



UFOP - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
NUGEO - NÚCLEO DE GEOTECNIA DA ESCOLA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA



INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA - GEOTÉCNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS
(Ênfase em Sondagem)

NUGEO

**AVALIAÇÃO DE TRAJETÓRIA DE FUROS DE
SONDAGEM EM MACIÇOS ROCHOSOS
NA MINA DE S11D – CARAJÁS PA**

ESCOLA DE MINAS / UFOP

Orientador: Dr. José Agnelo Soares (UFOP / UFCG)

Mestrando: Igor Brito Costa Rosa (UFOP / Vale S.A.)

**BELO HORIZONTE – MG
SETEMBRO DE 2015**



UFOP - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
NUGEO - NÚCLEO DE GEOTECNIA DA ESCOLA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA



**AVALIAÇÃO DE TRAJETÓRIA DE FUROS DE
SONDAGEM EM MACIÇOS ROCHOSOS
NA MINA DE S11D – CARAJÁS PA**

**BELO HORIZONTE – MG
SETEMBRO DE 2015**

AVALIAÇÃO DE TRAJETÓRIA DE FUROS DE SONDAGEM EM MACIÇOS ROCHOSOS NA MINA DE S11D – CARAJÁS PA.

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do **Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto**, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**, área de concentração em *Investigação Geológica / Geotécnica em Maciços Rochosos*.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 16 de setembro de 2015, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. José Agnelo Soares (Orientador / UFOP)



Prof.^a Dr. Maria Silva Carvalho Barbosa (UFOP)



Dr. Marco Antônio Braga (Vale S.A.)

R788a Rosa, Igor Brito Costa.

Avaliação de trajetória de furos de sondagem em maciços rochosos na Mina de S11D - Carajás, PA [manuscrito] / Igor Brito Costa Rosa. - 2015.
123f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. José Agnelo Soares.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Nucleo de Geotecnia. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica.

Área de Concentração: Investigação Geológica.

1. Carajas, Serra dos (PA). 2. Minério de ferro. 3. Diamante - Minas e mineração. I. Soares, José Agnelo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.24(811.5)

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

*“A ausência da evidência não
significa evidência da ausência.”*

Carl Sagan

DEDICATÓRIA

À memória de avó materna *Celina Avelina de B. Lima* (1926 - 2009).

AGRADECIMENTOS

A **Deus**,

Ao meu pai **Helinaldo Rosa** e minha querida mãe **Helena Costa** pelo exemplo de vida e dedicação em minha formação pessoal e profissional.

A minha amada esposa **Francisca Rosa** e meu querido filho **Pedro Rosa** pela alegria dos dias compartilhados ☺.

Aos gerentes **Henry Galbiatti** e **Dr. Marco A. Braga** pela oportunidade e confiança depositada para elaboração desse trabalho.

Ao meu gestor imediato **Roberto Carvalho**, por acreditar, nortear e proporcionar as oportunidades para que pudesse chegar até aqui.

Ao **Dr. Agnelo Soares** meu professor e orientador, pelo apoio e total atenção dedicada nessa jornada tão importante para minha vida.

Aos colegas e amigos do mestrado **Oswaldo Costa**, **Humberto Gomes** e **Samir Khaoule**, pelos incentivos e alegrias a cada disciplina conquistada.

Aos Geofísicos **Dr. Dionísio Carlos** e **Wanderson Pereira**, aos Geólogos **Fernando Prezotti** e **Luiz Costa** e ao Técnico de Mina e Geologia **Delvan Souza**, pelo norteamento, conselhos e apoio ao longo deste trabalho.

Aos colegas de trabalho **Auricilene Cardoso**, **Danilo Assis**, **Jenilson Silva**, **João Paulo**, **José Ademilton**, **Patrícia Silva** e **Paulo Lima** pelo apoio técnico e atenção dedicada ao longo desse trabalho.

Aos colegas de trabalho da **Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos** e professores do **Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica** da UFOP.

RESUMO

A medida de desvio de furo de sondagem diamantada testemunhada é uma atividade que pode ser realizada dentro do processo de uma pesquisa mineral, especificamente dentro da etapa de perfuração de rocha. Entender e quantificar a trajetória dos furos de sondagem se faz tão importante quanto o levantamento topográfico realizado em superfície. Apesar do conceito para obtenção das leituras das medidas de desvio ser relativamente simples, existem diversas variáveis operacionais, geológicas e financeiras que contribuem na obtenção, precisão, acurácia e confiabilidade dos resultados esperados. Para entender o comportamento da trajetória e desvio dos furos de sondagem foram correlacionados os dados de programação de furos, levantamentos topográficos, acompanhamentos de campo das operações de perfuração, descrições geológica e geotécnica e perfilagem geofísica de furos de sondagem, totalizando 165 furos equivalentes a 45.798,20 metros divididos em 5 campanhas no corpo D da mina de Serra Sul, denominada como S11D. Os fatores operacionais e geológicos contribuem de forma significativa tanto no comportamento da trajetória dos furos de sondagem como na precisão entre as leituras A e B. 92% da metragem executada, relacionada aos 165 furos analisados, apresentou nível de precisão entre as leituras A e B na ordem de 1% e 75% das leituras tiveram média de desvio menor que 2,7%.

Palavras chaves: Medida de desvio, trajetória de furo, sondagem rotativa diamantada testemunhada, minério de ferro, Província Mineral de Carajás, Serra Sul S11D.

ABSTRACT

The deviation measure of rotary core drilling is an activity that can be performed within the process of a mineral exploration, specifically in rock drilling step. Understand and quantify the trajectory of rotary core drilling becomes as important as the survey conducted on surface. Although the concept to obtain the readings of diversion measures is relatively simple, there are several operational, geological and financial variables that contribute to the achievement, precision, accuracy and viability of the expected results. To understand the behavior of the trajectory of rotary core drilling were correlated programming data, survey data, field accompaniments of drilling, geological and geotechnical descriptions and geophysical profiling of rotary core drilling, totaling 165 holes equivalent to 45,798.20 meters divided into 5 campaigns in the D body the mine Serra Sul, known as S11D. Operational and geological factors contribute significantly both in the trajectory of rotary core drilling and in accuracy of the readings A and B. 92% of the drilling, related to 165 holes analyzed, showed levels of accuracy readings between A and B in the range 1% and 75% of the readings had an average deviation lower than 2.7%.

Key- words: Deviation measure, hole trajectory, rotary core drilling, iron ore, Província Mineral de Carajás, Serra Sul S11D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização da mina de Serra Sul (S11D).....	2
Figura 1.2 – Escritório Central, Sistema Norte, mina de N4.....	3
Figura 1.3 – Mina do Cauê, Minas Gerais, 1943.....	4
Figura 2.1 – Geocronologia do Cráton Amazônico e localização da PMC.....	8
Figura 2.2 – Mapa geológico da Província Mineral de Carajás.....	9
Figura 2.3 – Estratigrafia local da jazida de Serra Sul.....	10
Figura 2.4 – Mapa da geologia simplificada da jazida de S11 (Corpos A, B, C e D).	12
Figura 2.5 – Amostra de testemunho de sondagem de canga estrutural.....	13
Figura 2.6 – Amostra de testemunho de sondagem de canga química.....	14
Figura 2.7 – Amostra de testemunho de sondagem de máfica semidecomposta.....	14
Figura 2.8 – Amostra de testemunho de sondagem de máfica sã.....	15
Figura 2.9 – Amostra de testemunho de hematita friável na caixa.....	16
Figura 2.10 – Amostra de testemunho de sondagem de hematita compacta.....	17
Figura 2.11 – Amostra de testemunho de sondagem de jaspilito.....	18
Figura 3.1 – Praça de sondagem em área de pesquisa (furo inclinado).....	20
Figura 3.2 – Praça de sondagem em área de operação de mina (furo vertical).....	20
Figura 3.3 – Haste de perfuração método convencional e <i>wireline</i>	21
Figura 3.4 – Modelo de Sonda Mecânica – Mac Sonda.....	22
Figura 3.5 – Modelo de Sonda Hidráulica – Tipo CS14.....	22
Figura 3.6 – Composição de intervalos com base nas manobras perfuradas.....	24
Figura 3.7 – Circuito do fluxo de bombeamento.....	25
Figura 3.8 – Conjunto da coluna de perfuração.....	26
Figura 3.9 – Hastes de perfuração série H.....	26
Figura 3.10 – Coroa de diamantes. (Coroa HQ-2 extra lateral S-2, Geosol).....	27
Figura 3.11 – Coroa de vídia. (Coroa de Pastilha com degrau HQ-2, Geosol).....	27
Figura 3.12 – Poço de circulação do fluído de perfuração.....	28
Figura 3.13 – Programação de sondagem corpo D Serra Sul campanha 2014.....	29
Figura 3.14 – Levantamento topográfico com GPS Geodésico.....	30
Figura 3.15 – Abertura de acesso com trator.....	31

Figura 3.16 – Levantamento Aerogramétrico de Carajás – PA.....	33
Figura 3.17 – Perfilagem Geofísica em furos de sondagem.....	33
Figura 3.18 – Ciclo das informações no processo de GIS.....	34
Figura 3.19 – Telas do ArcMap, ArcCatalog e ArcToolbox.....	35
Figura 3.20 – Visão aérea de um trecho do platô de Serra Sul.....	40
Figura 3.21 – Linhas topográficas da mina de SSD.....	40
Figura 4.1 – Perfil de um furo de sondagem projetado e executado.....	41
Figura 4.2 – Evolução do custo por leitura a cada 3 metros nos últimos 5 anos.....	42
Figura 4.3 – Imagem ilustrativa do equipamento D01.....	44
Figura 4.4 – Imagem ilustrativa do equipamento M01.....	44
Figura 4.5 – Imagem ilustrativa do equipamento R01.....	45
Figura 4.6 – Fluxo resumido do processo para realização das medidas de desvio.....	46
Figura 4.7 – Posicionamento espacial X, Y e Z.....	47
Figura 4.8 – Esquema ilustrativo das projeções 3D.....	48
Figura 4.9 – Projeção tridimensional de um furo de sondagem.....	48
Figura 4.10 – Exemplo de uma seção geológica vertical.....	49
Figura 4.11 – Verticalização de um furo programado inclinado.....	50
Figura 4.12 – Limite de validação entre leituras A e B.....	51
Figura 4.13 – Instalação de uma sonda com DIP 75° / Az 90°.....	52
Figura 4.14 – Instalação de sonda, DIP 90° / Az NA.....	53
Figura 4.15 – Instalação de sonda, DIP 90° / Az NA em área de operação de mina.....	53
Figura 4.16 – Instalação de sonda, DIP 75° / 90° em área de operação de mina.....	54
Figura 4.17 – Instalação de sonda, DIP 90° / Az NA em área de pesquisa.....	54
Figura 4.18 – Instalação de sonda, DIP 85° / Az 165° em área de pesquisa.....	55
Figura 4.19 – Ângulo de curvatura do ferramental de perfuração.....	56
Figura 4.20 – Desvio de furo inclinado considerando o peso da coluna de perfuração.....	57
Figura 4.21 – Leituras realizadas no sentido descendente.....	58
Figura 4.22 – Leituras realizadas no sentido ascendente.....	59
Figura 4.23 – Diferença de espaçamento entre leituras medidas.....	61
Figura 4.24 – Método manual de marcação das leituras no cabo de aço.....	61
Figura 4.25 – Método mecânico (contador de cabo).....	62
Figura 4.26 – Centralização da ferramenta no interior do furo de sondagem.....	63

Figura 4.27 – Centralizador danificado.	63
Figura 4.28 – Relação entre precisão e acurácia.	65
Figura 4.29 – Método de validação considerando fatores de acurácia.	67
Figura 4.30 – Execução de medidas com a ferramenta de medida de desvio parada.	68
Figura 4.31 – Pressão d’água no interior do furo.	69
Figura 4.32 – Furo jorrante em função da pressão do nível d’água.	70
Figura 5.1 – Total de leituras realizadas por equipamento.	76
Figura 5.2 – Distribuição de dados por campanha de sondagem.	76
Figura 5.3 – Distribuição de dados por cliente / objetivo do furo de sondagem.	77
Gráfico 5.4 – Total de leituras realizadas por intervalo.	78
Gráfico 5.5 – Metragem executada e leituras realizadas por furos.	79
Gráfico 5.6 – Metragem executada por quantidade de leituras realizadas.	80
Gráfico 5.7 – Integridade das paredes dos furos de sondagem - <i>Caliper</i> (mm).	83
Gráfico 5.8 – Distribuição das leituras de densidade (g/cm ³).	84
Gráfico 5.9 – Distribuição espacial dos furos por equipamentos de medida de desvio.	85
Gráfico 5.10 – Distribuição do número de furo por ângulo de mergulho.	86
Gráfico 5.11 – Distribuição da quantidade de furos por ângulo de direção - Az.	86
Gráfico 5.12– Tempo médio de perfuração por compacidade e integridades das paredes.	87
Gráfico 5.13 – Precisão da leitura por equipamento.	88
Gráfico 5.14 – Precisão entre a 1 ^a e 2 ^a corrida.	89
Gráfico 5.15 – Precisão entre leituras por inclinação.	90
Gráfico 5.16 – Precisão entre leituras por diâmetro.	91
Gráfico 5.17 – Desvio médio por furo de sondagem.	92
Gráfico 5.18 – Desvio máximo por furo de sondagem.	92
Gráfico 5.19 – Desvio por intervalo de perfuração.	93
Gráfico 5.20 – Diferença do ângulo de mergulho entre leituras.	93
Gráfico 5.21 – Desvio por inclinação (furo vertical e inclinado).	94
Gráfico 5.22 – Desvio por diâmetro.	94
Gráfico 5.23 – Desvio por compacidade e hidratação da rocha.	95
Gráfico 5.24 – Desvio por litologia e intervalo de perfuração.	96
Gráfico 5.25 – Desvio por RQD e intervalo de perfuração.	96
Gráfico 5.26 – Desvio por densidade (g/cm).	97

Gráfico 5.27 – Desvio médio em relação às medidas de <i>Caliper</i> (mm) e litologia.	98
Gráfico 5.28 – Distribuição espacial dos desvios dos furos de sondagem.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais diâmetros de perfuração.....	23
Tabela 3.2 – Valores de densidade das principais litologias encontradas em S11D.	37
Tabela 3.3 – Volume de poros e tamanho de partículas em sedimentos.	38
Tabela 4.1 – Principais características por equipamento.....	43
Tabela 4.2 – Validação entre leituras A e B.	66
Tabela 5.1 – PGSond - Programa de Gerenciamento de Sondagem.	72
Tabela 5.2 – Levantamento das medidas de desvio de furo de sondagem.	72
Tabela 5.3 – Acompanhamento das atividades de sondagem me campo.	73
Tabela 5.4 – Descrição geológica de furo de sondagem.....	74
Tabela 5.5 – Descrição geotécnica de furo de sondagem.	74
Tabela 5.6 – Perfilagem geofísica de furo de sondagem.	75
Tabela 5.7 – Metragem e furos executados por equipamentos de medida de desvio.	75
Tabela 5.8 – Percentual de realização com base no diâmetro dos furos executados.....	80
Tabela 5.9 – Percentual de material descrito por litologia, compacidade e hidratação.	81
Tabela 5.10 – Percentual de material descrito relacionado ao RQD e Consistência.	82
Tabela 5.11 – Desvio máximo a cada leitura de 3 m.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS

