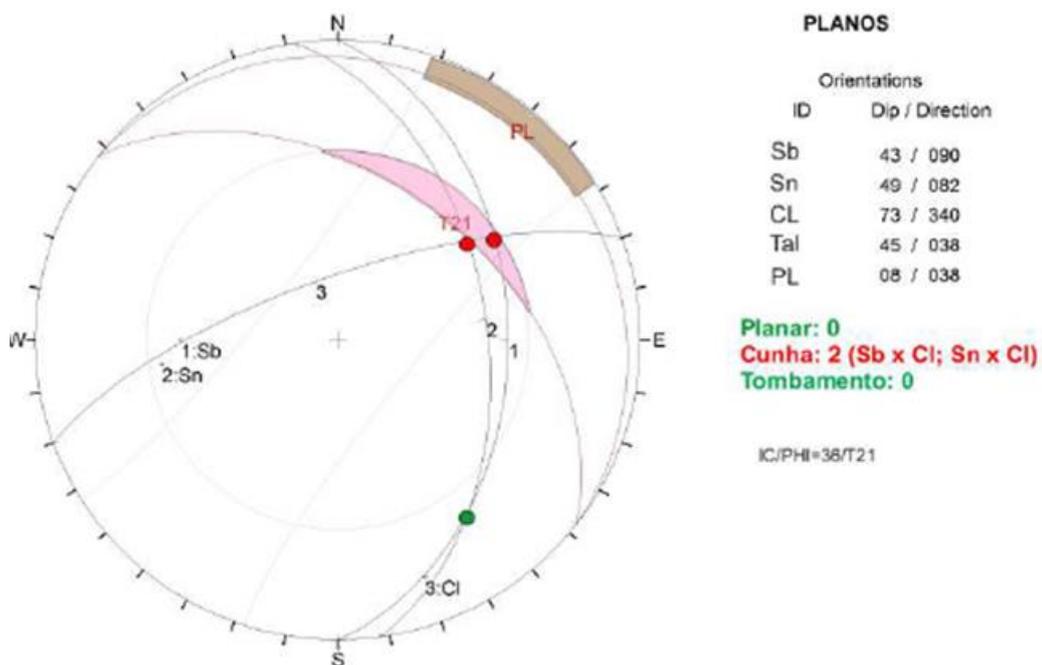
O Talude 20 apresentou, na análise cinemática realizada em BVP-Engenharia (2004), a possibilidade de rupturas Planar e em Cunha, conforme a Figura 5.16. A parte em rosa da Figura 5.18 indica a possibilidade de ruptura em cunha, que acontece na intersecção de uma curva na área compreendida no interior da curva limite, dada pela inclinação do talude. As setas indicam a possibilidade de queda planar, para duas concentrações de polos diferentes.

Figura 5.18 - Análise Cinemática Talude 20, Mina do Tamanduá.



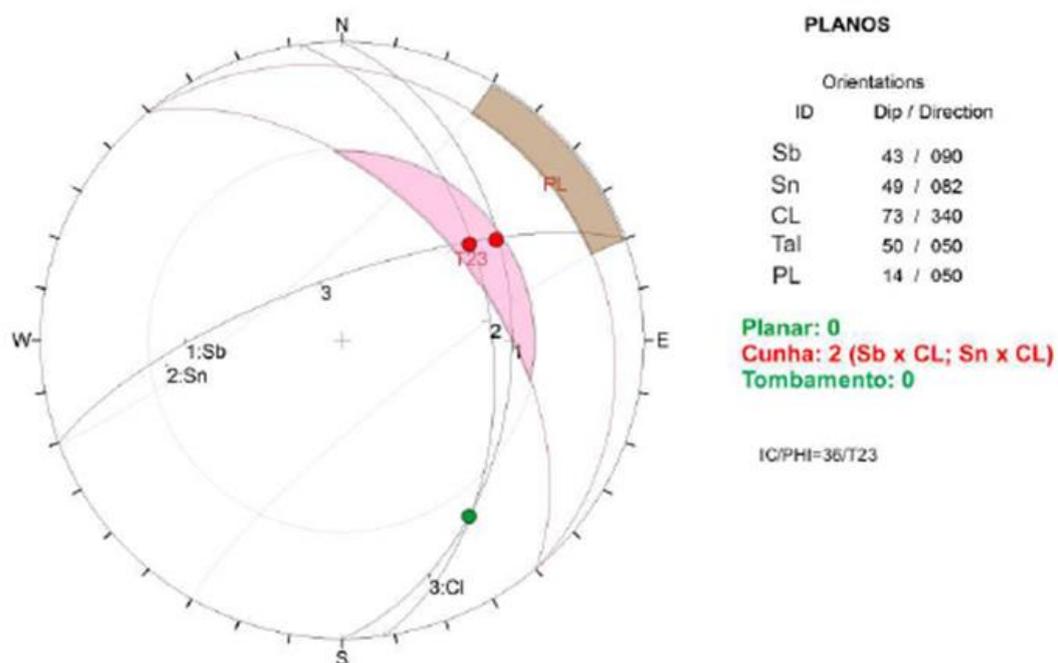
O talude 21, apresentou possibilidade de ruptura em cunha, conforme indica a intersecção de duas curvas, representando o bandamento principal (Sn) e a foliação (Sn), com uma terceira curva representando a curva tendência gerada pelos polos da estrutura de Clivagem (CI), presente na mina, conforme figura 5.19.

Figura 5.19 - Análise Cinemática Talude 21, Mina do Tamanduá.



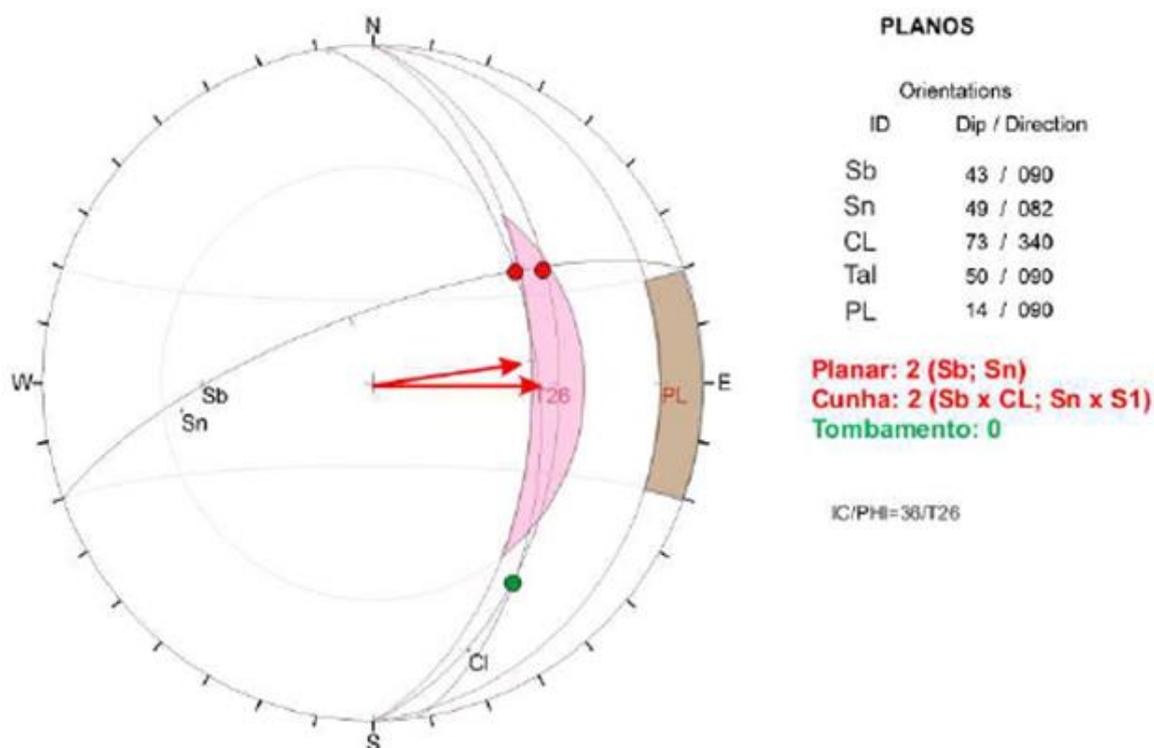
A análise cinemática efetuada no Talude 23, conforme Figura 5.20, apresentou resultados muito semelhantes aos do talude 21, com possibilidades de ruptura em cunha.

Figura 5.20 - Análise Cinemática Talude 20, Mina do Tamanduá.



Segundo a definição dada em BVP-Engenharia (2004) o Talude 26, apresenta possibilidade rupturas planares e cunhas (marginais). Conforme Figura 5.21.

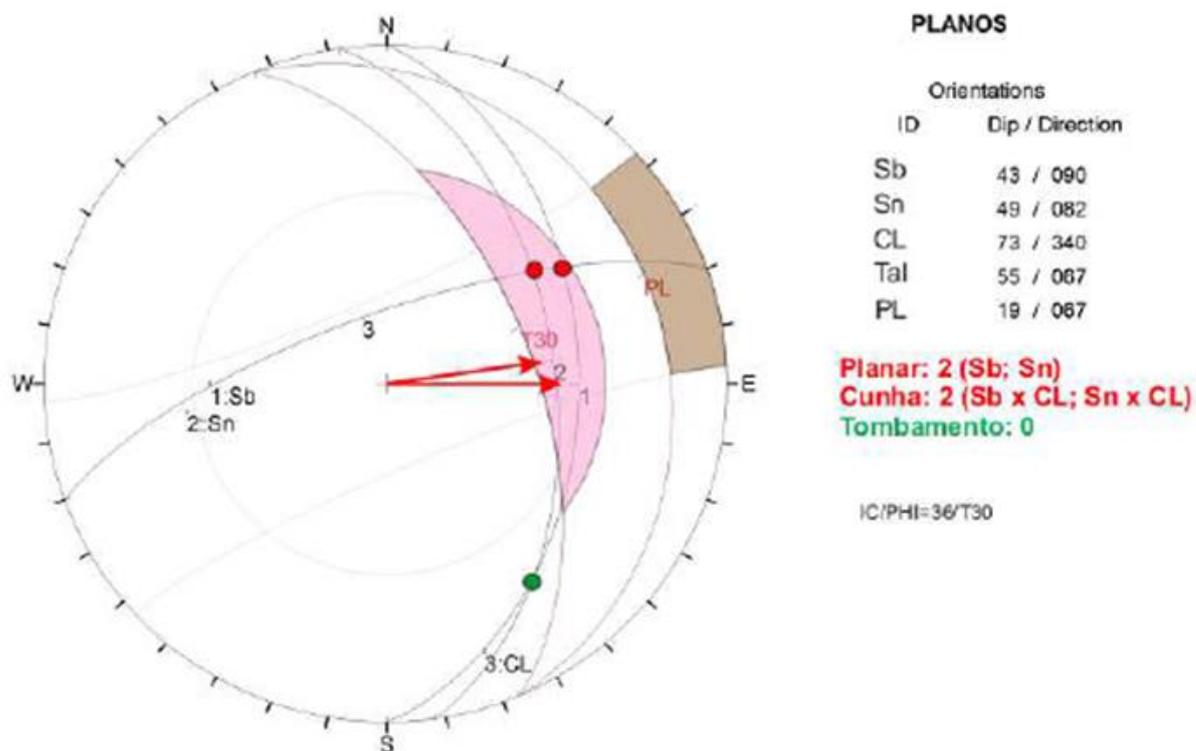
Figura 5.21 - Análise Cinemática Talude 26, Mina do Tamanduá.



Para finalizar, apresenta-se a análise para o Talude 30. A BVP-Engenharia (2004) indica que o mesmo pode apresentar rupturas planares e em cunha.

Vale ressaltar que em cada uma das imagens geradas por BVP – Engenharia (2004 e 2012), visualiza-se à direita uma pequena tabela apresentando cada uma das curvas presentes na Análise Cinemática. Cada curva representa uma das estruturas existentes sendo elas, Bandamento (Sb), Foliação (Sn), Clivagem (Cl) com seus respectivos *dip* e *dip direction*.