ϕ	Porosidade da rocha
Az	Ângulo azimutal
CA	Canga
CE	Canga estrutural
CLV	Classificação litológica visual
CM	Canga de minério
CMC	Complexo Minerador de Carajás
CQ	Canga química
D^{AB}	Distancia entre as corridas de media de desvio;
DIP	Ângulo de mergulho em relação à superfície
DOCEGEO	Rio Doce Geologia e Mineração S.A.
D^V	Limite aceitável entre as leituras de medida de desvio
Ga	Bilhões de ano
GIS	Sistema de Informação Geográfica
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HC	Hematita compacta
HF	Hematita friável
HMN	Hematita magnesífera
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Proteção e Conservação da Biodiversidade
INA	Indicador de nível de água
ISO	Organização Internacional para Padronização
JP	Jaspilito
JR	Jaspilito rico
Ma	Milhões de ano
MD	Máfica decomposta
Mn	Manganês
MS	Máfica sã

MSD	Máfica semidecomposta
NA	Não aplicável
P_g	Densidade do grão
P_{H2O}	Água natural
PMC	Província Mineral de Carajás
P_{RX}	Fator do controle de densidade da rocha
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
S	Estação ou profundidade da corrida ou profundidade da leitura;
TTG	<i>Tonalíticas-Trondhjemíticas-Granodioríticas</i>

TAXONOMIA^[1]

Taxonomia	Classificação sistemática de assuntos ou termos, utilizada como ferramenta de organização intelectual.
Vale	Empresa mineradora especializada em exploração e produção de minério de ferro, níquel, manganês, cobre, ferro ligas, carvão, fosfatos, potássio, cobalto e metais do grupo da platina.
Acurácia entre leituras	Validação da leitura executada de medida de desvio com base em dados de coordenadas conhecidas.
Azimute	Ângulo de direção do furo de sondagem medido no plano horizontal.
Boletim de sondagem	Documento gerado pela empresa de perfuração e fiscalizado pela empresa demandante ou designada com os dados de perfuração e serviços complementares do furo de sondagem por turno e sonda.
Desvio de furo de sondagem	Distância entre os pontos tridimensionais do furo de sondagem executado em relação ao furo projetado.
DIP	Ângulo de mergulho do furo de sondagem referenciado ao plano horizontal.
Execução de sondagem	Apontamento da produção de sondagem executada.
Fenda	Espaço vazio (sem a presença de litologia) em profundidade no furo de sondagem.
Furo inclinado	Furo com ângulo de inclinação superior -88° e inferior a -2° em relação à superfície (precisão de $\pm 0,2^\circ$).
Furo vertical	Furo com ângulo de inclinação inferior a -88° e próximo a -90° em relação à superfície (precisão de $\pm 0,2^\circ$).
Levantamento topográfico do furo	Levantamento das coordenadas X, Y e Z dos furos de sondagem com base em um ponto fixo na superfície.
Manobra	Metragem executada considerando um intervalo contínuo do tempo de perfuração da rocha ou retirada do testemunho.

^[1] Os termos de taxonomia apresentados acima se referem em especial a este trabalho

Medida de desvio	Levantamento das coordenadas X, Y e Z ou obtenção do ângulo de inclinação, ângulo de direção e metragem percorrida ao longo do furo de sondagem, obedecendo a intervalos de distância percorrida previamente estabelecidos.
Memorial topográfico	Documento que descreve a localização dos marcos topográficos de uma determinada área e sua referência topográfica.
Niples	Pedaço curto de tubo com rosca externa nas duas extremidades, para ligação de tubos.
Perfil construtivo - Piezômetro	Documento elaborado pelo técnico responsável com diretrizes para construção do piezômetro e/ou INA.
Perfilador	Profissional treinado e capacitado, responsável por coordenar e executar as perfilagens nos furos de sondagem.
Perfilagem	Procedimento técnico realizado no interior do furo com o objetivo de obter informações diversas.
Poço de lama	Reservatório montado na praça de sondagem com o objetivo de acondicionar o fluido de perfuração que retorna do furo de sondagem.
Precisão entre leituras	Distanciamento entre uma leitura completa do furo de sondagem e outra leitura completa no mesmo furo. Quanto menor a diferença entre leituras, maior a precisão.
Projeção do furo de sondagem	Trajetória retilínea do furo de sondagem em profundidade considerando os ângulos de inclinação e direção iniciais.
Sondagem	Atividade realizada com auxílio de equipamento de perfuração.
Trajetória de um furo de sondagem	Caminhamento percorrido em profundidade após perfuração.
Xistosidade da rocha	Foliação característica da rocha, segundo uma determinada direção.

LISTA DE ANEXOS

Anexo I. BOLETIM DE SONDAGEM.....	110
Anexo II. IMPLANTAÇÃO DE MARCO TOPOGRÁFICO (Descritivo).....	111
Anexo III. IMPLANTAÇÃO DE MARCO TOPOGRÁFICO (Triangulação).....	112
Anexo IV. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO DE FURO DE SONDAGEM	113
Anexo V. PERFILAGEM – MEDIDA DE DESVIO DE FURO DE SONDAGEM.....	114
Anexo VI. PERFIL GEOLÓGICO DE FURO DE SONDAGEM.....	115
Anexo VII. PERFIL CONSTRUTIVO DE PIEZÔMETRO	116
Anexo VIII. PERFILAGEM GEOFÍSICA DE FURO DE SONDAGEM.....	117
Anexo IX. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE FURO DE SONDAGEM	117
Anexo X. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DE FURO DE SONDAGEM.....	119
Anexo XI. DESCRIÇÃO E CLASSIF. GEOMECÂNICA DE FURO DE SONDAGEM....	120
Anexo XII. PLANO DE AMOSTRAGEM DE FURO DE SONDAGEM	121
Anexo XIII. RESUMO ANÁLISE QUÍMICA.....	122
Anexo XIV. ESCALA DE DESVIO	123

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Localização	2
1.1.1 Características da área de estudo	3
1.2 Resumo histórico da empresa:	4
1.3 Objetivo geral	5
1.4 Objetivo específicos.....	5
1.5 Metodologia utilizada	5
1.6 Estrutura da dissertação	6
CAPÍTULO 2	8
2. GEOLOGIA.....	8
2.1 Geologia regional.....	8
2.2 Geologia local	10
2.2.1 Coberturas recentes.....	11
2.2.2 Formação Águas Claras	11
2.2.3 Rochas intrusivas	11
2.2.4 Grupo Grão Pará	11
2.2.5 Embasamento.....	13
2.2.6 Principais litotipos presentes nos furos de sondagem.....	13
CAPÍTULO 3	19
3. SONDAGEM ROTATIVA DIAMANTADA TESTEMUNHADA	19
3.1 Bomba do circuito do fluido de perfuração	24
3.2 Coluna de perfuração	25
3.3 Fluido de perfuração	28
3.4 Programação de sondagem	29
3.5 Levantamento topográfico	30
3.6 Abertura de acesso e praça de sondagem.....	31
3.7 Mobilização e desmobilização do equipamento de sondagem	31

3.8 Levantamento geofísico	32
3.9 Geoprocessamento	34
3.10 Fatores que influenciam no desempenho da sondagem	36
3.10.1 Litologia	36
3.10.2 Densidade	36
3.10.2.1 Fatores que afetam a densidade em laboratório	37
3.10.3 Porosidade	38
3.10.4 Água natural contida na rocha	38
3.10.5 Condição topográfica	39
CAPÍTULO 4	41
4. MEDIDA DE DESVIO DE FURO DE SONDAGEM	41
4.1 Equipamentos de medida de desvio	42
4.2 Execução das medidas de desvio	45
4.3 Definição do posicionamento das leituras	47
4.4 Instalação da sonda na praça de sondagem	49
4.5 Principais fatores que influenciam o desvio do furo de sondagem	55
4.6 Fatores que influenciam na qualidade das leituras	57
4.6.1 Sentido de realização das leituras	58
4.6.2 Método de marcação entre as leituras	60
4.6.3 Sistema de centralização do equipamento de medida de desvio	62
4.6.4 Tempo de estabilização das leituras	64
4.6.5 Calibração do equipamento	65
4.6.6 Fluido de perfuração	68
4.6.7 Pressão d'água no interior do furo	69
CAPÍTULO 5	71
5. AQUISIÇÃO, ANÁLISE E INTEPRETAÇÃO DOS DADOS	71
5.1 Aquisições dos dados de estudo	71
5.2 Consolidação dos dados de estudo	75
5.3 Análise e interpretação dos dados	84
5.3.1 Precisão entre leituras de medida de desvio	87
5.3.2 Desvio dos furos de sondagem com base em sua trajetória programada	91

CAPÍTULO 6	102
6. CONCLUSÕES	102
6.1 Recomendações e sugestões para trabalhos futuros	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

1. INTRODUÇÃO

Diversas técnicas podem ser utilizadas para caracterização de uma jazida mineral, sendo necessária uma análise prévia e detalhada que considere os aspectos de obtenção, consolidação e tratamento dos dados de interesse. A investigação geológica realizada pela sondagem rotativa diamantada testemunhada é um método que oferece grandes vantagens no processo de pesquisa mineral, sendo possível caracterizar a rocha perfurada de forma direta através dos testemunhos de sondagem, entretanto é um método pontual considerando a área total de estudo (CHIOSSI, 1971).

Quanto menor o espaçamento entre os furos de sondagem maior será o detalhamento e melhor será a caracterização geológica. No processo de pesquisa se torna necessário levar em consideração os aspectos geográficos, finalidade dos agregados, localização do depósito, tipo de transporte proposto, aspectos topográficos entre outros; tais informações devem ser acompanhadas por mapa georreferenciados em escala conveniente ao empreendimento (CHIOSSI, 1971).

Tão importante quanto o posicionamento espacial do furo de sondagem em superfície é entender e quantificar sua trajetória tridimensional ao longo da metragem perfurada. Apesar de ser relativamente acessível levantar as coordenadas X, Y e Z e os ângulos DIP e Az de um furo de sondagem através de cadastramento topográfico em superfície, tal levantamento em profundidade ao longo do furo não dispõe da mesma acessibilidade, sendo necessária a utilização de equipamentos específicos, para os quais não existe modelo perfeito ou preciso, mas apenas modelos compatíveis com as necessidades.

Embora todos os furos de sondagem da mina de S11D desde o ano 1970 até os dias de hoje tenham sido projetados seguindo uma trajetória retilínea, do seu ponto inicial até a metragem prevista, considerando os ângulos de mergulho (DIP) e direção (Az), foi possível medir os

desvios realizados a cada intervalo ao longo da metragem executada através de atividades auxiliares de perfilagem de medida de desvio.

1.1 Localização

A mina de S11D está localizada na porção sudoeste da Província Mineral de Carajás, a cerca de 90 km a sul das minas de ferro em operação do Sistema de Ferrosos Norte, minas N4 e N5. O platô de S11 subdivide-se nos corpos A, B, C e D, sendo este último objeto de estudo (Figura 1.1).

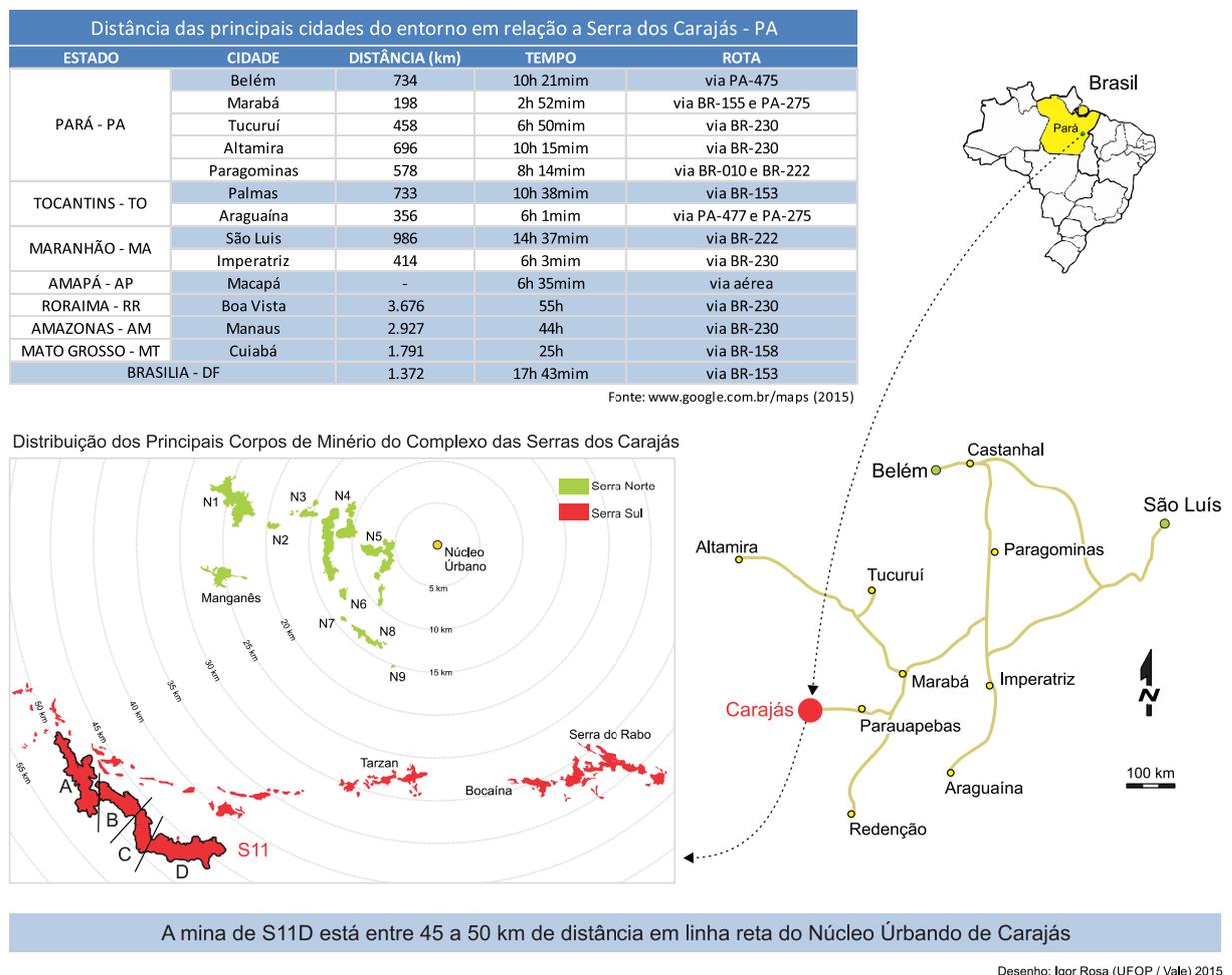


Figura 1.1 – Localização da mina de Serra Sul (S11D).

A mina de S11D possui uma extensão de aproximadamente 8 km de comprimento por 1 km de largura e profundidade conhecida em torno de 600 m com base em furos de sondagem já realizados. O platô é caracterizado com formação ferrífera e de canga laterítica e vegetação

rala que se destacam nas fotos aéreas e imagens de sensoriamento remoto orbital na forma de chapadas (SANTOS, 2008).

1.1.1 Características da área de estudo

O presente trabalho foi realizado nas dependências da empresa Vale S.A. na mina de S11D no decorrer das atividades de Exploração e Pesquisa Mineral de Ferrosos.

As bases de apoio para as atividades de exploração e pesquisa mineral estão localizadas no município de Parauapebas: Escritório Central, Bloco 4, Transporte Leve, mina de N4 (Figura 1.2) e Arquivo de Testemunho de Sondagem, mina de N5, sendo o Arquivo de Testemunho o local onde são centralizados todos os testemunhos de furos de minério de ferro da Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos no Sistema Norte de operação.



Figura 1.2 – Escritório Central, Sistema Norte, mina de N4.

A mina de S11D possui um acampamento de apoio mínimo para as atividades de sondagem realizada nos corpos D e C. As licenças de operação e condicionantes ambientais no tocante às atividades de exploração e pesquisa são em grande parte regidas pelo ICMBio – Instituto Chico Mendes de Proteção e Conservação da Biodiversidade (ICMBio, 2014).

1.2 Resumo histórico da empresa:

A Vale é uma empresa brasileira, criada em 1942 pelo governo para a exploração das minas de ferro na região de Itabira no estado de Minas Gerais (Figura 1.3). Atualmente a Vale é uma empresa privada, de capital aberto, com sede na cidade do Rio de Janeiro - RJ, e com ações negociadas em diversas bolsas de valores (VALE, 2012).



Fonte: Arquivo Interno Vale, Livro História da Vale (2012)

Figura 1.3 – Mina do Cauê, Minas Gerais, 1943.

Ao final de 2013 a Vale contava com 212 mil empregados, entre próprios com contrato de trabalho por tempo indeterminado e terceiros (prestadores de serviço em atividades permanentes e em projetos), além de 475 empregados próprios com contrato por prazo determinado (VALE, 2014a).

O principal negócio da Vale é a mineração, uma atividade essencial para a vida moderna. Embora seu principal objetivo seja a produção de minério de ferro, ela também atua em outros segmentos minerais como níquel, carvão, cobre, fertilizantes, manganês e ferroligas (VALE, 2014b).

1.3 Objetivo geral

Esse trabalho tem como objetivo geral analisar e descrever os principais métodos e variáveis relacionadas às medidas de desvio de furo nas operações de sondagem rotativa diamantada testemunhada na mina de S11D em maciços rochosos.

1.4 Objetivo específicos

Os objetivos específicos desse trabalho estão relacionados à:

- contextualizar o método de medida de desvio de furo no processo da sondagem rotativa diamantada testemunhada;
- descrever a importância da medida de desvio de furo no processo da sondagem rotativa diamantada testemunhada;
- descrever os principais indicadores relacionados às leituras obtidas e metragem realizada nos furos de sondagem;
- descrever a importância da medida de desvio em furos verticais em função da instalação do equipamento de sondagem na praça de operação;
- descrever o comportamento das leituras A e B relacionadas à precisão do equipamento;
- descrever as principais variáveis relacionadas à precisão das leituras A e B com o objetivo de validação dos dados obtidos;
- descrever os principais índices de desvio relacionados aos furos analisados e as principais variáveis relacionadas;

1.5 Metodologia utilizada

Foram analisados 165 furos de sondagem rotativa diamantada testemunhada, totalizando 45.798,20 metros executados realizados na mina de S11D. Os principais dados de perfuração e das atividades relacionadas ao furo de sondagem foram consolidados, analisados e correlacionados a fim de entender e quantificar a interferência das principais variáveis ao processo de medida de desvio.

Foram utilizados os dados da programação de furos de sondagem, boletins de campo realizados pelas equipes de perfuração, levantamento topográfico dos furos de sondagem, descrição geológica e geotécnica dos testemunhos, perfilagem geofísica de furos de sondagem e relatórios de acompanhamento (visita técnica) visando obtenção de dados para esse estudo.

1.6 Estrutura da dissertação

- **Capítulo 1 – Introdução:** Neste capítulo é descrita a proposta e objetivo do trabalho, destacando as considerações iniciais do estudo, localização e estrutura da dissertação;
- **Capítulo 2 – Geologia:** Neste capítulo é contextualizada de forma simplificada a geologia regional e local da mina de S11D e descritos as principais litologias encontradas nos furos de sondagem e suas características;
- **Capítulo 3 – Sondagem Rotativa Diamantada Testemunhada:** Neste capítulo são descritos as principais características da sondagem rotativa diamantada testemunhada e as principais atividades relacionadas ao seu processo produtivo;
- **Capítulo 4 – Equipamentos de Medida de Desvio de Furo de Sondagem:** Neste capítulo são abordados fatores relacionados às principais características dos equipamentos de medida de desvio, descrição do posicionamento espacial das leituras, fatores operacionais e técnicos que interferem direta e indiretamente no processo produtivo para obtenção das leituras e principais validações relacionadas à precisão e acurácia;
- **Capítulo 5 – Aquisição, Análise e Intepretação dos Dados:** Neste capítulo são descritos os tipos de atividade e dados consolidados para intepretação e análise do comportamento das trajetórias dos furos de sondagem, as principais correlações possíveis entre variáveis e intepretação dos dados. Foram utilizadas informações da programação dos furos de sondagem, acompanhamento de campo das atividades de perfuração, leituras dos equipamentos de medidas de desvio, dados das perfilagens geofísica de furos de sondagem, descrição geológica e geotécnica dos testemunhos, consolidação e análise dos dados;

- **Capítulo 6 – Conclusão:** Neste capítulo são realizadas inferências sobre a análise das trajetórias dos furos de sondagem rotativa diamantada testemunhada na mina de S11D. Por fim, são realizadas recomendações para trabalhos futuros no processo de pesquisa geológica, nas operações de sondagem e na atividade de medida de desvio.

2. GEOLOGIA

2.1 Geologia regional

A Província Mineral de Carajás (PMC) está localizada no extremo leste do Cráton Amazônico, especificamente, na província geocronológica Amazônia Central (MACAMBIRA *et al.*, 1990), que corresponde ao seu núcleo arqueano (Figura 2.1). A Província Mineral de Carajás é subdividida em dois setores: o domínio sul, constituído pelos terrenos *Granito-Greenstone* de Rio Maria (DALL'AGNOL, 1982), e o domínio norte, que abrange o Cinturão Itacaiúnas (ARAÚJO *et al.*, 1988).

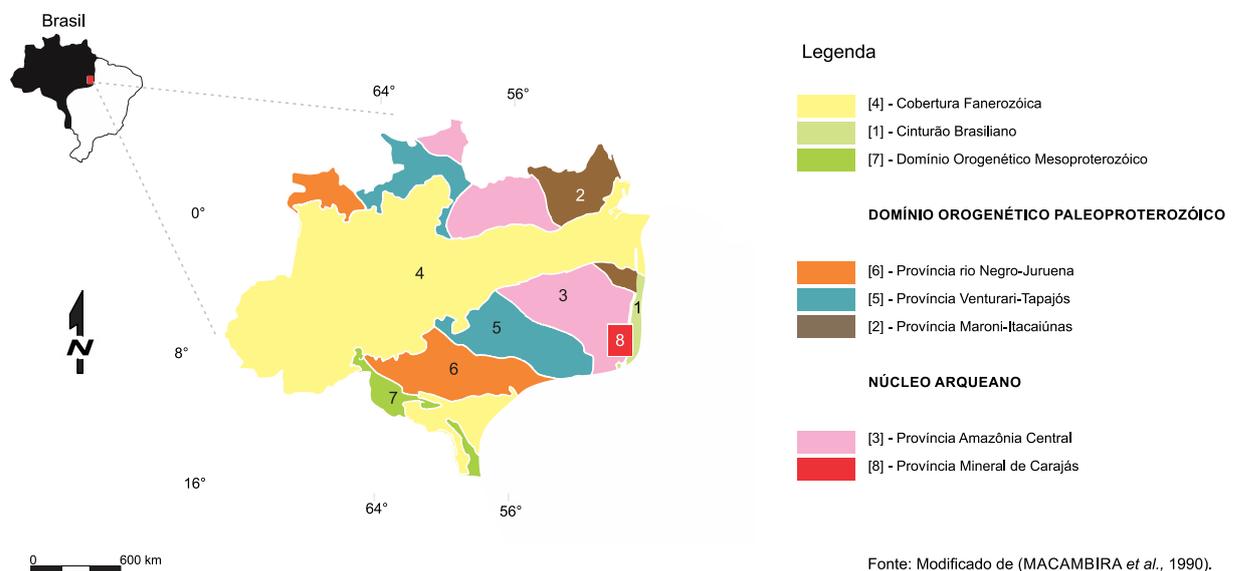


Figura 2.1 – Geocronologia do Cráton Amazônico e localização da PMC.

O Cinturão Itacaiúnas, por sua vez, envolve os complexos Xingu (SILVA *et al.*, 1974) e Pium (DOCEGEO, 1988), o Gnaisse Estrela, a Suíte Plaqué e os Grupos Sapucaia e Grupo Grão Pará. Os Granulitos do Complexo Pium, datados em 3,0 Ga (RODRIGUES *et al.*, 1992),

juntamente com os terrenos *Granito-Gnáissicos* do Complexo Xingu formam o embasamento do cinturão.

Os terrenos *Granito-Greenstone* de Rio Maria, de idade mesoarqueana (3,05 – 2,85 Ga) são formados por sequências vulcanossedimentares, dentre elas, o *Greenstone Belt* (Figura 2.2) (DOCEGEO, 1988), e intrusões graníticas arqueanas, tais como Granodiorito Rio Maria, *Trondhjemitó Mogno* e *Tonalito Parazônia*, que formam batólitos de configurações dômica.

A estratigrafia da região da Serra dos Carajás compreende várias unidades pré-cambrianas. O Complexo Xingu representa o embasamento na região e se caracteriza por apresentar rochas polimetamórficas representadas por anfibolitos, migmatitos, granitos, cataclasitos e milonitos, fazendo parte de sequências do tipo *Greenstone Belts* (HIRATA *et al.*, 1982).

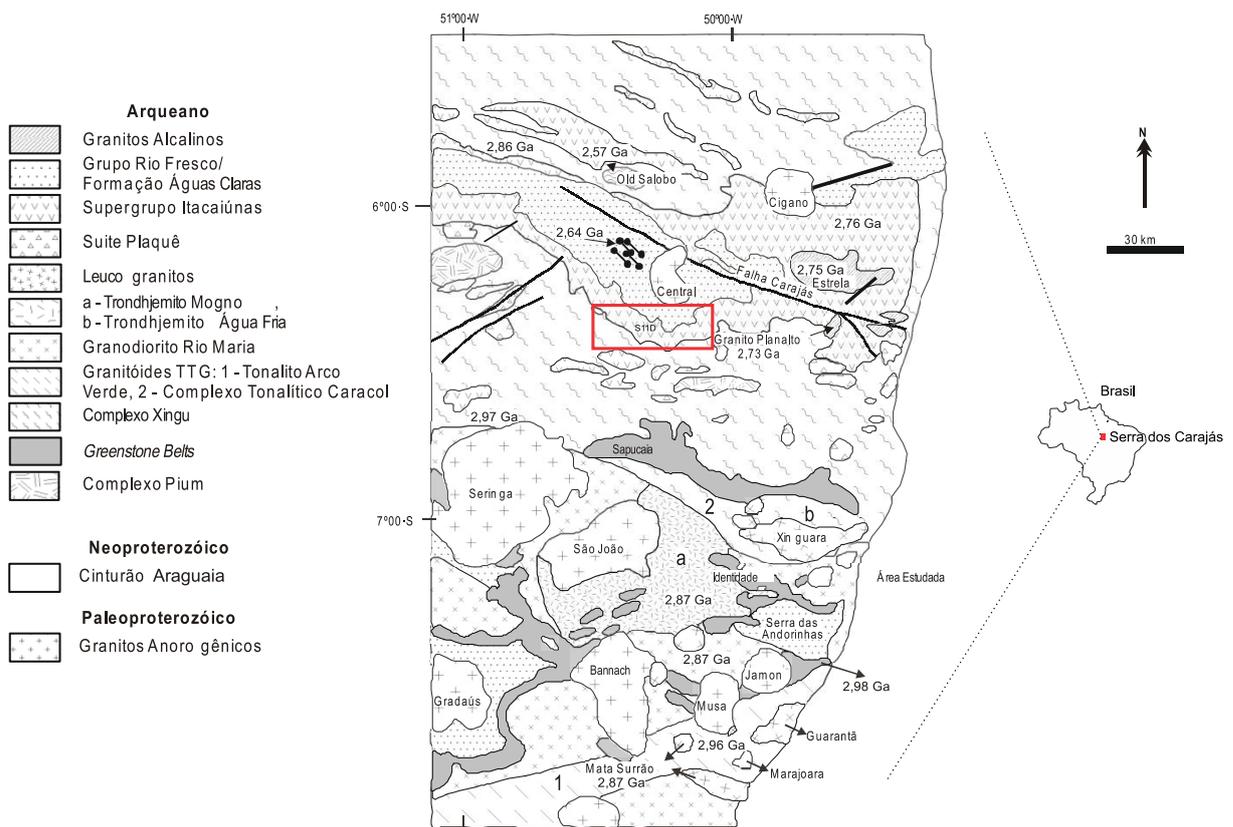


Figura 2.2 – Mapa geológico da Província Mineral de Carajás.

Sobreposto a este embasamento encontra-se a sequência Salobo-Pojuca, redefinida, por volta de 1988, pela DOCEGEO, como Grupo Igarapé Pojuca, que corresponde a uma sequência

composta de rochas vulcânicas básicas, ácidas, tufos, possíveis piroclásticas intercaladas como rochas sedimentares químicas (dolomitos, *bifs* e *cherst*) e detríticas (quartzitos), de idade proterozóica inferior e intensamente dobradas e metamorfizadas (HIRATA *et al.*, 1982).

Essas rochas basálticas fazem parte de um evento vulcânico toleítico submarino, evidenciado pela presença de hialoclastitos. O Complexo Xingu e o Grupo Igarapé Pojuca serviram de substrato para a deposição do Grupo Grão Pará, que representa uma sequência vulcanosedimentar, possuindo na base a Formação Parauapebas, seguida pela Formação Carajás na porção intermediária e no topo encontra-se a Formação Igarapé Cigarra (MACAMBIRA *et al.*, 1990).

2.2 Geologia local

O Grupo Grão Pará é composto da base para o topo pelas seguintes unidades: Formação Parauapebas, Formação Carajás e Formação Igarapé Cigarra (Figura 2.3).