Figura 5.22 - Análise Cinemática Talude 30, Mina do Tamanduá.



5.2.4. Mina do Tamanduá - Análise Cinemática com dados do OPTV

As análises cinemáticas dos Furos TAMFD00022 e TAMFD00069, localizados no Domínio Oeste, Subdomínio Itabirito Friável, foram realizadas baseadas em oito planos de talude médios conforme a Tabela 5.1. Para os todos os taludes foram realizadas análises considerando o ângulo de atrito igual a 36°. Para cada talude médio foram avaliadas as possibilidades de ruptura planar, em cunha, tombamento de deslocamento circular ou de base.

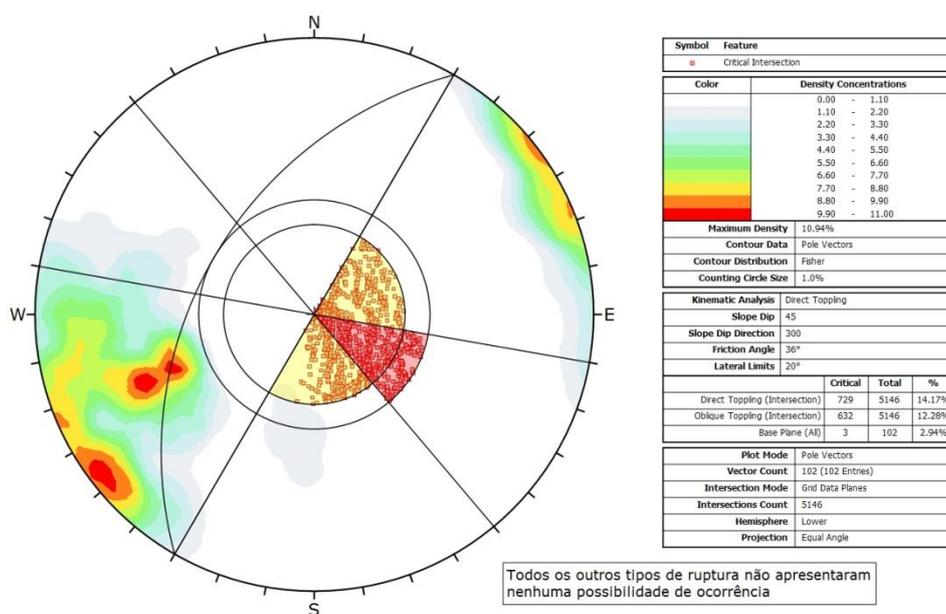
Na sequência serão apresentadas as imagens que se referem à possibilidade mais crítica, a maior possibilidade de ruptura, dentre os parâmetros com possibilidade de serem controlados (tipo de ruptura e ângulo de atrito).

Os estereogramas foram feitos a partir das estruturas marcadas (bandamentos e fraturas) no perfil dos furos. Nestes estereogramas não estão presentes a grande quantidade de fraturas verticais, visíveis em cada um dos perfis. Os estereogramas apresentados constituem-se das marcações realizadas nos dois furos perfilados na Mina do Tamanduá, isso porque ambos os furos pertencem ao

mesmo domínio da Mina, sendo assim apresentam, possivelmente, a mesma estrutura geológica.

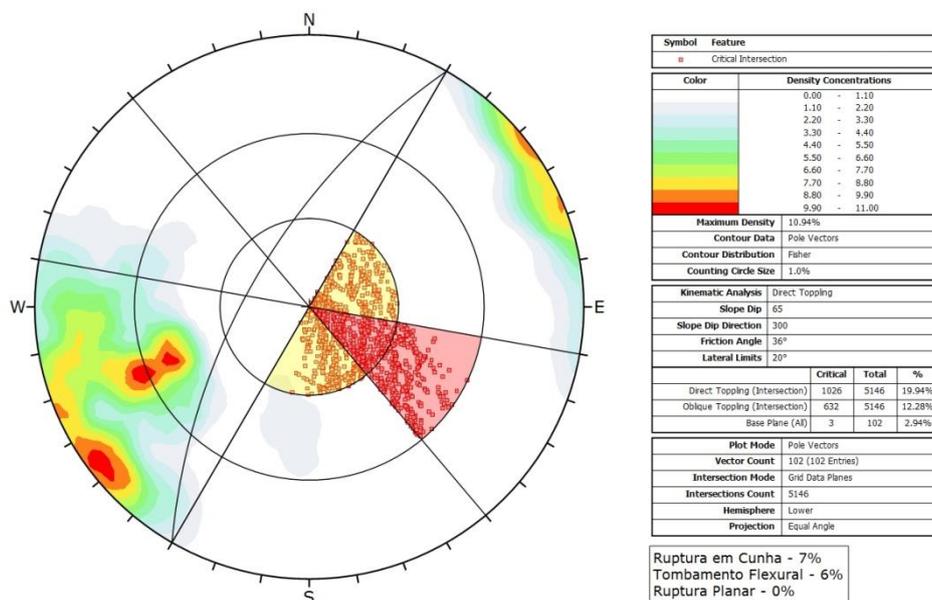
No primeiro caso apresenta-se o talude 14, com uma combinação de *Dip/Dip direction* de $45^\circ/300^\circ$, nestas condições, conforme as marcações do OPTV têm-se uma possibilidade de tombamento direto de 14,17%

Figura 5.23 - Análise cinemática do talude 14, $45^\circ/300^\circ$ e ângulo de atrito 36°



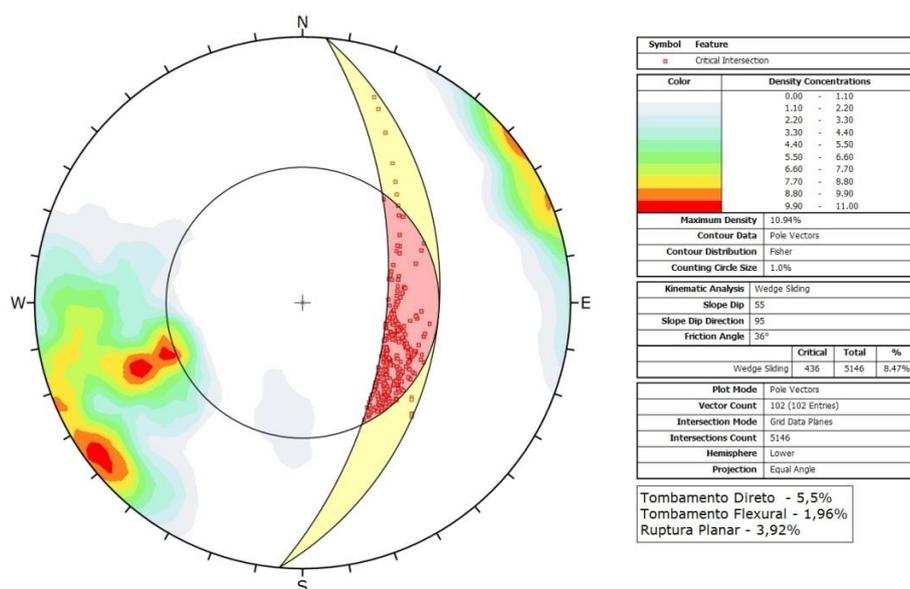
No segundo caso apresenta-se o talude 15, com uma combinação de *Dip/Dip direction* de $65^\circ/300^\circ$. Nestas condições, conforme as marcações do OPTV, há uma possibilidade de tombamento direto de aproximadamente 20%.

Figura 5.24 - Análise cinemática do talude 15, 65°/300° e ângulo de atrito 36°



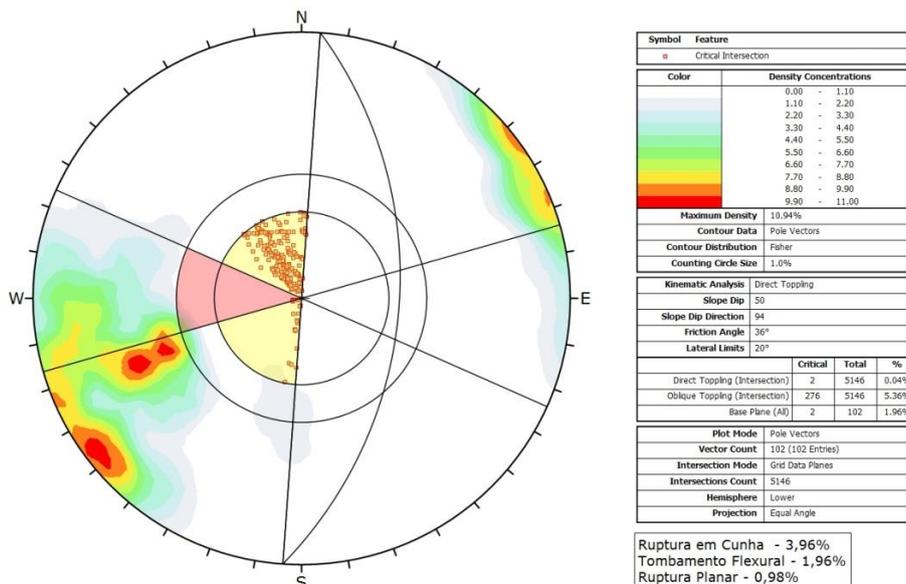
O terceiro caso estudado apresenta-se o talude 19, com uma combinação de *Dip/Dip direction* de 55°/95°; nestas condições, conforme as marcações do OPTV, têm-se uma possibilidade ruptura em cunha de aproximadamente 8,47%.

Figura 5.25 - Análise cinemática do talude 19, 55°/95° e ângulo de atrito 36°



Para o talude 20, com uma combinação de *Dip/Dip direction* de $50^\circ/94^\circ$, nestas condições, conforme as marcações do OPTV, espera-se uma possibilidade de tombamento oblíquo de 5,36%.

Figura 5.26 - Análise cinemática do talude 20, $50^\circ/94^\circ$ e ângulo de atrito 36°



Para o talude 21, com uma combinação de *Dip/Dip direction* de $45^\circ/38^\circ$, nestas condições, conforme as marcações do OPTV apresenta-se uma possibilidade de tombamento oblíquo de 10,65%.

Figura 5.27 - Análise cinemática do talude 21, $45^\circ/38^\circ$ e ângulo de atrito 36°

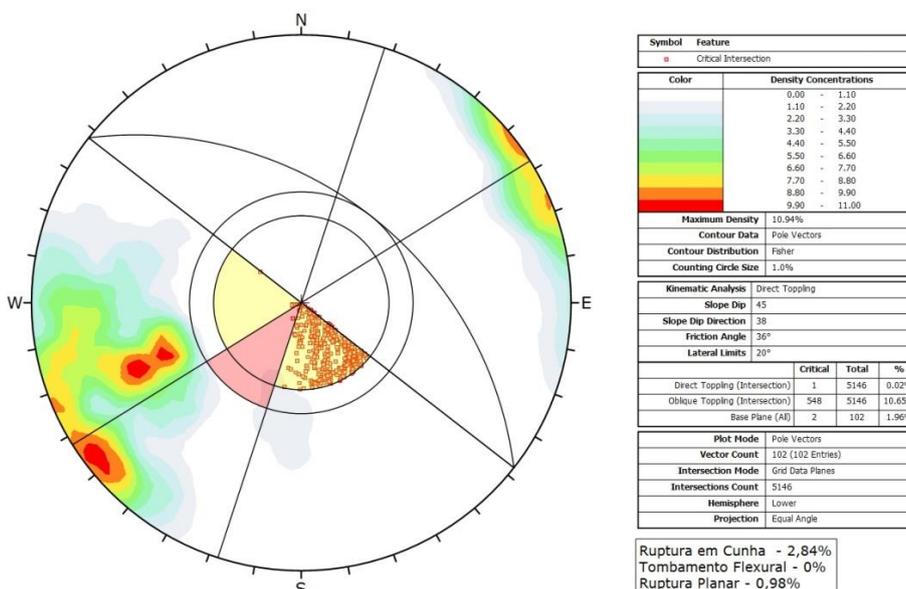
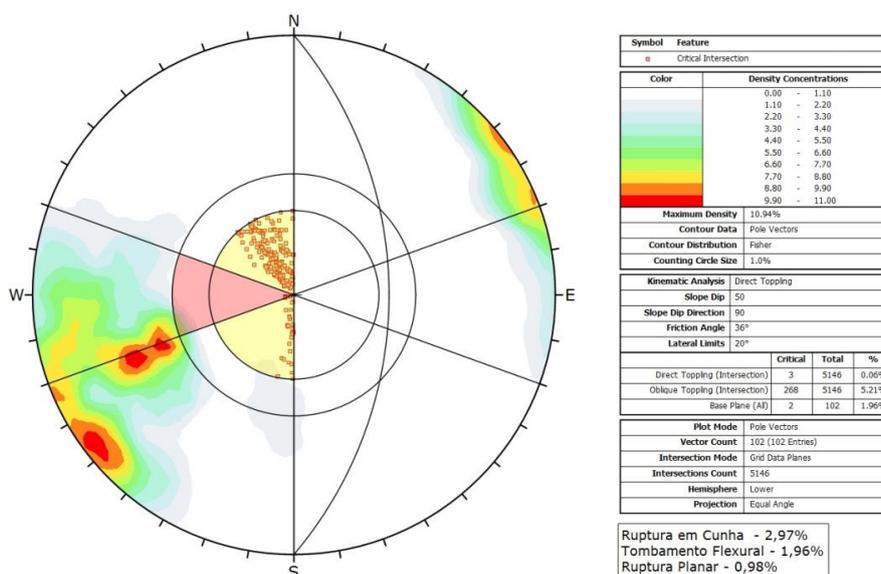
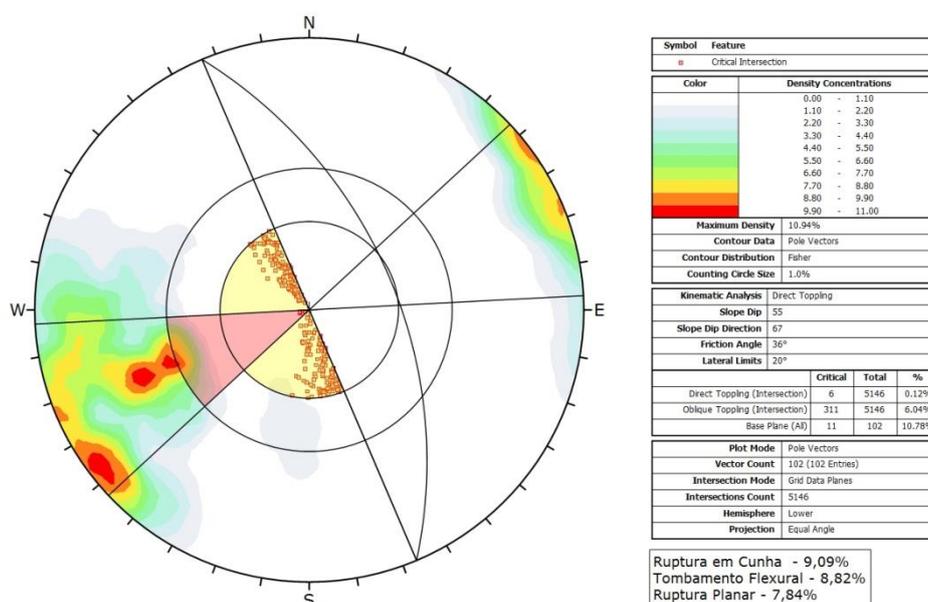


Figura 5.29 - Análise cinemática do talude 23, 50°/90° e ângulo de atrito 36°



O último caso estudado para a Mina do Tamanduá tem-se o talude 30, com uma combinação de *Dip/Dip direction* de 55°/67°, nestas condições, conforme as marcações do OPTV conclui-se com uma possibilidade de ruptura de base (ou ruptura circular) de 10,78%. Importante neste caso ressaltar a possibilidade de ruptura em cunha com aproximadamente 9%, se aproximando da maior possibilidade analisada.

Figura 5.30 - Análise cinemática do talude 23, 50°/90° e ângulo de atrito 36°



5.2.5. Resultados das Análises Cinemáticas

Nesta seção é apresentado um resumo comparativo dos resultados obtidos com as análises cinemáticas geradas pelas marcações efetuadas nas imagens produzidas pelo televisionamento dos furos com os resultados apresentados em BVP-Engenharia (2004, 2008 e 20012). As Tabelas 5.2 e 5.3 trazem as comparações. A Tabela 5.2 retrata as análises e os principais resultados da Mina Gongo Soco e a Tabela 5.3 os principais resultados da Mina do Tamanduá.

Tabela 5.2 - Análise comparativa entre resultados OPTV e BVP (entre parenteses com a segunda maior probabilidade), Mina Gongo Soco

FURO	DOMÍNIO	TALUDE	ANGULO DE ATRITO	TIPO DE RUPTURA - OPTV	TIPO DE RUPTURA - BVP - Engenharia		
GSO00023	Domínio C	135/60	25	Cunha	Planar		
			35	Tombamento	Planar		
		180/60	25	Tombamento	Planar e Cunha		
			35	Tombamento	Planar e Cunha		
		220/60	25	Cunha	Cunha		
			35	Cunha	Cunha		
GSO00025	Domínio B	020/60	25	Tombamento	Sem Possibilidades		
			35	Tombamento	Sem Possibilidades		
		150/60	25	Tombamento (Planar e Cunha)	Planar e Cunha		
			35	Tombamento (Planar e Cunha)	Planar		
		GSO00027	Domínio A	295/60	25	Tombamento	Sem Possibilidades
					35	Tombamento	Sem Possibilidades
350/60	25			Tombamento	Tombamento		
	35			Tombamento	Tombamento		

Nota-se que a maioria das rupturas apresentadas na análise realizada com a OPTV indicaram para a possibilidade de tombamento. Esta diferença entre resultados pode levar a uma conclusão precipitada de que os resultados apresentados pela análise de campo e a análise de dados gerados pela sonda podem não ser compatíveis.

Comparando os estereogramas gerados em BVP - Engenharia (2008) com as respectivas estruturas principais e os estereogramas gerados pela análise de dados do OPTV pode-se notar uma semelhança visual entre os estereogramas. A quantidade de dados adquiridos em BVP-Engenharia (2008) para a realização de suas análises foi de mais de 1300 pontos, definindo assim quais são as estruturas principais da Mina Gongo Soco. No furo GSOFG00023 conseguiu-se com a OPTV, contabilizando todos os tipos de estruturas, um total de 86 marcações; para o furo GSOFG00025 um total 101 marcações e, para o furo GSOFG00027, um total de 14 marcações.

Mesmo que não seja possível diferenciar os tipos de estruturas marcadas nas imagens geradas pelo OPTV, pode-se sim afirmar que estas estruturas estão compreendidas nas estruturas principais, pela comparação entre estereogramas.

Pode-se perceber na Figura 5.31 como a soma das marcações dos três furos em apenas um estereograma revela uma grande semelhança com as estruturas principais apontadas em BVP-Engenharia (2012), em especial com a *Dip Direction* da foliação. Conforme frisado anteriormente, não é possível discernir entre as estruturas Bandamento e Foliação nas imagens de OPTV, mas pode-se afirmar que as estruturas demarcadas nas imagens tendem a indicar diretamente a presença e continuidade das estruturas principais no interior dos taludes.

Figura 5.31 - A esquerda o estereograma mostrando os dados obtidos pelo OPTV e a direita as duas estruturas principais na Mina Gongo Soco

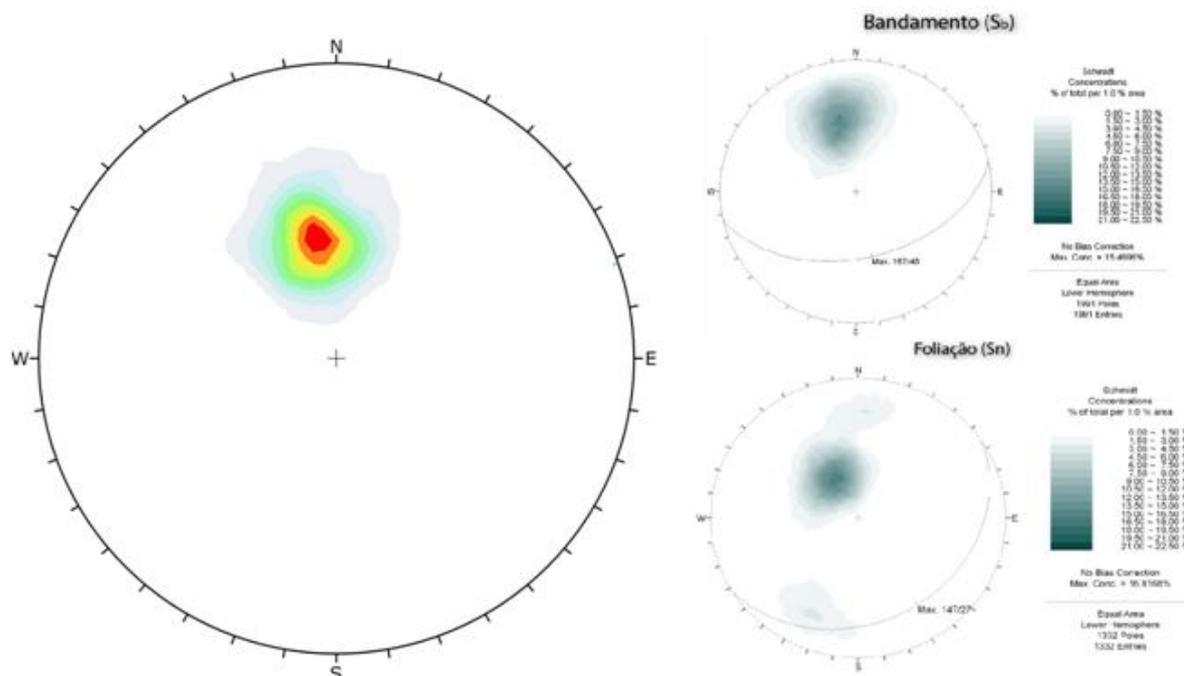


Tabela 5.3 - Análise comparativa entre resultados OPTV e relatório BVP: possibilidades de rupturas para cada talude no Domínio Oeste (entre parenteses com a segunda maior probabilidade), Subdomínio Itabirito Friável.

Talude	BVP-Engenharia	OPTV - FUROS 22 E 69
14	Sem possibilidades	Tombamento
15	Sem possibilidades	Tombamento
19	Planar e Cunha (duas possibilidades para cada)	Cunha
20	Planar e Cunha	Tombamento (Cunha)
21	Cunha (duas possibilidades)	Tombamento
23	Cunha (duas possibilidades)	Tombamento (Cunha)
26	Planar e Cunha (duas possibilidades para cada)	Tombamento (Cunha)
30	Planar e Cunha (duas possibilidades para cada)	Tombamento (Cunha)

Percebe-se que a maioria das rupturas apresentadas pela análise realizada com a OPTV apontaram uma possibilidade de tombamento, mesmo que em quase

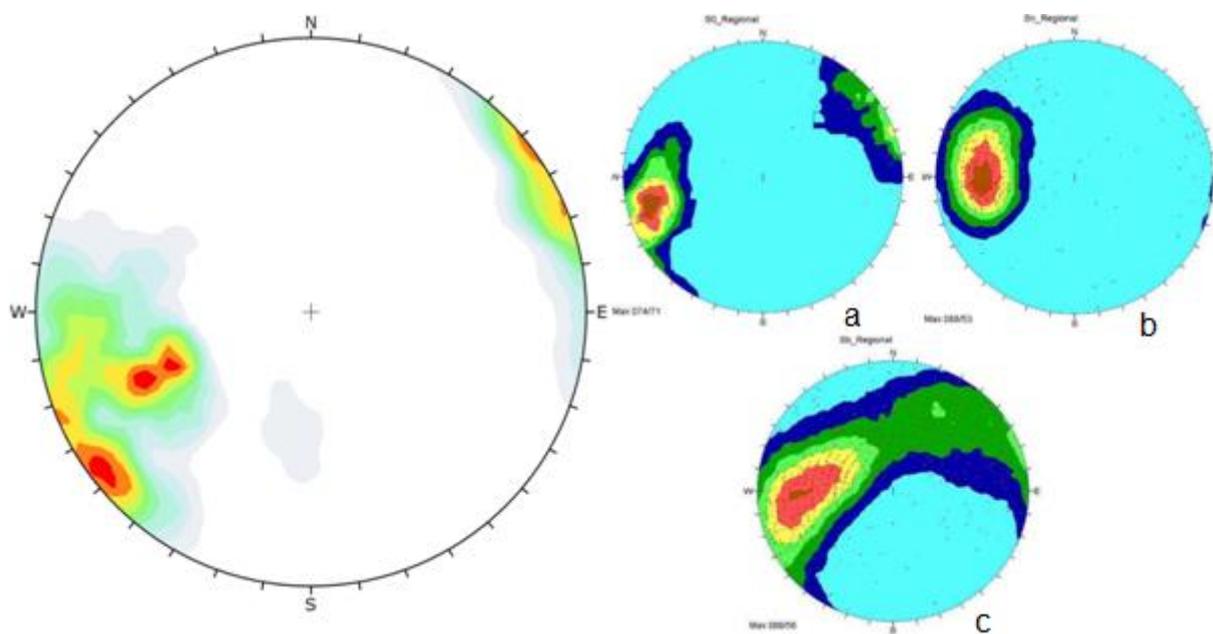
todos os casos a possibilidade de ruptura em Cunha também possa ser levada em consideração, se aproximando assim das possibilidades apresentadas por BVP-Engenharia (2004). Esta diferença entre resultados pode levar a uma conclusão precipitada de que os resultados apresentados pela análise de campo e a análise de dados gerados pela sonda podem não ser compatíveis.