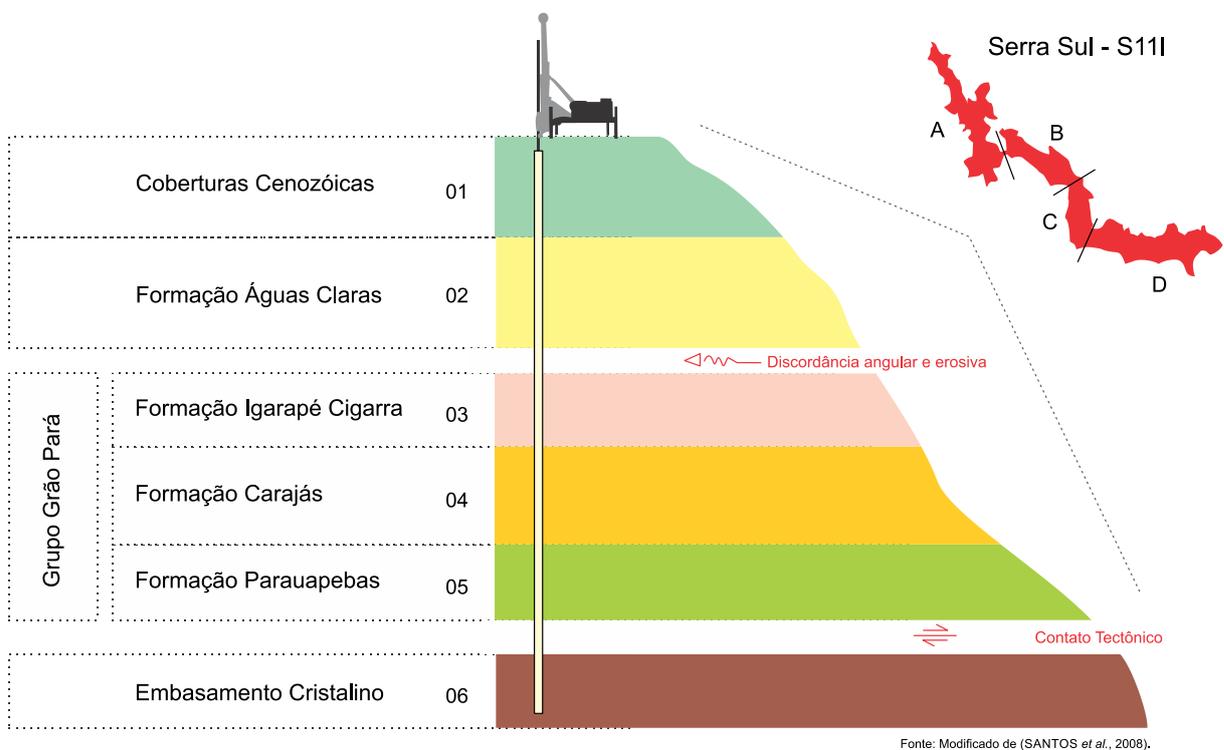


Figura 2.3 – Estratigrafia local da jazida de Serra Sul.

2.2.1 Coberturas recentes

Correspondem a uma gama de processos de evolução pedológica e outra série de unidades transportadas associadas a diferentes períodos de dissecação da paleocordilheira das Serras dos Carajás. No caso das formações ferríferas, devido a sua alta susceptibilidade a processos de alteração, observam-se diferentes processos de evolução pedogênica e de degradação. Junto a unidades carbonosas e/ou carbonáticas da Formação Igarapé Cigarra ocorre vasta ramificação do sistema de drenagens que associada a estruturas favorecedoras e ao contato com a formação ferrífera, leva ao desenvolvimento de uma série de cavidades.

2.2.2 Formação Águas Claras

Recobrimo discordantemente a Formação Igarapé Cigarra, Formação Carajás e Formação Parauapebas, encontra-se a Formação Águas Claras, formada nesta localidade por uma unidade basal de conglomerados finos, uma unidade intermediária psamo-pelítica e uma unidade pelito carbonática no topo. Nos conglomerados basais encontram-se clastos de hematita, clorita xistos e alguns pelitos, o que corrobora a discordância erosiva e a instalação de outra bacia sobre a Província Mineral de Carajás.

2.2.3 Rochas intrusivas

Na área do alvo e adjacências foram encontradas três gerações de rochas intrusivas: (i), *sills* máficos, provavelmente sincrônicos à Formação Carajás; (ii) o Granito Central de Carajás alojado nas unidades do Grão Pará, com idade Mesoproterozóica e (iii) diques Fanerozóicos que cortam a Província Mineral de Carajás.

2.2.4 Grupo Grão Pará

O platô S11 constitui uma das áreas de maior destaque no cenário mundial em função dos contínuos afloramentos de formação ferrífera de aproximadamente 28 km. Este depósito abriga no caso da mineralização ferrífera, toda a história de estruturação, deformação e alterações hidrotermais e intempéricas processada no contexto dos limites da Província Mineral de Carajás.

A Formação Parauapebas representa uma unidade metavulcânica bimodal de afiliação ainda carente de detalhamento petrológico e geoquímico, devido às controvérsias encontradas na literatura. Os afloramentos nos quais foi possível conhecer melhor esta unidade predominam metavulcânicas félsicas com idades variando entre 2759 ± 2 Ma e 2743 ± 11 Ma [U-Pb, zircão] (LINDENMAYER *et al.*, 1998). Como unidade intermediária do Grupo Grão Pará está a Formação Carajás (Figura 2.4), composta por formações ferríferas bandadas e corpos de hematititos e magnetititos de idade mínima de 2740 ± 8 Ma; determinada por [U-Pb, zircão] encontrado em um *sill* máfico encaixado na formação ferrífera.

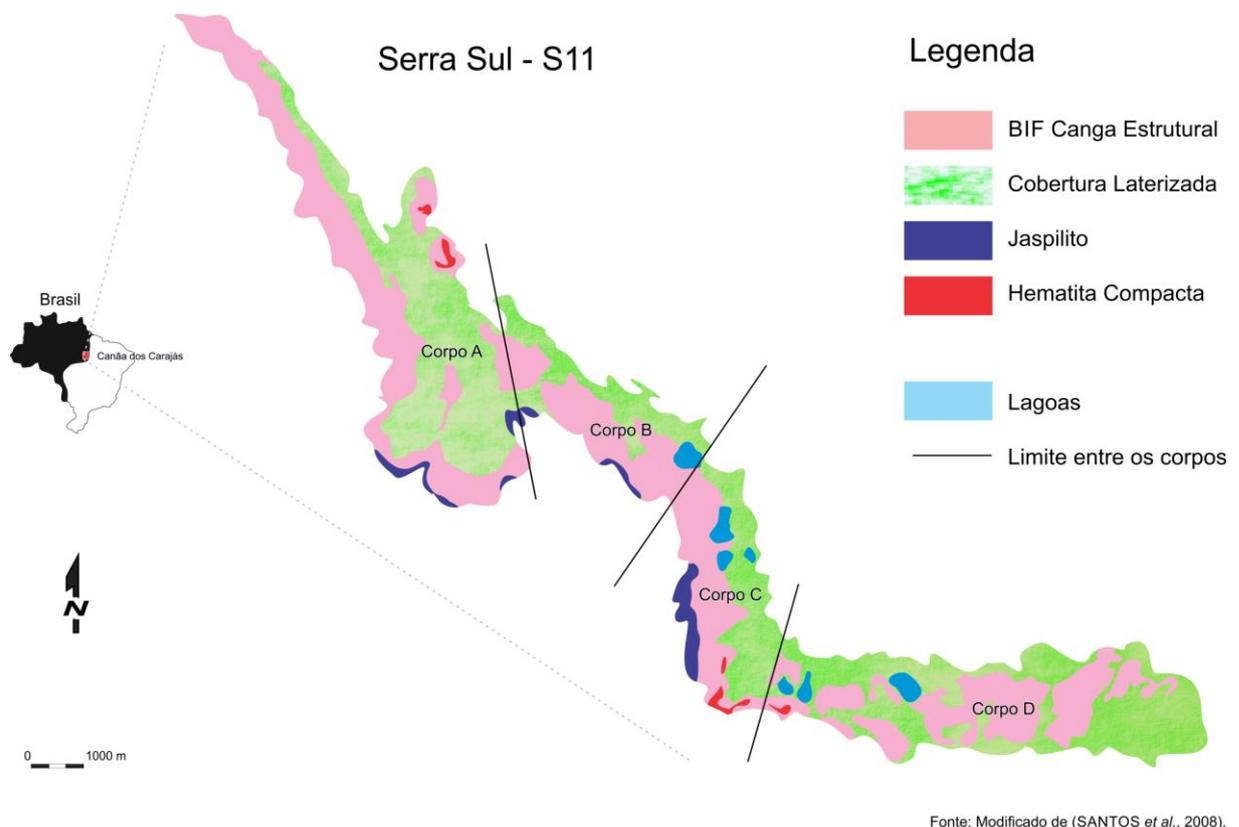


Figura 2.4 – Mapa da geologia simplificada da jazida de S11 (Corpos A, B, C e D).

A unidade de topo do Grupo Grão Pará é a Formação Igarapé Cigarra, composta por rochas básicas, metagrauvacas, tufos, filitos e quartzitos. Na parte basal desta unidade, próximo ao contato com as formações ferríferas, há uma predominância de rochas siliciclásticas.

2.2.5 Embasamento

O embasamento da unidade metavulcanossedimentar é composto por granitóides do tipo TTG - *Tonalíticas-Trondhemíticas-Granodioríticas* e migmatitos, encontrados abaixo da escarpa sul da jazida de S11.

2.2.6 Principais litotipos presentes nos furos de sondagem

Canga de Minério (CM): A Canga é uma rocha superficial, formada pelo processo de laterização, constituída por fragmentos de tamanhos variados 1 a 10 cm, por vezes cimentada por matriz limonítica/goethítica ou com a presença de argilominerais. Geralmente um material muito hidratado com altos valores de P e Al podendo ser classificada em Canga Estrutural e Canga Química (AZEVEDO *et al.*, 2009).

A Canga Estrutural (CE) é predominantemente compacta em avançado estado de alteração intempérica, onde não é possível distinguir a mineralogia a olho nu (Figura 2.5). Apenas a textura é visível sendo evidenciada pelo bandamento preservado da formação ferrífera bandada que lhe deu origem. Trata-se de um litotipo muito hidratado e que traz como contaminantes alumina e fósforo. Os teores de Fe na média giram em torno de 64,5%. Possui em torno de 62% das partículas acima de 8 mm. Parte deste material pode ser aproveitado como minério, sendo um potencial gerador de produtos granulados. A espessura do horizonte de canga em profundidade varia, podendo atingir até 60 m.

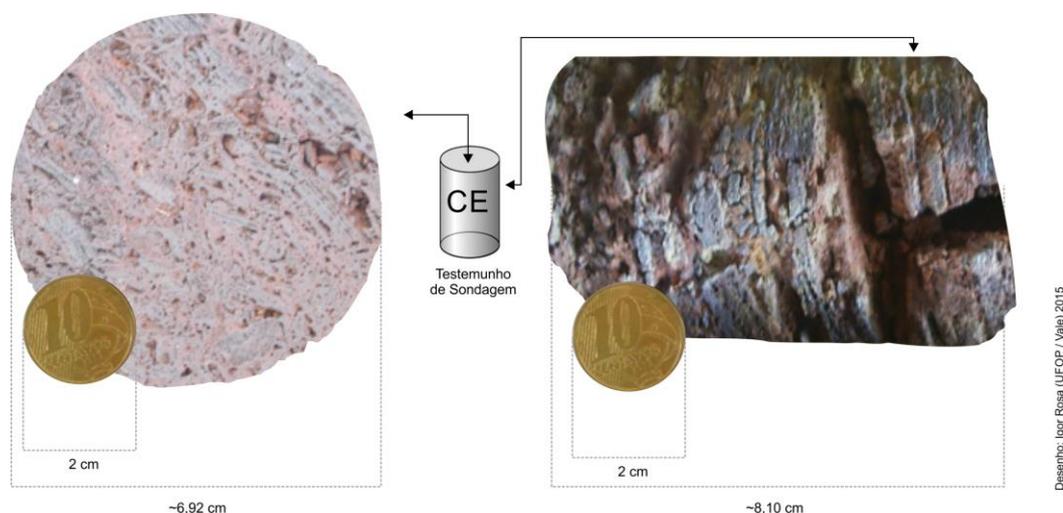


Figura 2.5 – Amostra de testemunho de sondagem de canga estrutural.

A Canga Química (CQ) é uma rocha de natureza detrítica gerada pela erosão da camada de formação ferrífera (Figura 2.6). Recobre grande extensão da área de Serra Sul juntamente com as cangas estruturais. O teor médio de Fe é de cerca de 58,6% e possui altos teores de P e Al, sendo considerada como litologia estéril.

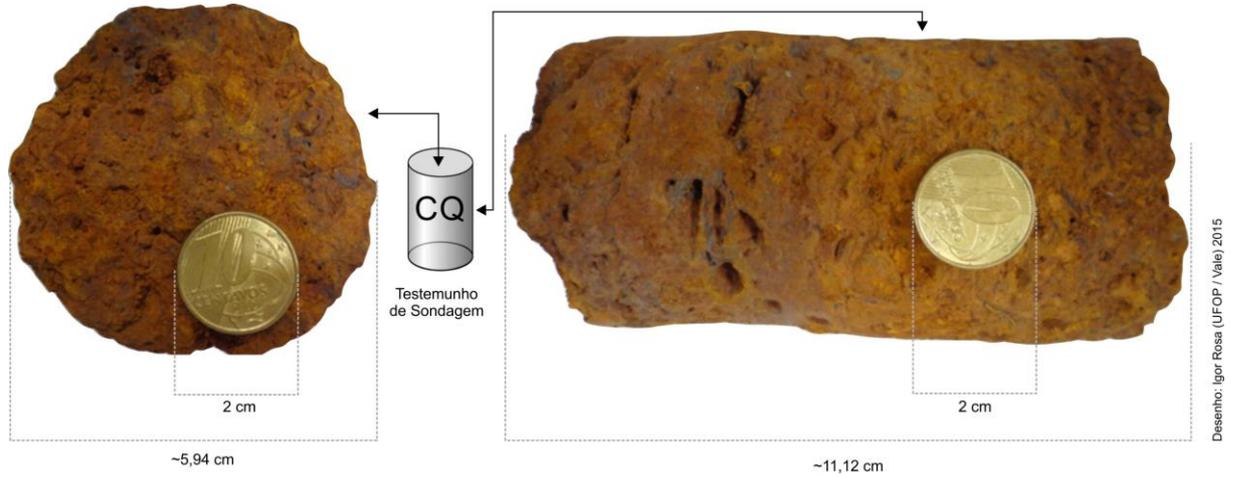


Figura 2.6 – Amostra de testemunho de sondagem de canga química.

Além da canga química, outras litologias consideradas estéreis são encontradas nos furos de sondagem. Estas litologias são as encaixantes das formações ferríferas, representadas pelas rochas máficas das Formações Parauapebas e Igarapé Cigarra, exemplo da Máfica São e Máfica Semidecomposta (Figura 2.7 e Figura 2.8).