Como proposto para a Mina Gongo Soco, ao se comparar os estereogramas gerados em BVP-Engenharia (2008) com as respectivas estruturas principais e os estereogramas gerados pela análise de dados do OPTV, para a Mina do Tamanduá, nota-se uma boa semelhança visual entre os estereogramas. A quantidade de dados adquiridos em BVP-Engenharia (2012) para a realização de suas análises foi de mais de 1500 pontos, definindo assim quais são as estruturas principais da Mina do Tamanduá. No furo TAMFD00022 conseguiu-se com a OPTV, contabilizando todos os tipos de estruturas, um total de 31 marcações e para o furo TAMFD00069 um total de 71 marcações.

Mesmo que não seja possível diferenciar os tipos de estruturas marcadas nas imagens geradas pelo OPTV, pode-se sim afirmar que estas marcações estão compreendidas nas estruturas principais, pela comparação entre estereogramas.

Pode-se perceber na figura 5.32 como a soma das marcações dos dois furos em apenas um estereograma revela algumas semelhanças com as estruturas principais apontadas em BVP-Engenharia (2004 e 2012), em especial com a *Dip/Dip Direction* do acamadamento. Como frisado anteriormente não é possível discernir entre as estruturas (Acamadamento (S_0), Bandamento (S_b) e Foliação(S_n)) nas imagens de OPTV, mas pode-se afirmar que as estruturas demarcadas nas imagens podem indicar diretamente a presença e continuidade das estruturas principais no interior dos taludes. Ainda, pode-se perceber como as marcações assinaladas em BVP-Engenharia (2012) para o Bandamento (S_b) são abrangentes (círculo inferior), enquanto que se nota uma forte semelhança entre o acamadamento e as estruturas demarcadas na imagem gerada pelo OPTV.

Figura 5.32 - A esquerda o estereograma mostrando os dados obtidos pelo OPTV e a direita as três estruturas principais na Mina do Tamanduá (a - Acamadamento, b - Foliação, c - Bandamento Principal)



6. CONCLUSÕES

Nesta dissertação procurou-se demonstrar a aplicabilidade do *Optical Televiewer*, com relação às imagens coletadas em áreas de mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero (MG). Nas situações analisadas (minas do Quadrilátero Ferrífero), conseguiu-se êxito em confirmar o *Optical Televiewer* como uma ferramenta que pode potencializar as informações geológico-geotécnicas disponíveis.

Tendo em vista os três questionamentos básicos considerados nos objetivos desta dissertação (tópico 1.1) e as demais análises efetuadas ao longo do texto, conclui-se que:

a) Constatou-se que, nos furos analisados, um dos fatores de grande influência na qualidade da imagem foi a velocidade de aquisição. Este problema foi apontado no anexo A, onde mostra-se o efeito de redução da resolução das imagens à medida que se aumenta a velocidade de aquisição. Constatou-se que, no caso do presente equipamento, a velocidade ideal para o televisionamento é 1m/min (os furos filmados na Mina Gongo Soco foram realizados a 2m/min, em função do tempo exíguo disponível para a realização do trabalho). Na Mina do Tamanduá, as filmagens foram realizadas a 1m/min; conseqüentemente, as informações ficaram mais visíveis nas imagens, embora neste caso os furos tenham apresentado resíduos de lama de perfuração nas paredes, a qual poderia ter sido eliminada pela equipe de sondagem efetuando-se uma lavagem final com água limpa. Outro ponto de discussão são as possíveis influências de materiais com alta susceptibilidade magnética sobre as imagens. Observando-se o fato de que a sonda OPTV utiliza magnetômetros para marcar seu geoposicionamento, a presença de material magnético pode influenciar neste posicionamento e gerar distorções nas imagens produzidas. Durante a aquisição e processamento de dados verificaram-se poucas situações de distorção. Como está evidenciado no Capítulo 5, não se encontrou materiais com susceptibilidade suficiente para produzir distorções nas imagens a ponto de as distorções interferirem nas medidas de dip/dip direction.

b) Na comparação com Oliveira *et al.* (2014) e Oliveira (2015), obteve-se sucesso na identificação de descontinuidades e veios. Bandamentos e veios são facilmente identificáveis (p.ex. na Figura 3.11, apresentando um veio localizado no

furo GSOFG00023, ou na Figura 3.32, onde tem-se a identificação de fraturas e bandamentos). No furo GSOFG00023 (Mina Gongo Soco), verifica-se um dos grandes trunfos do uso da OPTV, mostrando uma descontinuidade não identificada nos testemunhos devido à fragmentação das amostras durante a sondagem. Conseguiu-se também identificar descontinuidades verticais não visíveis nos testemunhos, como por exemplo na Figura 3.3 (furo TAMFD00022, Mina do Tamanduá) e na Figura 3.29 (furo TAMFD00069, Mina do Tamanduá). A percepção de quão mais íntegras as litologias sondadas se apresentam no televisionamento é bastante válida. Entretanto, observa-se que não é aconselhável confiar em um RQD calculado diretamente a partir da imagem gerada pelo OPTV, devido ao fato de que na imagem o maciço ainda não apresenta o alívio de tensões, que é fator crucial para um maior fraturamento observado em testemunhos. Com relação ao parâmetro rugosidade das descontinuidades, observou-se neste estudo apenas duas classes (liso ou rugoso), não sendo possível avançar neste aspecto, tendo em vista as dificuldades apontadas no Capítulo 3.

c) Pode-se afirmar que é possível retirar informações úteis sobre a geologia estrutural e aspectos geotécnicos de um maciço rochoso. A partir disso, reiterou-se o potencial da OPTV como uma ferramenta de apoio, mas não um substituto para a sondagem testemunhada, consistindo em um importante aliado na obtenção de informações não vistas em testemunhos. É importante ressaltar também o benefício oferecido pelo OPTV em termos do posicionamento de estruturas geológicas. Fazendo um tratamento cuidadoso das imagens, pode-se posicionar as estruturas com mais segurança que a sondagem orientada. O azimute de descontinuidades e outras estruturas ficam mais próximas do valor verdadeiro quando estimadas por OPTV (com erro estimado de apenas 4°), enquanto que para a sondagem orientada este valor pode chegar a até 16° . Desta forma, é totalmente viável a produção de estereogramas com as estruturas marcadas nas imagens, os quais terão grande semelhança com estereogramas gerados a partir de levantamentos de campo (em superfície) ou sondagens orientadas, conforme apresentado no capítulo 5 através das imagens 5.31 e 5.32, formando assim uma confiável base de dados.

Embora o uso do televisionamento de furos introduza alguns cuidados operacionais que tendem a tornar mais lenta a atividade de sondagem (p.ex. limpeza do furo, tratamento do fluido com floculante, etc.), acredita-se que a utilização do

OPTV pode ser valiosa na aquisição de informações geológico-geotécnicas em empreendimentos de mineração no Quadrilátero Ferrífero.

Finalmente, vale repetir o que se encontra registrado em diversas referências utilizadas ao longo deste estudo (*p.ex. Baillot, 2012 e Blake, 2015*) quanto ao uso combinado de perfuração roto-percussiva e televisionamento: trata-se de uma combinação que pode gerar significativa economia no custo das campanhas de investigação geológico-geotécnicas de maciços rochosos.

Pode-se imaginar, em trabalhos futuros, um uso combinado das tecnologias de *televiwer* acústica e de filmagem, para uma maior abrangência de informações, tanto na capacidade de observação de feições dos furos de sondagem preenchidos com fluidos opacos quanto na extração de parâmetros geomecânicos das litologias estudadas.

7. REFERÊNCIAS

BAILLOT, R. T., **Televisonamento 360° das Paredes de Furos de Sondagem**, Empresa Alphageos, Divulgação Técnica, 2012

BAILLOT, R.T., Colas, R., Barton, N., Abrahão, R. e Ribeiro Júnior, A. **Comparing 360° Televising of Drill Hole Walls with Core Logging**. Proc. International Site Investigation Conf, Portugal. 2004.

BLAKE, J.R., **Application of borehole imagery in iron ore: examples from Mount Whaleback**, Western Australia. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B), VOL 119, NO 3. 2010.

BVP-Engenharia, Mina Gongo Soco – VALE, **Mapeamento Lito-Estrutural e Geomecânico da Mina Gongo Soco**, Setembro de 2008.

BVP-Engenharia, Mina do Tamanduá - VALE, **Mapemaento Litoestrutural e Geomecânico**, Nova Lima - MG, 2004.

BVP- Engenharia, **Avaliação Geotécnica da Geometria dos Taludes das Cavas Finais das Minas DIFL, Avaliação Geotécnica da Cava Final da Mina Tamanduá**, Outubro de 2012.

COLLIER, H, RIDDER MICHAEL, **Utilization of Borehole Televiewer in Fracture Analysis**, Abilene Christian University, Welenco, Inc., 1993

COSTA, R.T., **Análise de Dados de Cargabilidade, Resistividade Elétrica e Susceptibilidade Magnética na Mina do Brucutu, MG**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 113p. . 2007.

Chung M.C., Hsu S.M., Ku C.Y., Tan C.H., Chi S.Y.; **Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc.**, Taipei, Taiwan. 2008

DEARING, J., **Environmental Magnetic Susceptibility: A Guide to Using Bartington MS2 System**. 1999.

FREDRICK, F., Nguyen, T., Seymour, C., Dempers, G., **Geotechnical data from optical and acoustic televiewer surveys**. The AusIMM Bulletin – Journal of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, n.5, October. 2014.

GWYNN, X.P.; BROWN, M.C.; MOHR, P.J.; **Combined use of Tradicional Core Logging and Televiewer Imaging for Pratical Geotechnical data Collection**, SRK Consulting (UK) LTD, United Kingdom, September 2013.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS – ISRM. **Suggested methods for the quantitative description of rock masses**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics abstracts*, vol 15, n6, p319-368, 1978.

LIBARDI, D. M. Q. S., SALVADORETTI P., ALMEIDA T. GASPER G. O., POOTER E., **Relatório LPM/VALE – Aplicação de Perfilagem Geofísica em Minério de Ferro**, Depto de Engenharia de Minas, UFRGS, 2016

MAH, Christopher W. e Wyllie Duncan C., **Rock slope engineering: civil and mining**—4th ed, Capítulos 3, 4 e 5; 2004.

MILLOY, Sophie F., McLean Katie e McNamara David D., **Comparing Borehole Televiewer Logs with Continuous Core: An Example from New Zealand**, Proceedings World Geothermal Congress, Australia, 2015

NETO, Sérgio Eustáquio, **Avaliação minero-geoambiental da mina de Gongo Soco para fins de descomissionamento**: [manuscrito] propostas / Sérgio Eustáquio Neto. xxii, 202f.: il., color.; grafs.; tabs.; mapas. 2008.

OLIVEIRA, Daniela Garroux Gonçalves de, **Televisionamento óptico de sondagens - proposta metodológica para execução e suas aplicações em obras subterrâneas**, **Dissertação de Mestrado**- IGc/USP, São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, D. G. G., MONTEIRO, M. D., MASSONI, F. ROCHA, H. C. **Televisionamento de Furos de Sondagens nos Estudos do Metrô de São Paulo – Proposta Metodológica para Execução e Análise**, Revista Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental, Brasil, 2014.

ROBERTSON GEOLLOGING, **Optv User Manuel**, 2014

THOMAS, R.D.H.; NEILSEN, J.M.; WILSON, H.F.; LAMB,P.; **Structural Interpretation from Televiewers Surveys**, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, 2015

VAN HEERDEN, Grant, **Geotechnical factors affecting high- and low-wall stability in opencast coal mines – report number 2004-0175**.Johannesburg. 2004.

8. ANEXOS

Anexo A: TESTES DE CONTROLE DO OPTV

Durante o período de aquisição de dados surgiu a dúvida sobre a confiabilidade dos dados oferecidos pelo televisionamento. Para confirmar as informações fornecidas pelo OPTV, a equipe de trabalho realizou alguns testes com equipamento. Através destes testes foi possível analisar os seguintes pontos:

- Inclinação do furo de sondagem;
- Posição terrestre da sonda fornecida pelo magnetômetro;
- Melhor velocidade para a realização da perfilagem;
- Posição das fraturas;
- Mergulho e direção de mergulho das fraturas.

Os testes foram realizados com dois arranjos diferentes. No primeiro arranjo foi utilizado um cano de PVC, de 5m de comprimento, coberto por papel pardo (evitar luz do sol), formando um plano inclinado, tentando mimetizar um furo de sondagem com inclinação inicial de $37,6^\circ$, conforme a Figura A.1. No segundo arranjo cortou-se 1 metro do o cano de 5 metros, utilizando assim um cano de 4m de comprimento, posicionado de forma vertical, conforme ilustrado na Figura A.2.

Figura A.1 e A.2 - À esquerda, o primeiro arranjo de testes, com o cano inclinado; à direita, o segundo arranjo, com o cano na vertical.

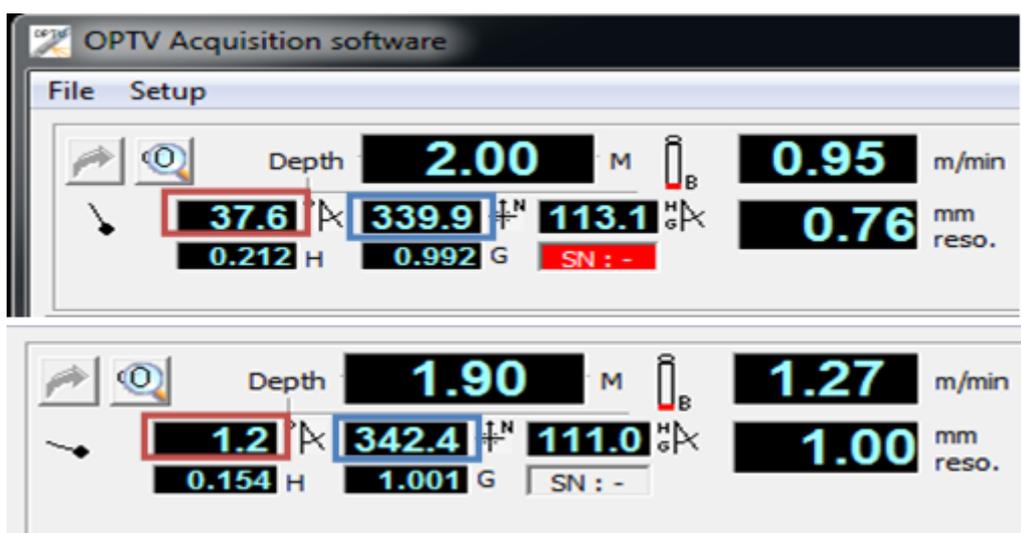


A.1. Inclinação do Furo de Sondagem e Localização Terrestre da Sonda.

No primeiro arranjo a inclinação do cano e a posição terrestre da boca do cano foram de $37,6^\circ$, para que estas fossem comparadas a inclinação e localização indicadas no programa de aquisição de dados. A inclinação foi pré determinada através de medidas da altura da bancada (aprox. 3,04m), do comprimento do cano (5m) e da distância do topo da bancada até a posição final do cano (aprox. 3,96m), como um triângulo retângulo. Através de trigonometria foi determinado angulo de inclinação em que o cano deveria estar. As variações apresentadas no angulo de inclinação da câmera durante a análise se devem ao envergamento do cano proporcionado pelo peso da sonda em seu interior.

O segundo arranjo, com o cano na vertical, foi verificado se o posicionamento terrestre indicado no software de aquisição de imagens é o correto, já que no primeiro arranjo há uma variação deste posicionamento devido à inclinação do furo, podendo-se constatar (como na Figura A.3) a concordância com o inicialmente proposto. Para esta análise foi utilizada uma bússola de mão para se verificar o posicionamento do nosso 'furo' no globo terrestre

Figura A.3 - Imagens do software de aquisição; acima tem-se a comprovação da inclinação (em vermelho) concordando com o proposto. Em azul tem-se o posicionamento terrestre da sonda, em ambos os casos tem-se a concordância ao que foi medido pela bússola de mão.



A.2. Velocidade ideal para execução da perfilagem OPTV

Foram realizados testes com duas velocidades de descida diferentes (1m/min e 2m/min) para que as imagens geradas fossem comparadas (Figura A.4). Assim, conseguiu-se fazer a análise de qual a melhor velocidade para a realização da perfilagem. No mesmo cano de PVC foram feitas pequenas marcações que representassem as fraturas de um maciço.

Confirmou-se que a melhor velocidade para a aquisição de dados, que é 1m/min, gerando melhores imagens e possibilitando uma melhor análise dos dados. À velocidades de 1m/min conseguimos imagens com maior definição e com mais detalhes. Percebe-se que quando colocadas as imagens lado a lado, a esquerda perfilado com velocidade de 2m/min e a direita perfilado com velocidade de 1m/min, e colocadas em uma escala 1m:2m, a imagem gerada a 2m/min se torna pixelada perdendo a definição dos pequenos furos feitos no cano, enquanto que a imagem gerada a 1m/min continua bastante definido.

Pode-se concluir que a melhor definição da imagem pode, certamente, nos fornecer uma quantidade maior de informações a serem aproveitadas para que se possa melhor usufruir da metodologia proposta na revista da ABGE.

Figura A.4 - Comparação entre aquisições com diferentes velocidades. À esquerda com a velocidade próxima a 2m/min e à direita com 1m/min. Percebe-se como as marcações feitas no cano aparecem em cada uma das velocidades propostas.

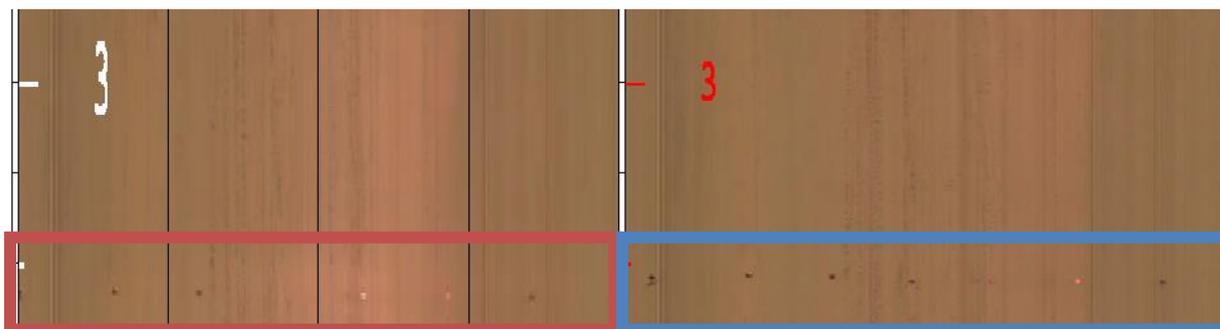


Figura A.5 - Percebe-se como a imagem gerada a 2m/min se torna mais pixelada (esquerda) que a imagem gerada a 1m/min (direita)

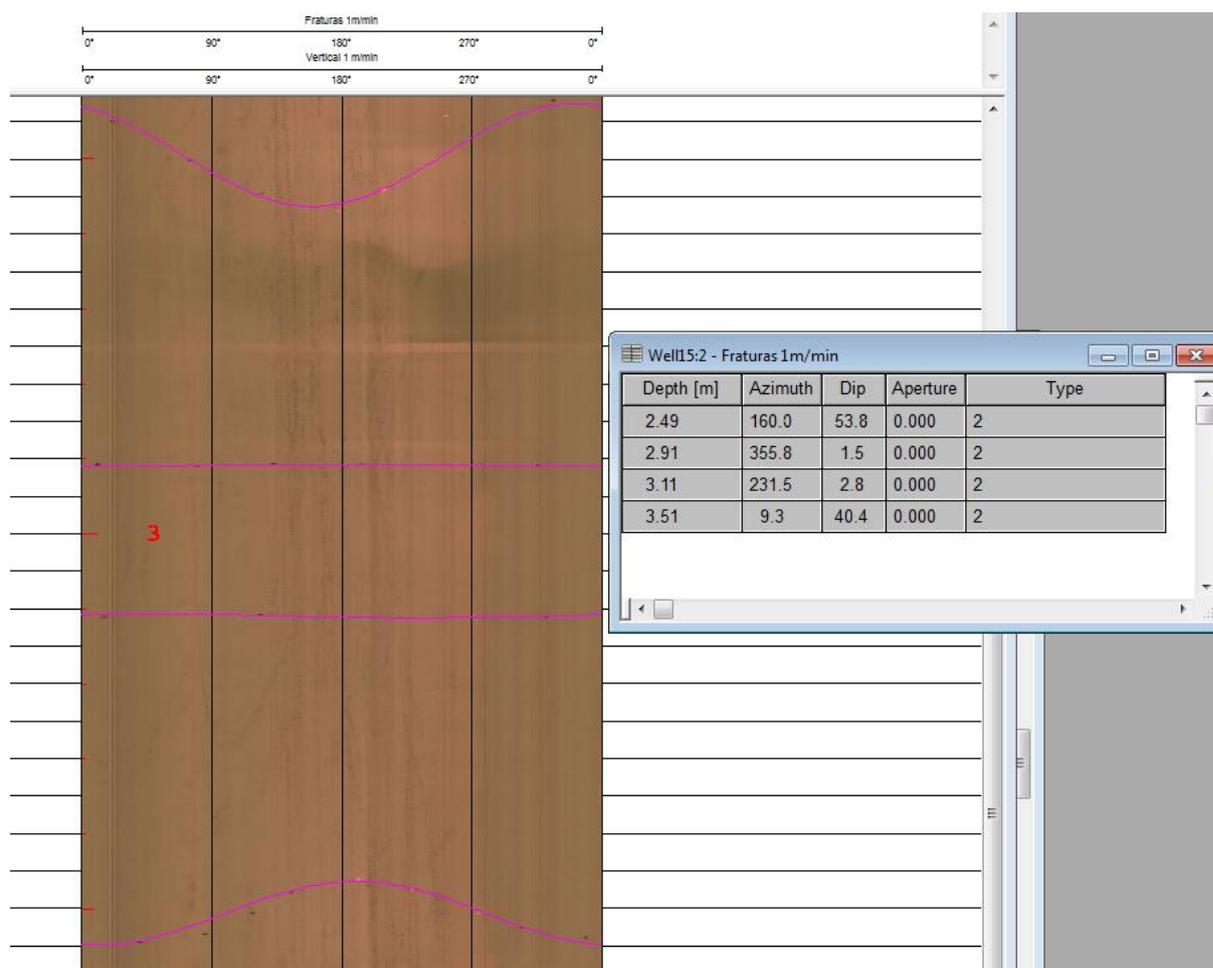


A.3 Posição, Mergulho e Direção das Fraturas

No cano de PVC utilizado para a realização dos testes foram feitas pequenas marcas para que estas representassem fraturas. Isto foi feito que se pudesse comparar as marcações efetuadas no *software* WellCad e verificar a acuracidade destas marcações.