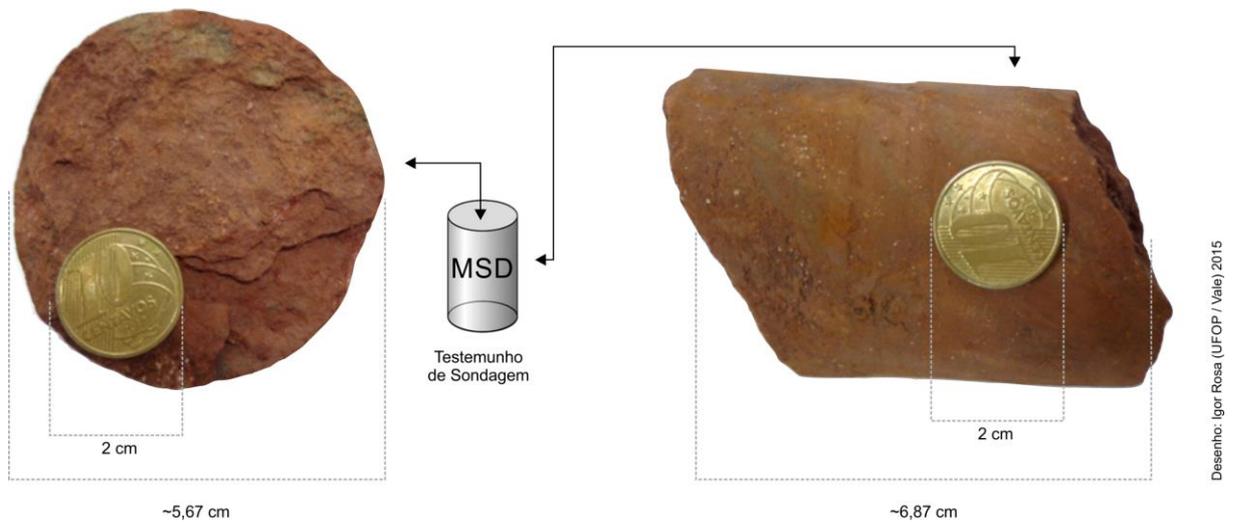


Figura 2.7 – Amostra de testemunho de sondagem de máfica semidecomposta.



Figura 2.8 – Amostra de testemunho de sondagem de máfica sã.

Hematita Friável (HF): Formada predominantemente pelo enriquecimento supergênico dos jaspilitos (Figura 2.9). É o tipo mais encontrado nos furos de sondagem e galerias, não sendo aflorantes na região. Predominantemente composta por hematita com massas irregulares de magnetita, goethita e limonita provenientes do protominério jaspelítico. Também é comum a presença de caulim e argilominerais provenientes da alteração de rochas vulcânicas máficas. Os corpos de hematita friável ocorrem desde próximos à superfície, atingindo profundidades superiores a 450 m em relação à superfície. Apresentam teores médios de Fe em torno de 66,5%. Possui teores relativamente baixos de fósforo, sílica e alumina.

Nos contatos com os jaspilitos pobres (JP) ocorre uma quebra brusca nos teores de ferro, embora, localmente, observem-se contatos gradacionais com os jaspilitos ricos (JR). Contém aproximadamente 17% das partículas acima de 8 mm. Trata-se de uma camada bastante espessa variando em torno de 30 m de profundidade em relação à superfície a até mais de 420 m (AZEVEDO *et al.*, 2009).

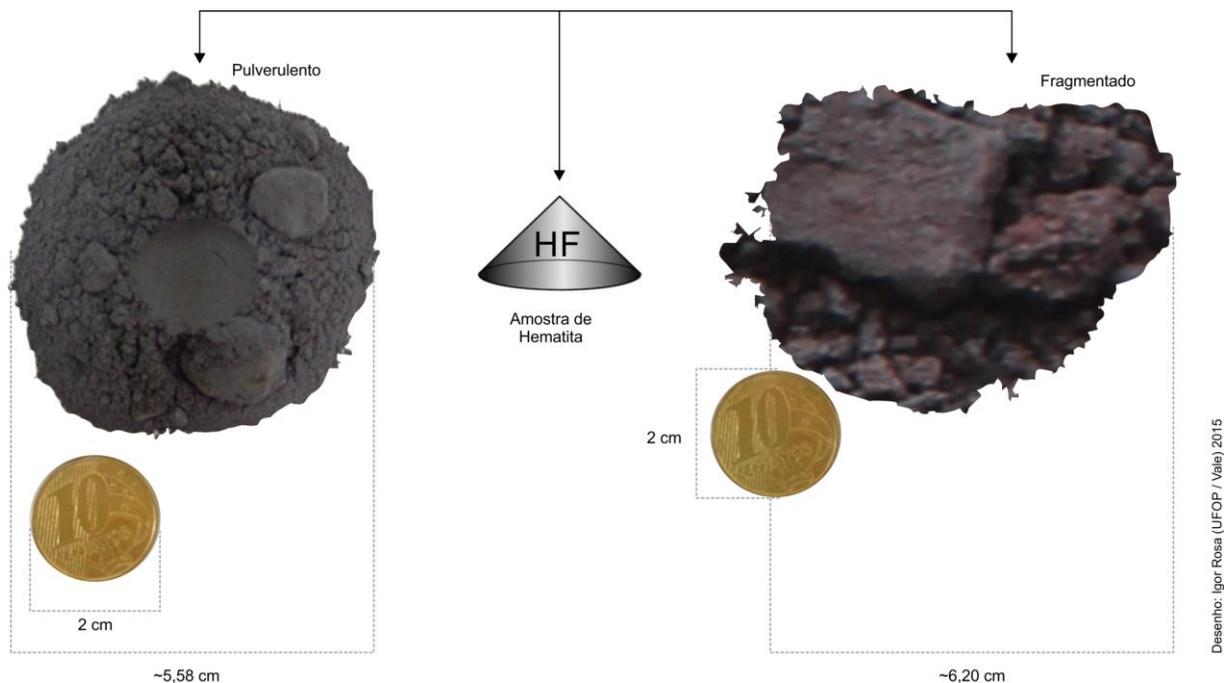


Figura 2.9 – Amostra de testemunho de hematita friável na caixa.

Hematita Compacta (HC): Sua ocorrência é restrita a algumas regiões dos Corpos C e D, preferencialmente abaixo da camada superior de canga estruturada (CE). Ocorre na forma de lentes e/ou bandas intercaladas aos jaspilitos de forma concordante (Figura 2.10). Podem ocorrer em profundidade sob a forma de lentes pouco espessas e isoladas. Possui estrutura maciça ou foliada sendo rica em goethita. Contém aproximadamente 67% das partículas acima de 8 mm. A espessura dos corpos varia de poucos metros a até 30 m e o teor médio de Fe é de cerca de 66%, com baixos teores de P.

Os contatos com os tipos friáveis são abruptos. Em relação aos teores de Fe, possui contatos bem marcados apenas com os jaspilitos. Existe grande potencial de hematitas compactas no morro do *King Kong* (junção entre os Corpos C e D), porém ainda não existem furos de sonda nesta região (AZEVEDO *et al.*, 2009).

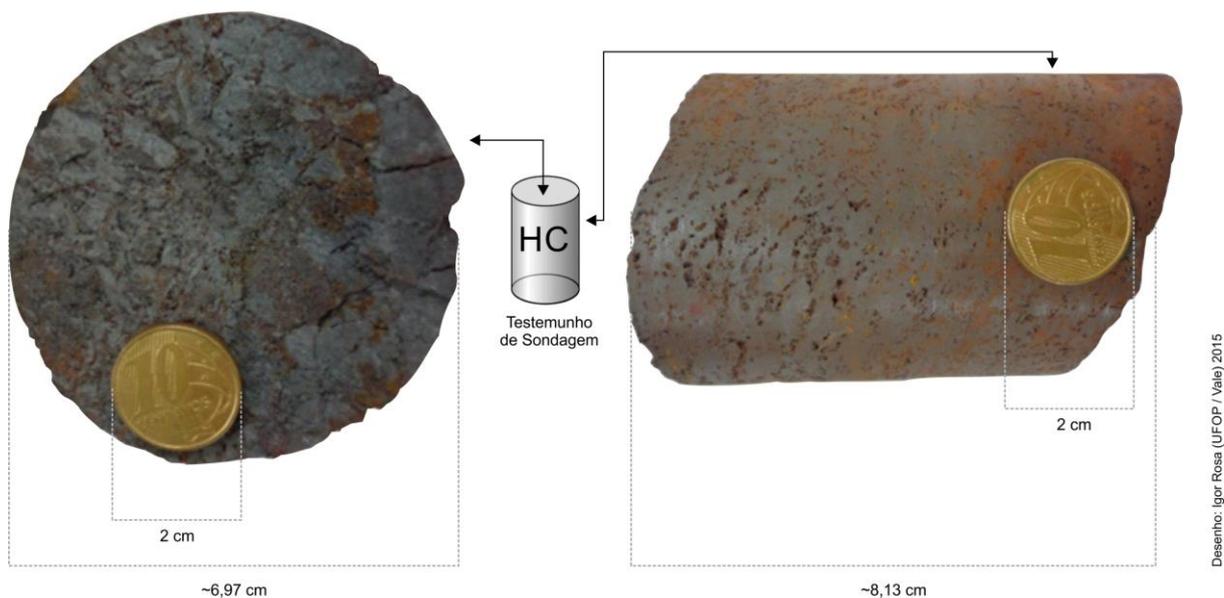


Figura 2.10 – Amostra de testemunho de sondagem de hematita compacta.

Hematita Manganésífera (HMN): Este litotipo ocorre em pequenas lentes dispersas ao longo do depósito, principalmente no Corpo D. Às vezes estas lentes são contínuas de uma seção geológica para outra. Ocorre na maioria das vezes associada aos contatos com jaspilites e rochas máficas, podendo também se apresentar sob a forma de lentes isoladas no meio das hematitas friáveis. Em termos químicos e granulométricos conserva as mesmas características das hematitas friáveis (HF), diferenciando destas, principalmente por teores mais elevados de Mn, em torno de 2% na média. Possui teores médios de Fe em torno de 64,3%. Apresentam-se friáveis, com aproximadamente 16% das partículas acima de 8 mm. A espessura varia de poucos metros até 50 m (AZEVEDO *et al.*, 2009).

Jaspilito (JP): São formações ferríferas bandadas geralmente da fácies óxido, compostas pela alternância entre bandas e lâminas de jaspe/sílica e bandas de hematita (Figura 2.11). Subordinadamente ocorrem também bandas de clorita e carbonatos alternados com as bandas de hematita. Podem ser divididos em fácies petrográficas macroscópicas de acordo com a persistência e regularidade do bandamento: jaspilito carbonático, jaspilito silicoso, jaspilito clorítico e jaspilito brechado. Ocorrem sob a forma de lentes imersas na grande massa de hematitas friáveis ou na base das formações ferríferas em contato com as rochas máficas.

A espessura das lentes pode variar desde centímetros até mais de 200 m. A espessura da camada basal em contato com a Formação Parauapebas é desconhecida por estar em grandes profundidades. Os teores médios de Fe giram em torno de 41%. Possui teores baixos de

contaminantes, sendo o principal contaminante a alumina com teores médios em torno de 1%. Contém aproximadamente 60% de partículas acima de 8 mm (AZEVEDO *et al.*, 2009).



Figura 2.11 – Amostra de testemunho de sondagem de jaspilito.

Jaspilito Rico (JR): Possui características macroscópicas semelhantes às dos jaspilitos; ocorrendo ao longo de todo o depósito sob a forma de lentes em contato com hematitas friáveis. São jaspilitos onde o quartzo foi bastante lixiviado, restando material rico em ferro e friável. Contém, na média, aproximadamente 28% das partículas maiores que 8 mm. Possui teores baixos de contaminantes, sendo o principal contaminante a alumina com teores médios em torno de 1%. O teor médio de Fe gira em torno de 55 %. A espessura varia desde poucos centímetros até 70 m (AZEVEDO *et al.*, 2009).

3. SONDAGEM ROTATIVA DIAMANTADA TESTEMUNHADA

Em todo estágio inicial de uma pesquisa geológica tornam-se necessários alguns procedimentos e técnicas com o intuito de caracterizar o potencial mineral da área de interesse (CHIOSSI, 1971). Esses procedimentos e técnicas estão basicamente concentrados nas etapas dos processos de geofísica aérea, de superfície e de poço, mapeamento geológico, sondagem, modelamento geológico e avaliação de recursos e reservas. A sondagem geológica feita por meio de equipamentos de perfuração pode atingir profundidades até 800 metros^[2], auxiliando na compreensão da disposição espacial das rochas mineralizadas e suas inter-relações com as rochas estéreis encaixantes.

O procedimento de sondagem rotativa diamantada testemunhada é realizado com auxílio de uma coroa de formato cilíndrico, contendo na superfície que toca o material a ser perfurado diamantes cravados e/ou impregnados ou vídia que, girando em velocidade estabelecida pelo operador do equipamento, cortam a rocha segundo uma seção circular, gerando um cilindro denominado testemunho de sondagem (CHIOSSI, 1971). Considerando o ângulo de inclinação da torre da sonda os furos de sondagem em superfície podem ser caracterizados como verticais ou inclinados. (Figura 3.1 e Figura 3.2).

^[2] Metragem máxima estipulada na especificação técnica dos contratos de sondagem da Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos entre os anos de 2014 a 2017.



Fonte: Arquivo Interno Vale, Delvan Souza (2013)

Figura 3.1 – Praça de sondagem em área de pesquisa (furo inclinado).



Fonte: Arquivo Interno Vale, Auricliene Cardoso (2014)

Figura 3.2 – Praça de sondagem em área de operação de mina (furo vertical).

Dois métodos de perfuração são geralmente utilizados no processo de sondagem rotativa diamantada testemunhada, método convencional e o *wireline*, sendo nesse último utilizado um barrilete de tubo retrátil que permite a retirada do tubo interno o qual porta o material perfurado por dentro da coluna de perfuração sem a necessidade de retirada das hastes (Figura 3.3), procedimento que não poderia ser realizado no método convencional (ALMEIDA, 2013).

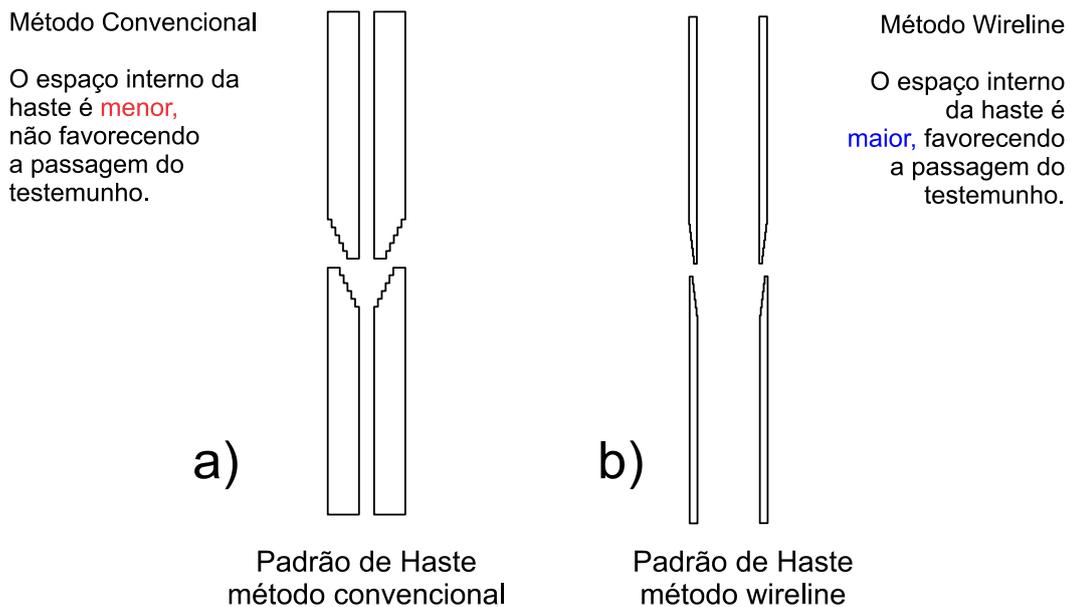


Figura 3.3 – Haste de perfuração método convencional e *wireline*.