Neste arranjo também foi analisada a direção de mergulho das fraturas, controlando-se a posição destas 'fraturas' em relação à posição terrestre. Essas 'fraturas' tiveram seus mergulhos pré-determinados para que estes fossem comparados aos mergulhos indicados pelo *software* de análise de imagens (Wellcad). Foi verificado se o posicionamento apontado pelo *software* era condizente com o pré-determinado no cano, para isso foram feitas marcações praticamente verticais e com posicionamento controlado.

Figura A.6 - Fraturas pré-determinadas e suas marcações no *software* WellCad.



A primeira fratura havia sido colocada em uma profundidade de 2,5 metros e com um mergulho de aproximadamente 50° , a segunda e a terceira fraturas eram praticamente horizontais sendo posicionadas em 2,9 metros e 3,10 metros, com 20cm de distância entre elas. A quarta fratura possui um mergulho melhor, de aproximadamente 40° , e estava posicionada em 3,5 metros. Conforme pode-se observar na Figura 35, os dados obtidos pelos software foram bastante precisos, com um erro aproximado de 1cm no posicionamento das fraturas e o erro no mergulho das fraturas variando entre $1,5^\circ$ e 4° . Pode-se assumir que os erros apresentados nos mergulhos das fraturas são diretamente relacionados a construção do perfil de fraturas, efetuado sobre a imagem, realizado pelo técnico responsável pelas análises.

A.4. Correções necessárias nas imagens (profundidade, declinação magnética, distorções por alta susceptibilidade magnética, etc.)

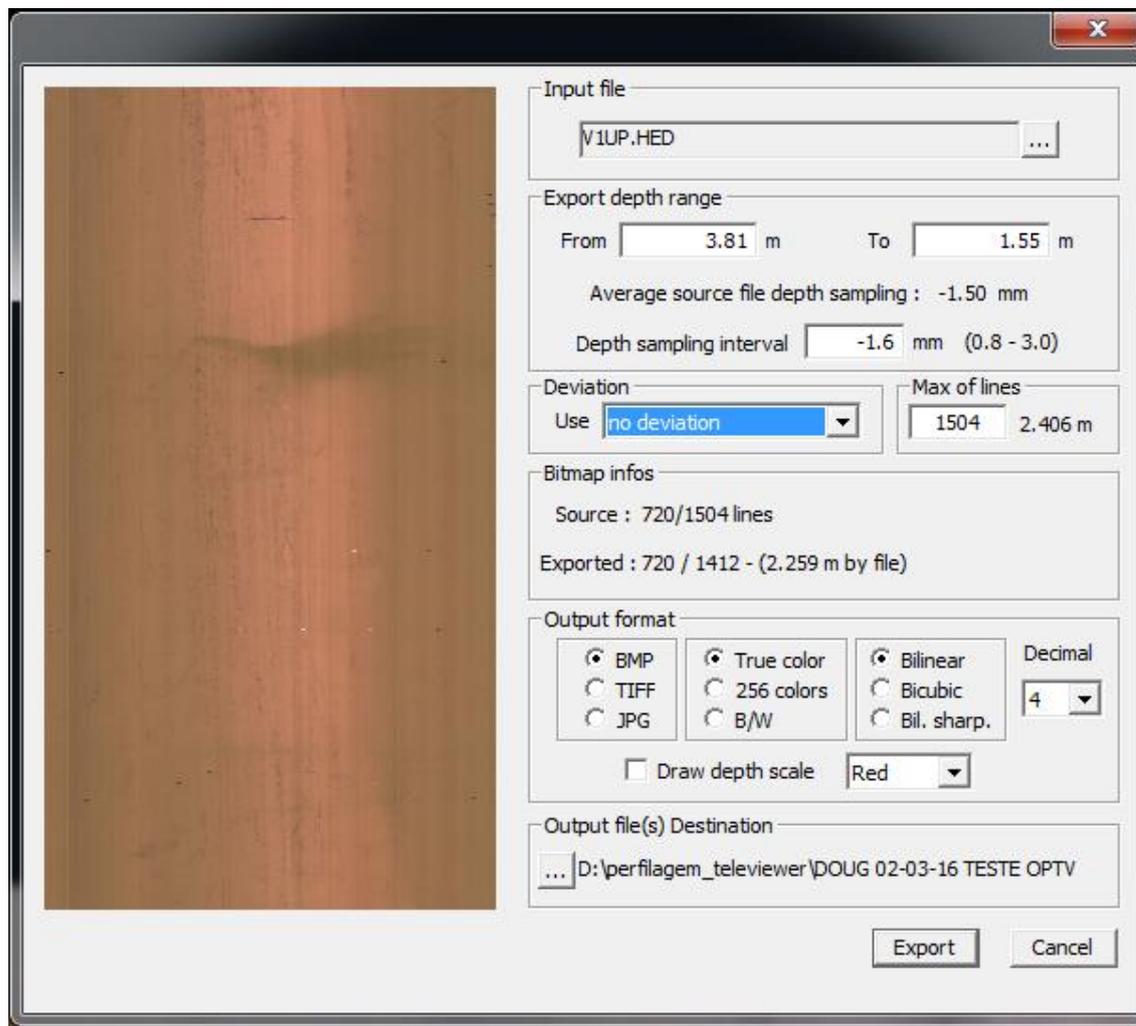
A chave para o controle de qualidade é garantir a precisão do sistema de orientação do televiewer. Na presença de materiais magnéticos (magnetita, p.ex.) no furo de sondagem, as leituras de azimute da ferramenta são influenciadas. Isto pode ser resolvido da seguinte forma:

- Orientando a imagem com o topo do furo em furos inclinados, utilizando os dados recolhidos pelo inclinômetro do televiewer e, em seguida, usando informações auxiliares a partir de uma ferramenta de desvio furo (giroscópio ou maxibore), que não é afetado por materiais magnéticos para girar a imagem para o norte;
- Usando os dados adquiridos pelos medidores de inclinação para corrigir os dados magnéticos. Os dados magnéticos podem então ser utilizados para orientar a imagem para norte. Tipicamente, esta técnica pode ser aplicada quando seções curtas do furo são afetadas por materiais magnéticos.

A respeito de problemas relacionados com anomalias magnéticas na orientação do OPTV aplicado em minério de ferro, Blake (2010) descreve uma metodologia desenvolvida para estes casos, que envolve o uso das imagens com e sem orientação magnética e também a perfilagem de susceptibilidade magnética como indicador de zonas potencialmente problemáticas para o sistema de orientação convencional do OPTV. O perfil de susceptibilidade magnética é parte das ferramentas usadas em campo pela equipe de perfilagem da UFRGS, para que identifiquemos as zonas com alto teor magnético.

O OPTV, na aquisição das imagens, permanece sempre com seu magnetômetro ligado, mas também fornece a opção de exportar imagens para análise sem a orientação magnética (Figura A.7). Esta opção gera uma imagem sem orientação, ou seja, uma imagem livre de possíveis perturbações magnéticas causadas pelas litologias.

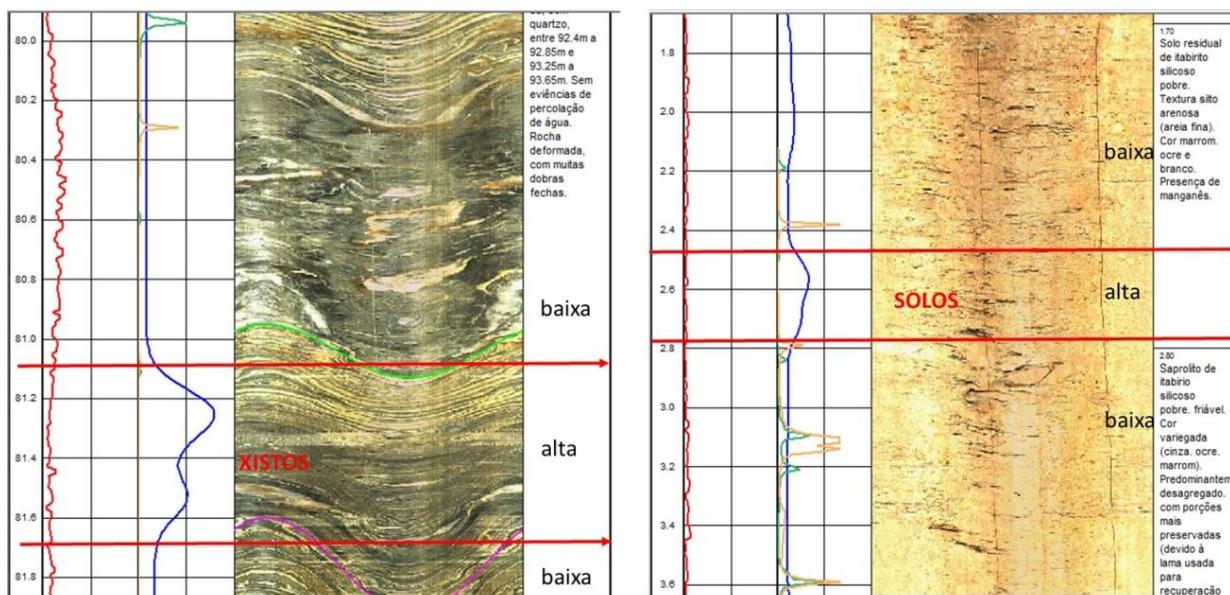
Figura A.7 - A indicação “NO DEVIATION” é usada para gerar uma imagem sem orientação magnética.



Durante as atividades de campo também era utilizada a sonda de Susceptibilidade Magnética. O propósito de utilização desta sonda era encontrar possíveis locais de interferência no televisionamento dos furos de sondagem.

Para os furos de sondagem em Gongo Soco, verificou-se a presença de zonas com maior susceptibilidade (trechos com comprimento de alguns centímetros até 1m), não havendo distribuição contínua de susceptibilidade que possa marcar uma litologia específica, ou seja, a susceptibilidade apareceu de modo esporádico, não servindo para delimitar contatos litológicos. No exemplo da Figura A.8, a susceptibilidade ocorre como uma anomalia de alto valor tanto nos solos quanto nos xistos. Ou seja, ela evidencia apenas a presença de magnetita dispersa no furo.

Figura A.8 – Contrastes de susceptibilidade magnética em solos e xistos no furo GSOFG00025.



Como visto na imagem acima, poucos locais apontavam presença de material magnético, desta forma decidiu-se por seguir o modo apresentado na Figura A.8, onde eram geradas imagens sem orientação magnética e em seguida fazia-se a correção das marcações efetuadas utilizando o arquivo gerado pelo OPTV que continha as informações de posicionamento e orientação magnéticas do furo.

Ferramentas de sondagem Geofísica, tais como Gama Natural, Indução Magnética, Gama Espectral e Susceptibilidade Magnética também foram usadas durante o trabalho de campo. Estas ferramentas auxiliaram na identificação de materiais em cada um dos furos, conforme relatório entregue a Vale em 2016.

Anexo B: Conceitos para Análise Cinemática

B.1. Formação de Fraturamento:

Geologia estrutural refere-se à ocorrência de descontinuidades naturais na rocha tais como bandamento, juntas e falhas. Algumas propriedades das descontinuidades relativas a estabilidade incluem orientação, persistência, rugosidade e preenchimento. A significância das descontinuidades é que elas são planos de enfraquecimento muito mais fortes, rochas intactas tendem a fraturar preferencialmente ao longo destas superfícies. Estas descontinuidades podem influenciar diretamente a estabilidade dos taludes. A Análise Cinemática vem ao encontro destes conceitos como uma possibilidade de identificar os possíveis modos de falhas que podem existir nos taludes de uma mina a céu aberto.