No método *wireline*, o tubo externo é completado na sua extremidade inferior por um calibrador ou luva e em seguida por uma coroa de perfuração. Na parte interna encontra-se, um tubo retrátil com uma mola ou anel de retenção do testemunho na extremidade inferior e na parte superior do tubo uma cabeça giratória com rolamentos, assim como um sistema de travas e de lançadeira com o respectivo pegador do tubo interno denominado *over shot* (CARVALHO, 2013).

O *over shot* é preso a um cabo de aço de 3/16” (4,8 mm) ou 1/4” (6,4 mm), com o qual o tubo interno é retirado do interior do furo por dentro da coluna de hastes. O cabo de aço é enrolado no tambor de um guincho *wireline*, geralmente incorporado na sonda de superfície.

O equipamento de sondagem é composto basicamente por um dispositivo que transfere a força de um motor a combustão ou elétrico para uma coluna de perfuração, que imprime um movimento de rotação a um cabeçote, sendo este solidário a um fuso de avanço que possui um mandril acoplador de haste (HERRMANN, 1972).

Os principais tipos de sonda são agrupados de duas formas, avanço mecânico (Figura 3.4) e hidráulico (Figura 3.5) da força de perfuração.



Fonte: Arquivo Interno Vale, Igor Rosa (2008)

Figura 3.4 – Modelo de Sonda Mecânica – Mac Sonda.



Fonte: Arquivo Interno Vale, Auricliene Cardoso (2014)

Figura 3.5 – Modelo de Sonda Hidráulica – Tipo CS14.

Geralmente o dimensionamento do equipamento de sondagem é dado em função das características do empreendimento, tais como: diâmetro de perfuração (Tabela 3.1), profundidade do furo, compacidade da rocha e inclinação do furo. Em linhas gerais a capacidade em metros de perfuração em formação ferrífera dependendo do modelo de sonda pode atingir 800 a 1000 metros na série do diâmetro H. Com a redução do diâmetro do furo na

série de haste do diâmetro N, essa profundidade pode ser ampliada podendo chegar a 1500 metros^[3].

Tabela 3.1 – Principais diâmetros de perfuração.

Série	Cód. Diâmetro da Coroa de Perfuração	Diâmetro do Furo (mm)	Diâmetro do Testemunho (mm)
X	XRT	29,4	18
E	EX, EW	37,4	21
A	AX, AW	49,2	29
A	AQ	49,2	26
B	BX, BW	60,3	41,3
B	BQ	60,3	36
N	NX, NW	76,2	54
N	NQ	76,2	47
H	HX, HW	100	76
H	HQ	96,4	63

Fonte: Arquivo Interno Vale, 2014.

O processo de testemunhagem na sondagem rotativa geralmente é constante, recuperando-se cilindros da rocha (Anexo IX) atravessada em intervalos de avanço da coluna de perfuração, sendo possível classificar visualmente a rocha através de descrição geológica e geotécnica e amostrá-la conforme o objetivo da pesquisa desejado, podendo também ser gerado resultados químicos ou físicos das amostras após análise de laboratório (Anexos VI, X, XI, XII e XIII). Como o volume de amostra coletada por metro perfurado é pequeno faz-se a composição de intervalos com base nas manobras executadas (Figura 3.6).

^[3] Dados disponibilizados pelo fornecedor de sondagem em visita técnica em campo.

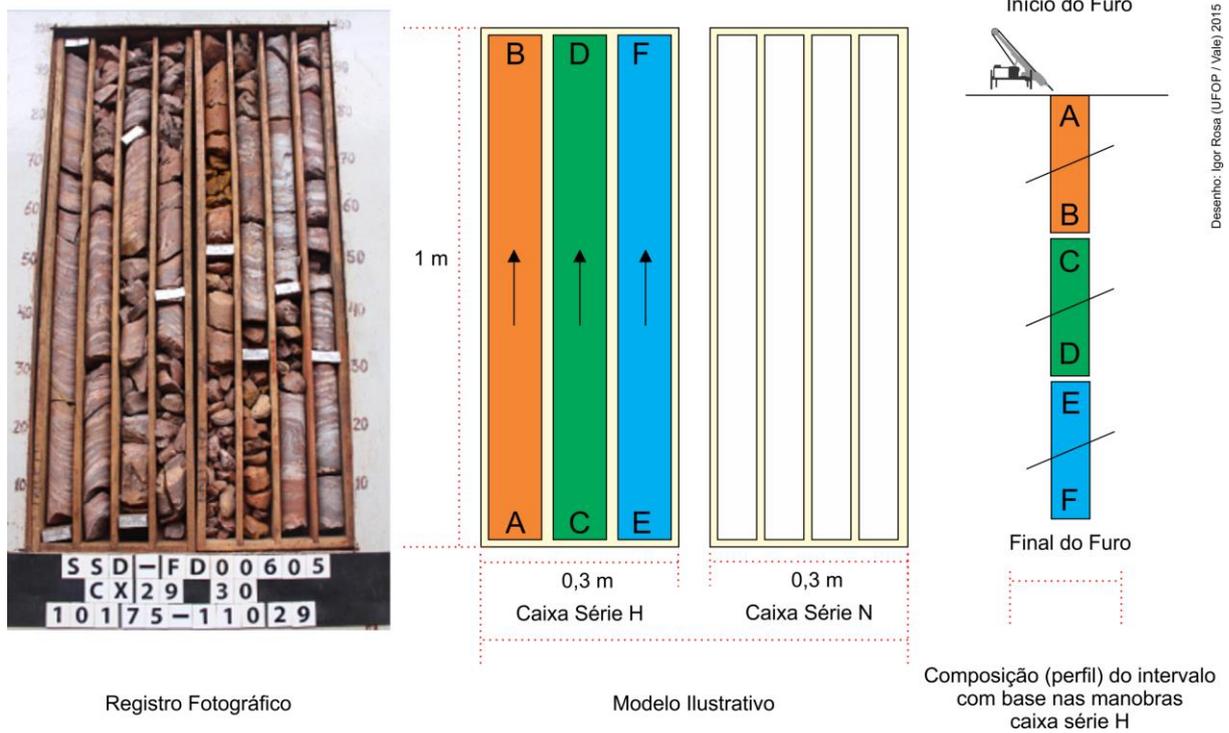


Figura 3.6 – Composição de intervalos com base nas manobras perfuradas.

3.1 Bomba do circuito do fluido de perfuração

Esse equipamento é destinado a impulsionar o fluido de perfuração gerando uma circulação no reservatório e introduzi-lo no furo através da coluna de perfuração (Figura 3.7). O acionamento da bomba pode ser por comando hidráulico ou a diesel. Em geral esse comando está acoplado ao painel do equipamento de perfuração.

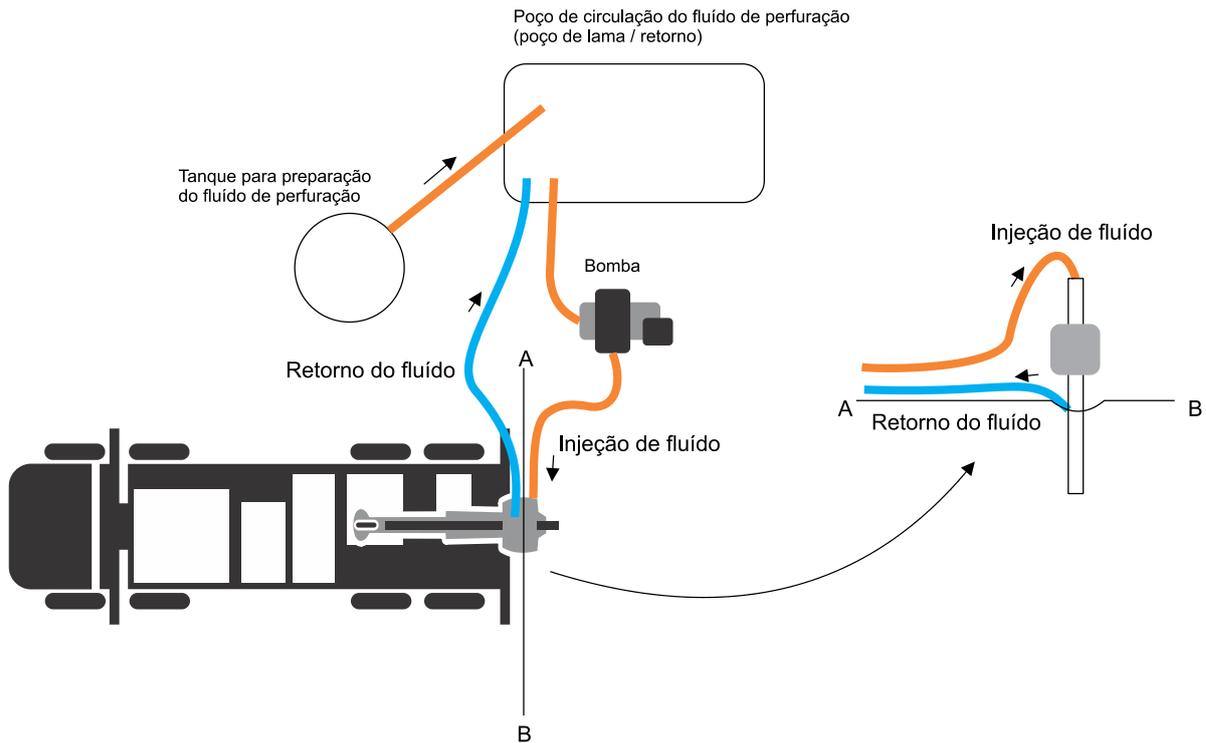
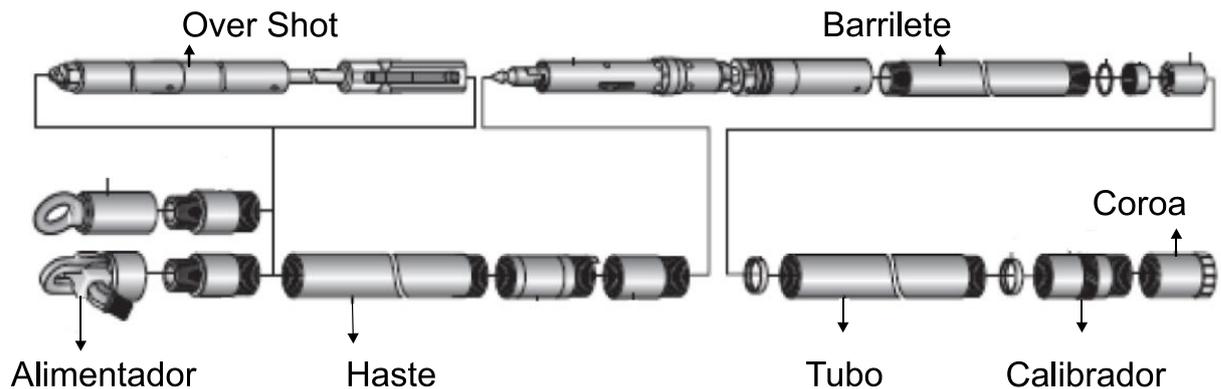


Figura 3.7 – Circuito do fluxo de bombeamento.

A pressão do fluido injetado na coluna de perfuração pode ser monitorada através do manômetro acoplado ao painel do equipamento de sondagem.

3.2 Coluna de perfuração

A coluna de perfuração (Figura 3.8) é o conjunto de dispositivos da sondagem rotativa conectados entre si (alimentador, haste, barrilete, calibrador e coroa), que transmite a pressão e os movimentos necessários à perfuração e que conduz no seu interior o fluido de circulação (SANDIVIK, 2013)



Fonte: Adaptado de (SANDVIK WXPLOATION MARKETING, 2013).

Figura 3.8 – Conjunto da coluna de perfuração.

As hastes (Figura 3.9) são ferramentas com objetivo de prolongar o furo e transmitir para a coroa movimentos de rotação e avanço. São tubos de aço sem costura e trefilados a frio (SANDIVIK, 2013). Na sondagem convencional a ligação de uma haste na outra é feita por *nipples*, enquanto na sondagem *wireline*, a junção é do tipo liso direta, sendo que o comprimento padrão de cada haste é em geral 3 m (CHIOSSI, 1971).



Fonte: Arquivo Interno Vale. Igor Rosa (2014)

Figura 3.9 – Hastes de perfuração série H.

A coroa de perfuração exerce papel de grande importância no conjunto de acessórios utilizados na sondagem rotativa diamantada testemunhada. É um dispositivo conectado na extremidade inferior da coluna de perfuração e opera como instrumento cortante para fins de penetração em rocha ou em outros materiais. As coroas diamantadas (Figura 3.10) de perfuração são constituídas numa das extremidades por uma matriz onde estão encravados os

diamantes, enquanto na outra extremidade existe uma rosca que é acoplada ao calibrador e são utilizadas em rochas semicompactas à altamente duras. Enquanto que as do tipo vídia (Figura 3.11) são utilizadas em rochas friáveis e decompostas.



Fonte: Adaptado de (CARVALHO, 2013)

Figura 3.10 – Coroa de diamantes. (Coroa HQ-2 extra lateral S-2, Geosol).



Fonte: Adaptado de (CARVALHO, 2013)

Figura 3.11 – Coroa de vídia. (Coroa de Pastilha com degrau HQ-2, Geosol).

3.3 Flúido de perfuração

O flúido de perfuração injetado no furo de sondagem através da coluna de perfuração tem diversas finalidades de auxiliar na operação do corte do maciço rochoso, arrefecer as peças cortantes, transportar os detritos de perfuração para a superfície e sustentar as paredes do furo. O flúido mais utilizado na sondagem rotativa é a lama bentonítica, que consiste numa mistura de água e bentonita (Figura 3.12).

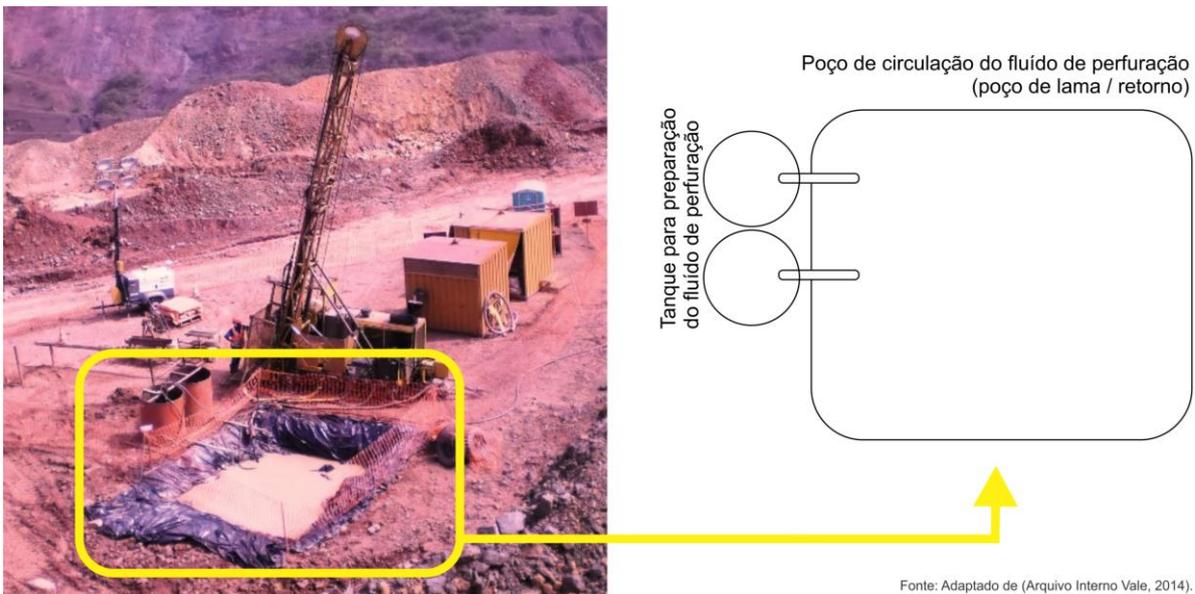


Figura 3.12 – Poço de circulação do flúido de perfuração.

O flúido de perfuração quando corretamente utilizado exerce funções importantes como:

- tem função de limpeza, resfriamento e manter a transmissão de potência hidráulica na coroa de perfuração.
- tem a função de suportar parte do peso da coluna de perfuração, inibir corrosão, impedir trancamento da coluna de perfuração no interior do furo.
- tem a função de controlar pressões de subsuperfície, transportar para a superfície os fragmentos de rochas que se caracteriza como sujeira no interior do furo, estabilizar as paredes do furo, inibir as argilas hidratáveis e evitar expansão.

A utilização de um flúido de perfuração preparado de forma uniforme independente da litologia que está atravessando pode resultar na instabilidade das paredes do furo de sondagem

que por consequência pode provocar o trancamento da coluna de perfuração. Outro fator se dá com a presença de água no interior do furo de sondagem, a qual afeta diretamente as propriedades do fluido de perfuração. Desta forma o controle de circulação torna-se de fundamental importância.

3.4 Programação de sondagem

A programação de sondagem pode ser executada de diversas formas, entre elas o fluxo mais utilizado na Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos define que após confirmação interna da área de estudo, o geólogo responsável pelo alvo programa a malha de furos de sondagem e passa para as equipes operacionais as principais informações, como coordenadas X, Y e Z, DIP, azimute, profundidade final e objetivo desejado. Com essas informações é realizada uma validação sobre a possível execução do furo, uma vez viável, os acessos e praças são abertos e a equipe de sondagem e apoio são direcionadas para a praça de sondagem (Figura 3.13).

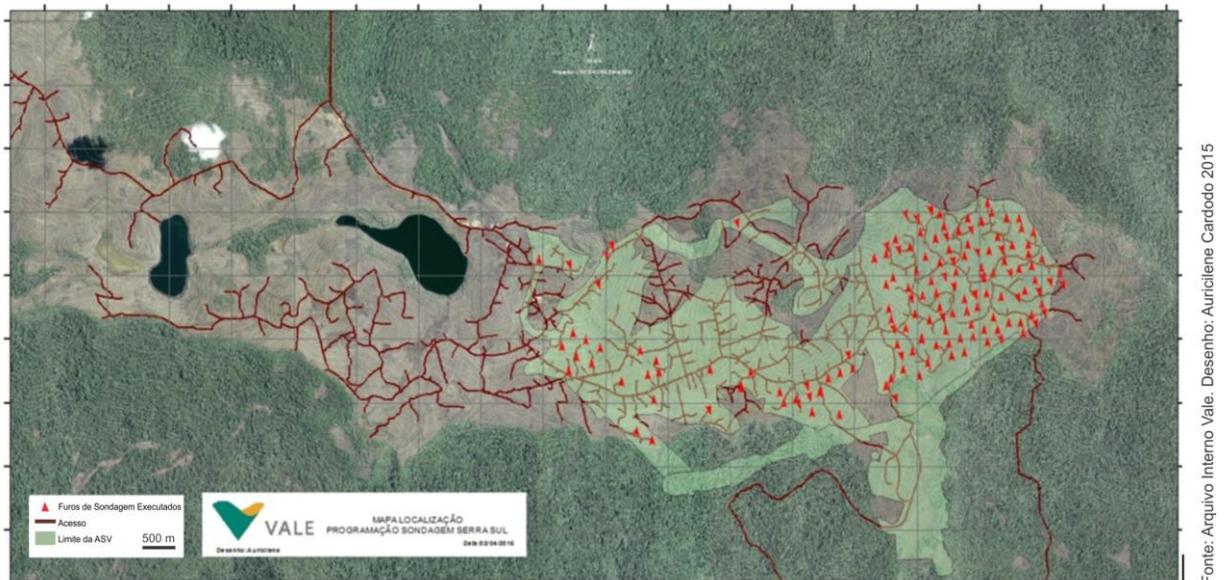


Figura 3.13 – Programação de sondagem corpo D Serra Sul campanha 2014.

Após a confecção dos mapas de programação de sondagem, a equipe de topografia é direcionada para o local onde serão avaliadas as condições topográficas de operação e segurança. Uma vez que as condições são favoráveis, a empresa de sondagem é comunicada e se direciona para a execução das atividades.

3.5 Levantamento topográfico

A equipe de topografia juntamente com a fiscalização de sondagem faz o cadastramento inicial do furo utilizando GPS - Sistema de Posicionamento Global geodésico que fornece uma precisão inferior a 1 mm numa banda de 1 Hz^[4] das coordenadas do ponto cadastrado. Pode-se utilizar também uma estação total que possui o método de transporte de coordenadas. No primeiro momento a equipe de topografia realiza o cadastramento da locação do furo na praça de sondagem (coordenadas X, Y e Z) e posicionamento de inclinação DIP e direção Az, caso o furo seja inclinado. Nesse momento a sonda pode não estar na praça de sondagem. Após a instalação da sonda deve-se cadastrar novamente, considerando o ponto exato do equipamento na praça de sondagem.

O início da perfuração só acontece após confirmação do fiscal, o qual faz as devidas validações utilizando uma bússola e conferindo a inclinação e direção que a torre da sonda está posicionada. Em áreas de interferência magnética essa validação é realizada pela equipe de topografia.

Os dados do cadastramento gerado no campo (Figura 3.14) são descarregados no *software* TopoGraph[®] e utilizados para alimentar a base de dados do GIS - Sistema de Informação Geográfica (Anexos II, III e IV).



Fonte: Arquivo Interno Vale. Igor Rosa (2014)

Figura 3.14 – Levantamento topográfico com GPS Geodésico.

^[4] Catálogo do fornecedor - Sistema GNSS Trimble R8

3.6 Abertura de acesso e praça de sondagem

Para que a sonda e os equipamentos de apoio cheguem até o local onde o furo será executado, são feitos acessos de 4 m de largura com o auxílio de um trator e equipe treinada, e no local do furo será aberta uma praça de sondagem com dimensões 20 m x 20 m no máximo. As dimensões para os acessos e praças estão definidas no relatório PCA - Programa de Controle Ambiental que é realizado para obter-se licença junto ao ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio, 2014).

Os acessos e praças (Figura 3.15) também são cadastrados com GPS e alimentados na base de dados, agregando valor ao mapa da programação de sondagem.



Fonte: Arquivo Interno Vale. Igor Rosa (2014)

Figura 3.15 – Abertura de acesso com trator.

3.7 Mobilização e desmobilização do equipamento de sondagem

Uma vez definido o local para onde o equipamento de sondagem irá executar o furo, a sonda é mobilizada junto com os acessórios necessários como barraca, containers de apoio para a equipe, tanque de lama (caixa d'água), barraca para insumos, cavaletes para as hastes e outros. Cada empresa utiliza seu próprio método de transporte que vai da utilização de caminhão guindaste ou reboque por trator em áreas mais remotas.

Assim como o processo de mobilização requer alguns cuidados, a desmobilização também possui algumas regras importantes, pois além do marco com a identificação do número do furo, a praça de sondagem deve ser deixada limpa sem presença de nem um material utilizado no processo de perfuração, o poço ou reservatório de decantação do fluido de perfuração de ser fechado e o material orgânico suprimido da praça de sondagem deverá ser espalhado em volta da mesma.

3.8 Levantamento geofísico

A geofísica tem por objetivo o estudo indireto da Terra através de métodos baseados na observação física de campos e ondas entre outras propriedades físicas (MATIAS, 2009). Em geral o estudo geofísico é realizado em três fases:

- aquisição;
- processamento;
- interpretação;

O avanço tecnológico na área da computação mais recentemente, tem produzido uma superposição cada vez maior entre essas três etapas.

As técnicas e métodos da geofísica aérea ou terrestre ajudam diretamente no processo de prospecção. Nestas técnicas, são utilizados equipamentos que medem algumas propriedades físicas das rochas como o magnetismo, a densidade, a condutividade elétrica, etc. Após o tratamento dos dados obtidos, que indicarão as prováveis anomalias, exemplo na (Figura 3.16), a área poderá utilizar métodos mais detalhados para pesquisa.

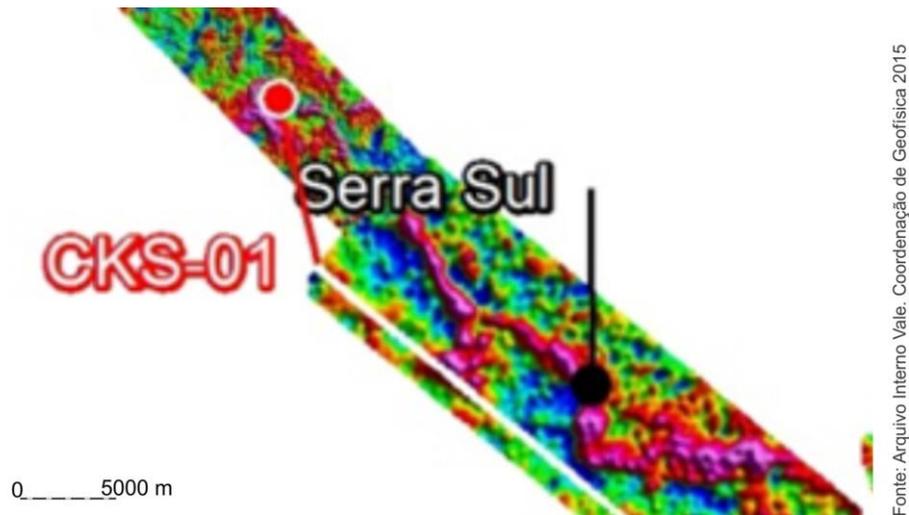


Figura 3.16 – Levantamento Aeroradiométrico de Carajás – PA.

A chegada da perfilagem geofísica em furos no ano de 1920, e seu subsequente desenvolvimento em uma tecnologia sofisticada, revolucionaram a exploração de óleo e gás e a produção industrial. A destreza de “olhar e medir” os tipos de formação, inclinação das formações, porosidade, densidade, tipo de fluídos e outros importantes fatores transformaram a perfuração e a pesquisa para óleo e gás em uma ciência refinada (HART’S E&P, 2002).

A perfilagem geofísica em furo de sondagem é um método usado em pesquisa mineral que consiste em obter o perfil com o uso de diversos tipos de sensores que percorrem os furos medindo diversas propriedades de interesse (Figura 3.17).



Figura 3.17 – Perfilagem Geofísica em furos de sondagem.

Os equipamentos ou sonda de perfilagem geofísica de furo de sondagem são constituídos por longas hastes de metal cujo comprimento pode variar de 1 m até 12 m. Uma sonda pode ser desenvolvida para o registro de apenas uma ou mais propriedades e/ou pode permitir a conexão de diversas sondas entre si para facilitar o registro de mais propriedades simultaneamente em furos muito profundos. Desde a primeira perfilagem durante a década de 20 (ALMEIDA, 2011), esse método foi sendo adaptado e aperfeiçoado para utilização em diversos tipos de aplicações na indústria mineral.

Para a obtenção das propriedades físicas de interesse em uma pesquisa mineral, as sondas de perfilagem são movimentadas dentro do furo de sondagem, sendo registrada a propriedade desejada, conferindo-se a integridade do furo e sua profundidade total. Para isto, a sonda é içada até a superfície efetuando o registro das propriedades referentes ao sensor usado (WEBBER, 2008).

3.9 Geoprocessamento

O SIG - Sistema de Informação Geográfica ou GIS - *Geographic Information System* (Figura 3.18) é uma tecnologia que tem experimentado grandes avanços na atualidade. A disponibilidade de informação geográfica, assim como a tecnologia de GPS - *Global Positioning System* tem evoluído no mesmo passo, tornando o geoprocessamento ferramenta fundamental.



Fonte: Arquivo Interno Vale 2013

Figura 3.18 – Ciclo das informações no processo de GIS.

A partir da integração de fotografias aéreas, imagens de satélite, mapas topográficos, geológicos e geomorfológicos, banco de dados, outras informações georreferenciadas, e

interpretação de mapas temáticos, a equipe técnica da Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos gera informação especializada que auxiliará em problemas ou apresentará alternativas para a tomada de decisões nas áreas de exploração e pesquisa mineral.

O *software* utilizado para o georeferenciamento de imagens e furos de sondagem atualmente pela Gerência de Exploração é o ArcGIS (Figura 3.19) desenvolvido pela ESRI® que tem alto nível de modelagem de dados geográficos para representação espacial e informação sobre as feições, trabalhando como dados vetoriais ou matriciais. Suporta uma implementação de modelos de dados relacionais e orientado a objetos, permitindo a integração de dados espaciais e alfanuméricos.

O ArcGIS é composto por três aplicativos básicos, sendo que a cada um, é atribuída uma função específica e complementar no desenvolvimento de atividades relacionadas com as informações inseridas. Desta forma, tem-se ArcMap®, ArcToolbox® e o ArcCatalog® (ARCGIS, 2006) conforme Figura 3.19.



Fonte: Arquivo Interno Vale 2014.

Figura 3.19 – Telas do ArcMap, ArcCatalog e ArcToolbox.