Todas as rochas sofrem com modificações ao longo de milhares de anos, afloramentos, sobreposições e sucessivos soterramentos impõe as rochas, em diferentes profundidades, diferentes exposições a calor e pressões sofridas pelas camadas superiores.

Esses processos resultam normalmente em uma tensão na rocha muito superior a força que esta é capaz de aguentar, causando um fraturamento na rocha e formando juntas e falhas.

A tensão vertical, que é a principal tensão σ_1 é igual a força peso sobre as camadas de rocha, é dado por:

$$\sigma_1 = \gamma_1 H \quad (1)$$

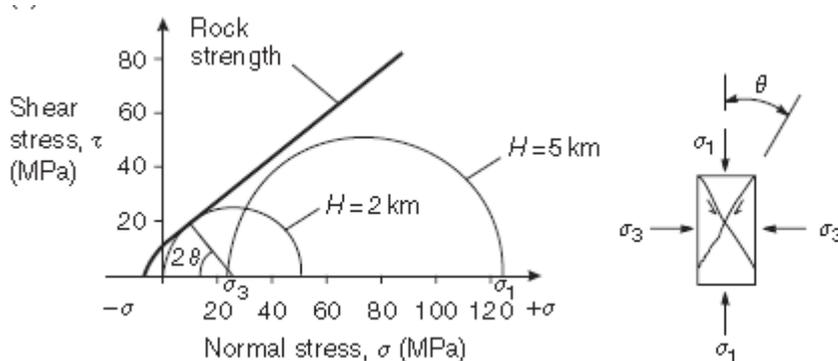
onde γ_1 é a unidade de peso da rocha e H é a profundidade de soterramento. A tensão horizontal, que é uma tensão secundária σ_3 , também aumenta com a profundidade de soterramento devido ao efeito da razão de Poisson μ , em qualquer aumento de temperatura. Em uma situação ideal σ_3 é relacionado a σ_1 da seguinte forma:

$$\sigma_3 = \left(\frac{\mu}{1-\mu} \sigma_1 \right) + \left(\frac{E}{1-\mu} \varepsilon \Delta T \right) \quad (2),$$

onde E é o módulo de deformação da rocha, ε é o coeficiente de expansão térmica e ΔT é a variação da temperatura. A primeira parte da equação mostra a tensão horizontal devido a carga gravitacional. A segunda parte se refere a liberdade de crescimento da rocha, caso não esteja livre para expandir ocorrerá um crescimento da temperatura da rocha tanto quanto da pressão a que esta é submetida.

A definição destas tensões pode auxiliar na identificação de possíveis situações que possam levar ao fraturamento de uma rocha. Um dos principais métodos para identificar as condições que podem ou não causar essas fraturas é o diagrama de Mohr. A força da rocha é mostrada em uma linha reta e as tensões σ_1 e σ_3 são representadas por círculos em diferentes profundidades.

Figura B.1 - A esquerda, Diagrama de Mohr mostrando as condições para o fraturamento na rocha e a direita, inclinação das junções com respeito a direção da tensão. (retirada de Wyllie and Mah, 2005)



Para condições onde σ_3 é baixo ou tensionado, falhas ocorrerão mais rapidamente comparada a condições onde, em maiores profundidades, tanto σ_1 quanto σ_3 são compressivos.

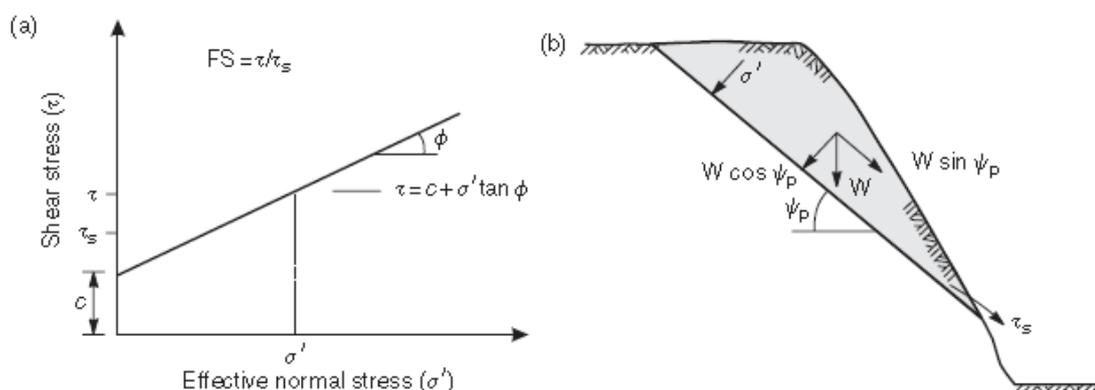
B.2 Análise do Equilíbrio de Taludes:

A estabilidade de rochas em declive depende da tensão cisalhante ao longo da superfície de escorregamento. Para todos os tipos de falhas cisalhantes pode-se assumir a rocha como um material do tipo Mohr-Coulomb em que a tensão cisalhante é expressa em termos da coesão c e o do ângulo de atrito φ . Para a superfície de escorregamento onde existe uma tensão normal efetiva σ' agindo, a força cisalhante τ apresentada nessa superfície é dada por:

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi \quad (3).$$

A tensão normal efetiva é a diferença entre a tensão devido ao peso da rocha acima do plano deslizando e a elevação devido a qualquer pressão de água agindo na superfície.

Figura B.2 - a) Diagrama de Mohr mostrando a tensão cisalhante (reta) como sendo função da coesão c (onde o eixo vertical é cortado) e do ângulo de atrito (inclinação da reta). b) decomposição do peso W em suas componentes paralela e perpendicular ao plano de escorregamento (dip ψ_p) (retirada de Wyllie and Mah, 2005)



Na Figura B.2 em b) apresenta-se uma declividade contendo uma junta mergulhando pra fora da face e formando um bloco deslizando. O fator de segurança para este bloco envolve a resolução das forças agindo na superfície de deslizamento em componentes paralela e perpendicular a essa superfície. Sabendo que A é área desta superfície, ψ_p é o *dip* da superfície deslizante, e W é o peso do bloco sobre a superfície, tem-se as tensões:

$$\sigma = \frac{W \cos \psi_p}{A} \text{ - como sendo a tensão normal (4),}$$

$$\tau_s = \frac{W \sin \psi_p}{A} \text{ - como sendo a tensão cisalhante (5),}$$

Substituindo (4) e (5) na equação inicial (3), tem-se:

$$\tau = c + \frac{W \cos \psi_p \tan \phi}{A} \text{ (6),}$$

$$\tau_s A = W \sin \psi_p \text{ (7),}$$

$$\tau A = cA + W \cos \psi_p \tan \phi \text{ (8).}$$

Na equação 5 define-se a resultante das forças que pressionam o plano deslizando para baixo é chamada de "força motora" ($\tau_s A$), enquanto que o termo após a igualdade na equação 6 define as forças cisalhantes agindo para cima, no sentido de resistir ao deslizamento do plano, chamada de "força resistiva". A estabilidade do bloco pode ser quantificada como a razão entre as forças resistivas e motoras, o que é neste caso chamado de Fator de Segurança (FS). Tal que:

$$FS = \frac{cA + W \cos \psi_p \tan \phi}{W \sin \psi_p} \text{ (9)}$$

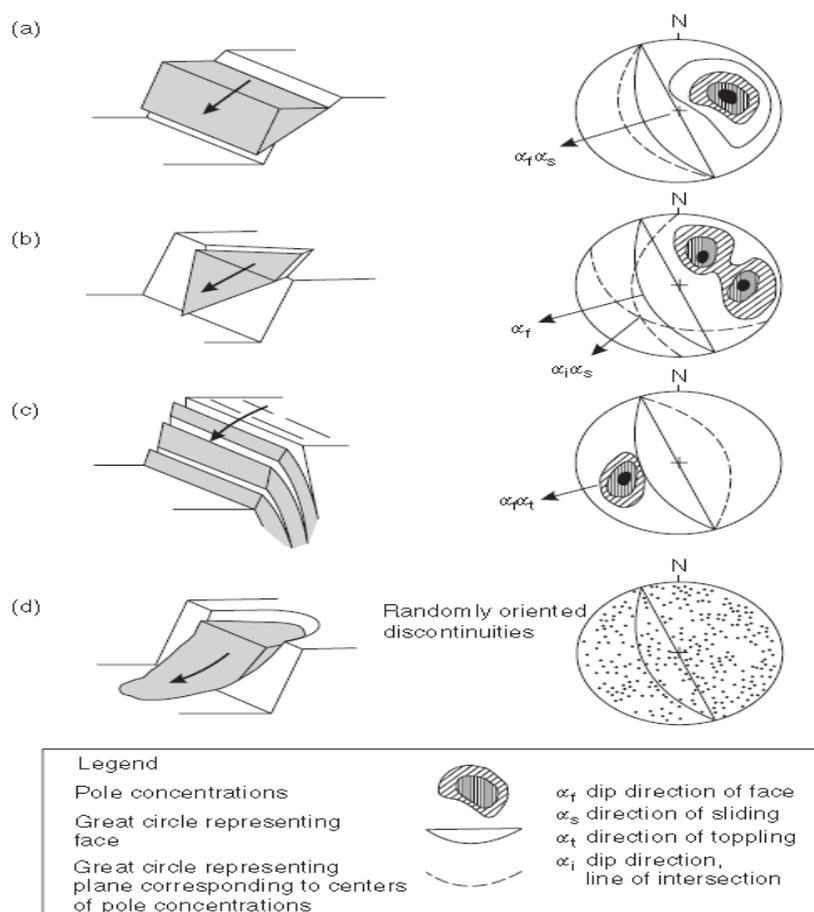
Quando observa-se um fator de coesão próximo de zero, pode-se reduzir a equação do FS para a seguinte forma:

$$FS = \frac{W \cos \psi_p \tan \varphi}{W \sin \psi_p} \quad (10)$$

Sendo assim o $FS=1$ quando $\psi_p = \varphi$, para uma superfície seca e limpa sem nenhum suporte instalado, o bloco irá deslizar quando o dip e o ângulo de atrito forem iguais e essa estabilidade é independente do tamanho do bloco deslizando. Isto é, o bloco está em uma condição limítrofe, está em seu "equilíbrio limite", quando as forças motoras são exatamente iguais as forças resistivas.

B.3 Tipos de Rupturas

Figura B.3 - Principais tipos de falhas de blocos em encostas: a) falha planar em rocha contendo articulações persistentes mergulhando para fora da inclinação face, e em paralelo à face; b) falha em cunha em duas descontinuidades que se cruzam; c) ruptura em tombamento na rocha forte contendo descontinuidades mergulhando de forma bem ingreme na face do talude; e d) falha circular no preenchimento da rocha, rocha muito fraca ou rocha bastante fraturada com descontinuidades orientadas aleatoriamente. (retirada de Wyllie and Mah, 2005)



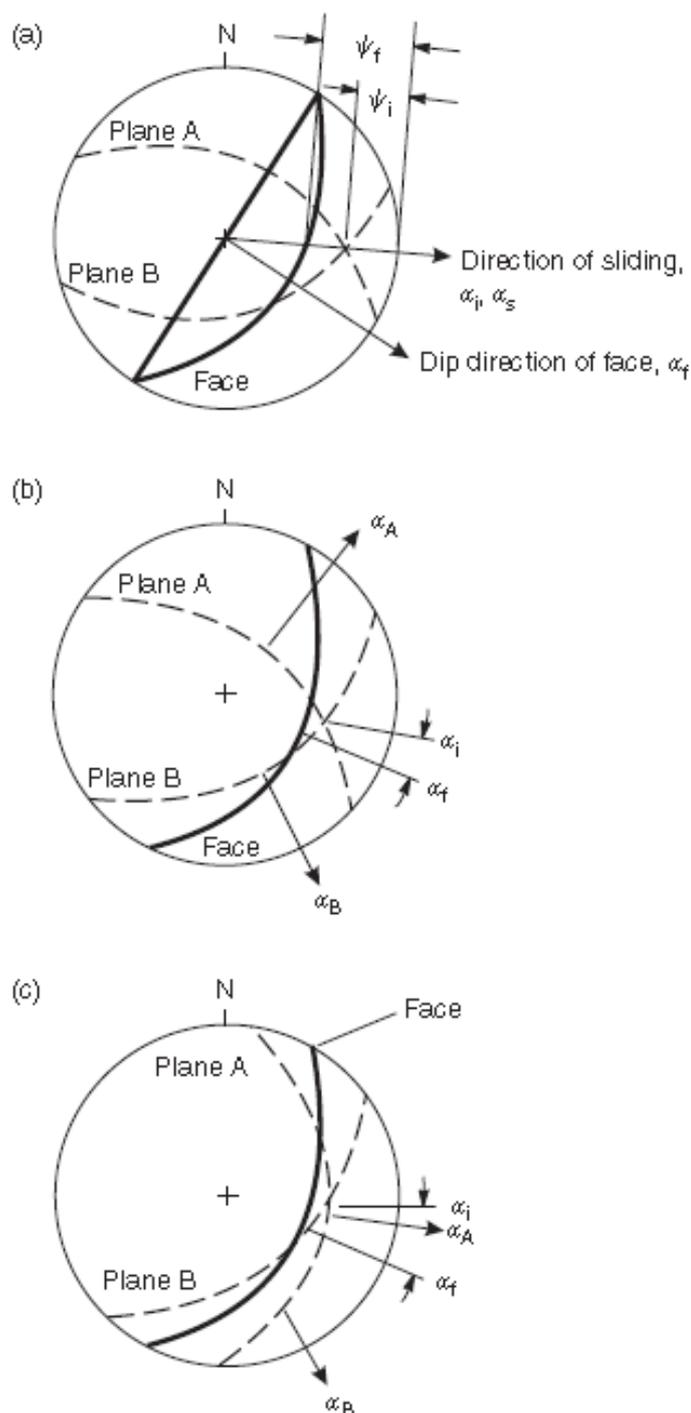
Segundo Oliveira (2015), esta é a última parte da utilização dos dados oferecidos pelo televisionamento de furos. Juntamente com as imagens do testemunho virtual e as tabelas indicando os parâmetros de caracterização, apresentados na seção 4, Oliveira (2015) sugere o tratamento estrutural destes dados em estereograma de Schmidt-Lambert, e estende este tratamento para uma análise cinemática. Nesta análise foi utilizado o *software Dips 6.0 (RockScience)*.

Oliveira (2015) propõe que os dados, nestes diagramas, devem ser tratados em separado com relação ao tipo de estrutura, fraturas, falhas, foliação. Nesta dissertação, devido à dificuldade apresentada na marcação de estruturas em alguns furos e a pouca quantidade de fraturas em outros, todas as estruturas foram colocadas na análise de dados.

Uma vez identificado o tipo de ruptura de bloco no estereograma, o mesmo diagrama também pode ser utilizado para examinar a direção na qual um bloco irá deslizar e dar uma indicação das condições de estabilidade. Uma aplicação da análise cinemática é mostrada na Figura B.4 onde dois planos formam uma cunha que deslizou. Se a face do declive tivesse sido menos íngreme do que a linha de intersecção entre os dois planos, ou tivesse uma direção que ficasse 90° da direção atual, então embora os dois planos formem uma cunha eles não seriam capazes de deslizar. Este relação entre a direção na qual o bloco de rocha deslizará e a orientação da face é muito aparente no estereograma.

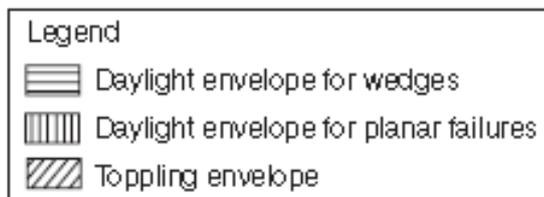
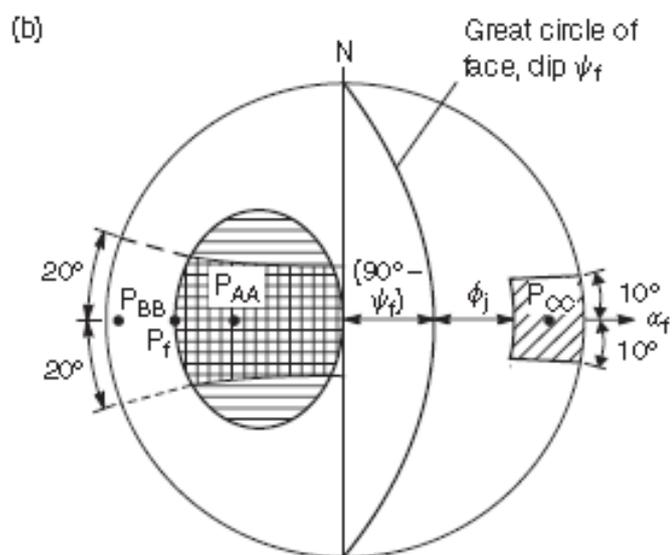
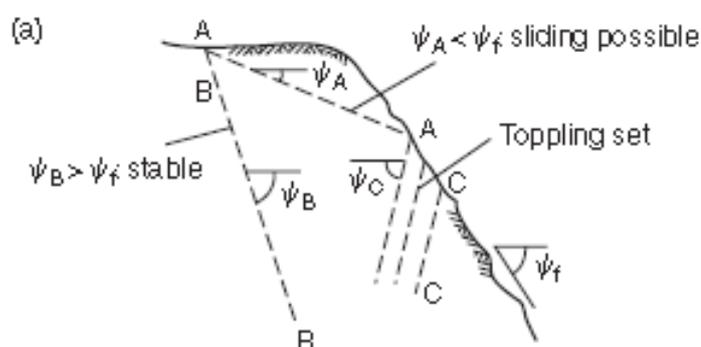
Figura B.4 - Identificação de falhas de plano e de cunha no estereograma: a) deslizando ao longo da linha de intersecção dos planos A e B é possível onde o mergulho desta linha é inferior a inclinação do talude, medido na direção de deslizamento, ou seja, $\psi < \psi_f$; b) a ruptura em cunha ocorre ao longo da linha de intersecção (direção de mergulho α_i) no talude com direção de mergulho α_f porque as direções de mergulho dos planos A e B (α_A e α_B) estão fora do ângulo incluído entre α_i e α_f ; c) plano de falha ocorre no plano A (direção de inclinação α_A) no talude com direção inclinação α_f porque a direção de mergulho dos planos A está dentro do ângulo incluído entre α_i e α_f . (retirada de Wyllie and

Mah, 2005)



Um exemplo de análise cinemática é mostrado em Figura B.5 onde um declive rochoso contém três conjuntos de descontinuidades. O potencial para essas descontinuidades em resultar em falhas de declive depende do seu *dip* (*mergulho*) e *dip direction* (*direção de mergulho*) em relação à face; condições estabilidade podem ser estudadas no estereograma.

Figure B.5 - Análise cinemática de blocos: (a) tipos de descontinuidades em um talude; e (b) envelopes com áreas iguais no estereograma. (retirada de Wyllie and Mah, 2005)



B.3.1 Ruptura Planar (*Plane Failure*)

Na Figura B.5 (a), um bloco planar potencialmente instável é formado pelo plano AA, que mergulha em um ângulo menos inclinado do que a face ($\psi_A < \psi_f$) e é dito "*daylight*" na face do talude. No entanto, deslizar não é possível no plano BB que mergulha mais íngreme que a face do talude ($\psi_B > \psi_f$) e *daylight*. Similarmente, a descontinuidade CC mergulha pra dentro do talude e o deslizamento não pode ocorrer nesses planos, embora ruptura de topo é possível. Os polos da face do talude e os conjuntos de descontinuidade (símbolo P) são traçados na Figura 50 (b), assumindo que todas as descontinuidades são paralelas à face. A posição destes polos em relação ao talude mostra que os polos de todos os planos que são *daylight* são potencialmente instáveis, estão dentro do talude.

O *dip direction* dos conjuntos de descontinuidade também influenciam a estabilidade. O deslizamento do plano não é possível e o *dip direction* da descontinuidade difere da *dip direction* da face por mais que cerca de 20° . Ou seja, o bloco será estável se $|\alpha_A - \alpha_f| > 20^\circ$, porque nestas condições haverá uma espessura crescente de rocha em uma das extremidades do bloco, que terá força para resistir à ruptura. No estereograma esta restrição no *dip direction* dos planos é mostrado por duas linhas definindo *dip direction* de $(\alpha_f + 20^\circ)$ e $(\alpha_f - 20^\circ)$. Estas duas linhas designam os limites laterais do envelope *daylight* na Figura B.5 (b).

B.3.2 Ruptura em Cunha (*Wedge Failure*)

Análise cinemática de falhas em cunha (Figura B.3 (b)) pode ser realizada de forma semelhante a de rupturas planares. Neste caso, o polo da linha de intersecção das duas descontinuidades é traçado no estereograma e a ruptura é possível se os polos criam a região *daylight* sobre a face do talude, isto é ($\psi_i < \psi_f$). A direção de deslizamento em cunhas é, cinematicamente, menos restritiva do que a de rupturas planares porque existem dois planos para formar superfícies soltas. Um envelope *daylight* para linha de intersecção, conforme ilustrado na Figura B.5 (b), é maior do que o envelope para rupturas planares. O envelope *daylight* da cunha é a localização onde todos os polos que representam linhas de intersecção cujo as *dip directions* estão no plano dentro da face do talude.

B.3.3 Ruptura de Topo (*Toppling Failure*)

Para que ocorra um tombamento, o *dip direction* das descontinuidades que mergulham na face devem estar dentro de cerca de 10° da *dip direction* da face de modo que uma série de placas são formadas paralelamente à cara. Além disso, o mergulho dos planos deve ser íngreme suficiente para o deslizamento entre camadas ocorrer. Se as faces das camadas têm um ângulo de fricção ϕ_j , então o deslizamento ocorrerá somente se a direção da compressão aplicada for em um ângulo maior que ϕ_j com o Normal das camadas. A direção da tensão principal no corte é paralela à face do corte (ângulo de inclinação ψ_f), assim deslizamento entre camadas e o tombamento ocorrerá em planos com dip ψ_p quando as seguintes condições forem satisfeitas (Wyllie and Mah, 2005):

$$(90^\circ - \psi_f) + \phi_j < \psi_p \quad (11)$$

Estas condições na direção mergulho e mergulho De aviões que podem desenvolver falhas de Definido na Figura B.5 (b). O envelope que define a orientação destes planos situa-se no lado oposto do estereograma a partir dos outros envelopes deslizantes.

B.3.4 Cone de Fricção

Determinado a partir dos envelopes se um bloco no talude é cinematicamente admissível, também é possível examinar as condições de estabilidade no mesmo estereograma. Esta análise é levando em conta que a resistência ao cisalhamento da superfície de deslizamento compreende somente fricção e a coesão é zero. Considere um bloco em repouso um plano inclinado com um ângulo de atrito de ϕ entre o bloco e o plano (Figura B.6 (a)). Para uma condição de repouso, o vetor de força normal ao plano deve estar dentro do cone de fricção. Quando a única força que atua sobre o bloco é a gravidade, o polo para o plano está na mesma direção que o normal Força, de modo que o bloco será estável quando o polo está dentro do círculo de atrito.

Os envelopes na Figura B.6 (b) mostram a Posições possíveis de pólos que podem formar blocos instáveis. Envelopes foram desenhados para ângulos de inclinação de 60° e 80° , que mostram que o risco de instabilidade aumenta à medida que a inclinação fica mais íngreme como indicado pelos envelopes maiores para O

declive mais acentuado. Além disso, os envelopes se tornam maiores Como o ângulo de atrito diminui. Os envelopes Também indicam que, para a carga de gravidade simples Condição, a instabilidade só ocorrerá em um Gama de condições geométricas.

Figura B.6 - Combinadas, análise cinemática e análise de estabilidade usando o conceito de conce de fricção: a) cone de fricção em relação ao bloco em repouso em um plano inclinado; e b) projeção do cone de fricção sobreposto aos envelopes (retirada de Wyllie and Mah, 2005)