3.10 Fatores que influenciam no desempenho da sondagem

3.10.1 Litologia

A classificação geológica dos tipos de rocha perfurada no processo de sondagem está baseada na sua forma química e estrutural. Alguns aspectos devem ser analisados e levados em consideração na escolha do equipamento com base na litologia atravessada:

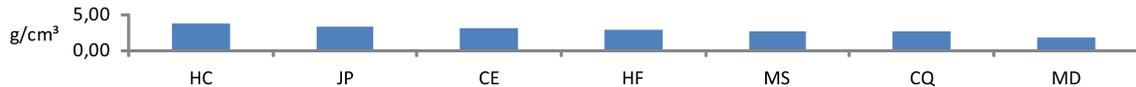
- a dureza da rocha está relacionada aos minerais nela contidos, geralmente pode se utilizar a escala relativa de *Mohs* (CARNEIRO, 2009) como base de referência;
- as camadas de rochas macias podem se mostrar mais fáceis de perfurar, comparando com as rochas mais duras, no entanto a rocha macia se torna mais difícil para se recuperar.
- durante o processo de sondagem o material perfurado pode mudar drasticamente entre um contato litológico e outro, desta forma, se torna necessário analisar a necessidade da troca de coroa utilizada no ferramental de perfuração.
- cada tipo de rocha deve ser considerado como uma classe com diversas variáveis que afetam a sua perfuração.

3.10.2 Densidade

O método de deslocamento de volume (DV) consiste em calcular a densidade a partir da relação entre o peso da amostra e o deslocamento de água provocado pelo mergulho da amostra em recipiente graduado. Este método geralmente é utilizado para as rochas compactas. As densidades utilizadas no modelo de Serra Sul estão resumidas na Tabela 3.2, sendo utilizado o método DV.

Tabela 3.2 – Valores de densidade das principais litologias encontradas em S11D.

Litologia	Cod. Lito	Quantidade de Amostras	Densidade Natural (g/cm ³)*
Hematita Compacta	HC	29	3,81
Jaspilito	JP	1.199	3,36
Canga Estrutural	CE	168	3,30
Hematita Friável	HF	56	2,98
Máfica Sã	MS	481	2,80
Canga Química	CQ	3	2,79
Máfica Decomposta	MD	123	2,00



(*)_ Classificação / ordenação [Z/A - do maior para o menor valor]

Fonte: Modificado de (Relatório de Avaliação de Recursos de Minério de Ferro Jazida de Serra Sul-Alvo S11-Corpos C e D, 2008).

3.10.2.1 Fatores que afetam a densidade em laboratório

Diversos fatores contribuem com as variações dos valores de densidade entre eles: a gênese, composição mineralógica, porosidade, percentual de água contida na rocha e condição topográfica. O controle da densidade da rocha pode ser realizado através de três fatores: a densidade dos grãos (P_g) que formam os minerais das rochas, a porosidade (ϕ) da rocha e a água natural (P_{H_2O}) contida na rocha (SOARES, 2013).

P_{RX} = Fator do controle de densidade da rocha;

P_g = Densidade do grão;

ϕ = Porosidade da rocha;

P_{H_2O} = Água natural;

$$P_{RX} = P_g (1 - \phi) + P_{H_2O} (\phi)$$

(Equação de Athy)

O valor da densidade pode ser influenciado pela litologia, total de ferro contido na rocha, distribuição granulométrica e a umidade do material (ISO3852, 2007).

3.10.3 Porosidade

A relação entre o volume de poros e o volume total do material analisado pode ser definida como porosidade, uma propriedade física dividida em dois tipos fundamentais nos materiais terrestres: primária e secundária (PEREIRA, 2013).

- Porosidade primária: é gerada juntamente com a deposição do sedimento e formação da rocha, sendo caracterizada nas rochas sedimentares pelos espaços entre os grãos.
- Porosidade secundária: por sua vez, se desenvolve após a formação das rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares, por fraturamento ou falhamento durante sua deformação (porosidade de fraturas).

3.10.4 Água natural contida na rocha

A ação geológica da água é um conjunto de processos que tem a capacidade de causar modificações nos materiais terrestres, transformando minerais, rochas e feições terrestres, onde o principal fator que determina a disponibilidade de água subterrânea é a permeabilidade, porque ela tem a capacidade de permitir o fluxo de água entre os poros da rocha. Esta propriedade depende do tamanho dos poros e da conexão entre eles (Tabela 3.3). “A zona de ocorrência da água subterrânea é uma região onde é iniciada a maioria das formas de relevo, pois a água subterrânea é o principal meio das reações do intemperismo químico”, (TEIXEIRA *et al.*, 2003).

Tabela 3.3 – Volume de poros e tamanho de partículas em sedimentos.

Material	Tamanho das Partículas (mm)	Porosidade (%)	Permeabilidade
Cascalho	7 a 20	35,2	Muito Alta
Areia grossa	1 a 2	37,4	Alta
Areia fina	0,3	42	Alta a Média
Siltes e Argila	0,04 a 0,006	50 a 80	Baixa a Muito Baixa

Fonte: Modificado de (Teixeira, 2003).

Desta forma, a água contida nas formações interfere nos valores de densidade, causando alterações em relação ao material seco, pois pode transformar (solubilizar, por exemplo) os minerais contidos nas rochas alterando sua composição química primária e,

consequentemente, seu valor de densidade. A água tem densidade em torno de 1g/cm^3 , bem mais baixa que a da rocha, e sua presença pode acarretar variações nos valores médios de densidade do meio (REICHARDT, 1987).

3.10.5 Condição topográfica

Serra Sul se caracteriza por um relevo montanhoso (Figura 3.20 e Figura 3.21), com altitudes médias de $783\text{ m}^{[5]}$ acima do nível do mar. A região é drenada pela rede hidrográfica do rio Itacaiúnas, afluente do rio Tocantins, e pelo rio Parauapebas. Grande parte do platô é coberta por canga de minério, que pode ser dividida em canga estrutural e canga química.

O cadastramento topográfico dos furos de sondagem na mina de S11D é realizado com base no DATUM SAD 1969, Zona 22S, podendo ser utilizado o DATUM altimétrico Imbituba ou PD-04, o qual existe uma diferença de 5,93 a menos no PD-04 em relação ao Imbituba:

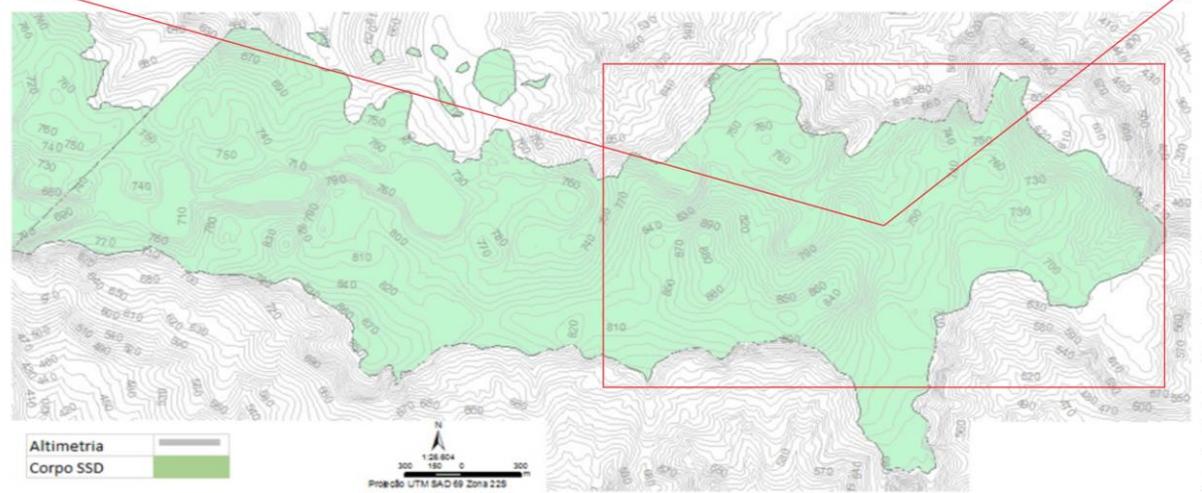
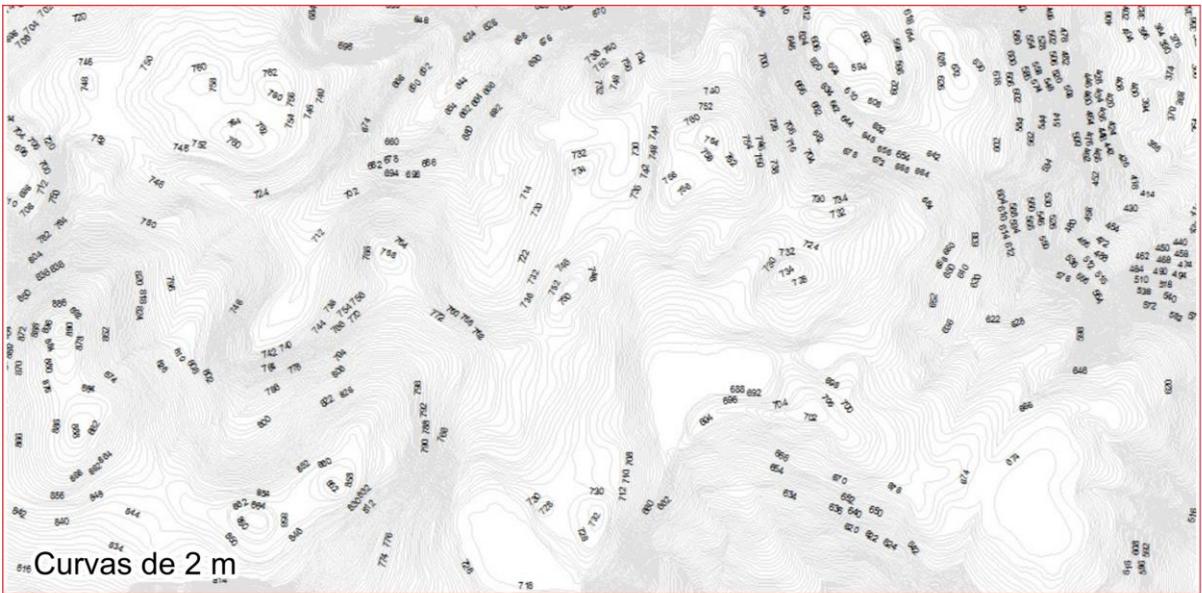
- Imbituba: Corresponde ao nível médio dos mares (NMM) determinado por uma marégrafo instalado no Porto de Imbituba – SC, utilizado com origem para toda rede altimétrica nacional à exceção do estado do Amapá (Marégrafo de Porto Santana), que ainda não está conectada ao restante do País (IBGE, 2015).
- PD-04: Marco instalado pela Vale, transportado por nivelamento geométrico a partir do marégrafo de São Luís – MA.

^[5] Referencial altímetro UTM Imbituba com base no cadastramento dos furos topográficos.



Fonte: Arquivo Interno Vale 2013

Figura 3.20 – Visão aérea de um trecho do platô de Serra Sul.



Fonte: Arquivo Interno Vale. Auricliene Cardoso 2015

Figura 3.21 – Linhas topográficas da mina de SSD.

4. MEDIDA DE DESVIO DE FURO DE SONDAGEM

O posicionamento do furo de sondagem em profundidade é tão importante quanto o seu levantamento topográfico em superfície, desta forma se torna necessária a utilização de técnicas que obtenham dados confiáveis de seu posicionamento tridimensional. Apenas sob condições ideais a inclinação e a direção projetadas em um ângulo reto seriam atingidas em um furo de sondagem (Figura 4.1).

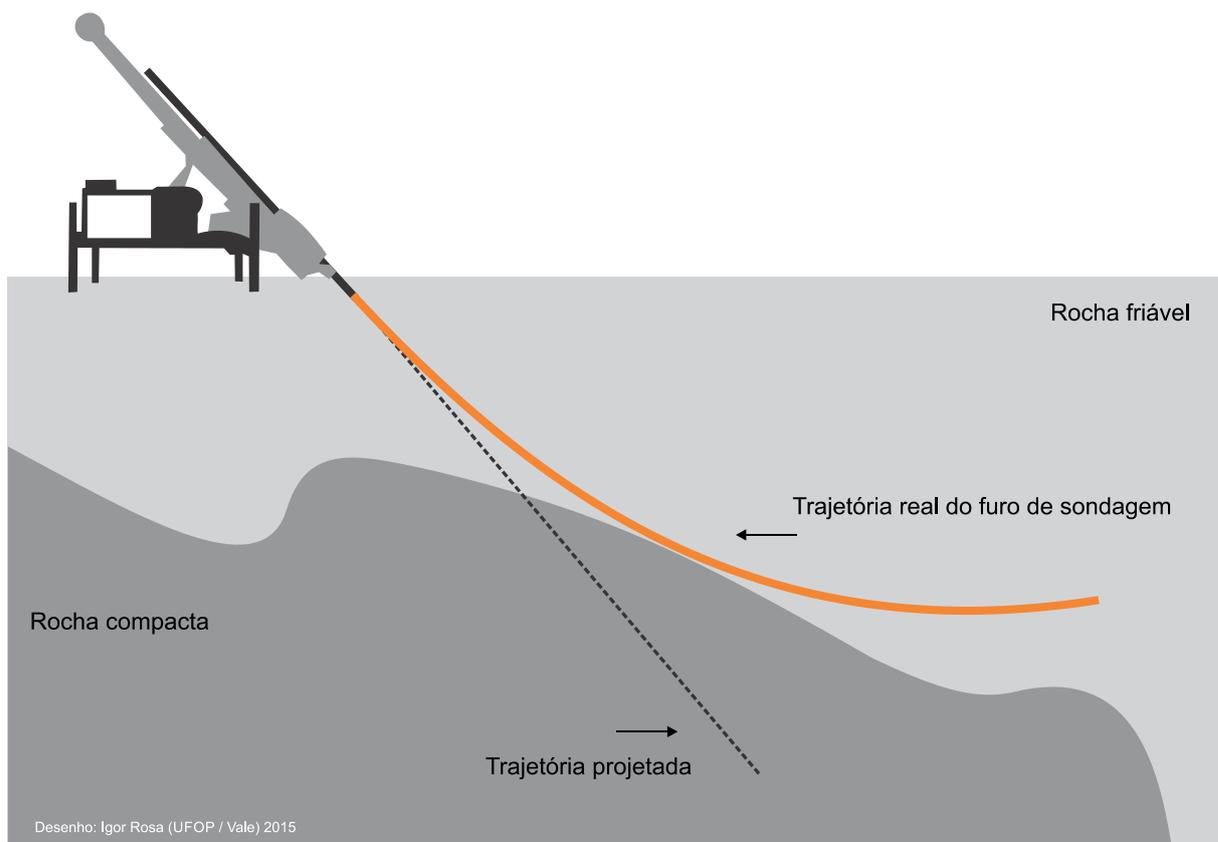


Figura 4.1 – Perfil de um furo de sondagem projetado e executado.

As ferramentas de medida de desvio em furos de sondagem vêm se tornando cada vez mais precisas, exatas, flexíveis e com maior autonomia. O custo por metro perfilado relacionado à

metragem perfurada está na ordem de 1,66%, sendo que nos últimos 5 anos houve uma queda de 2% em relação ao ano de 2010 (Figura 4.2). O tempo médio de uma perfilagem dentro do processo de sondagem representa 0,74%, tempo muito similar ao gasto nas realizações de manutenção preventiva do equipamento de sondagem em campo, tempo que está na ordem 0,70%.

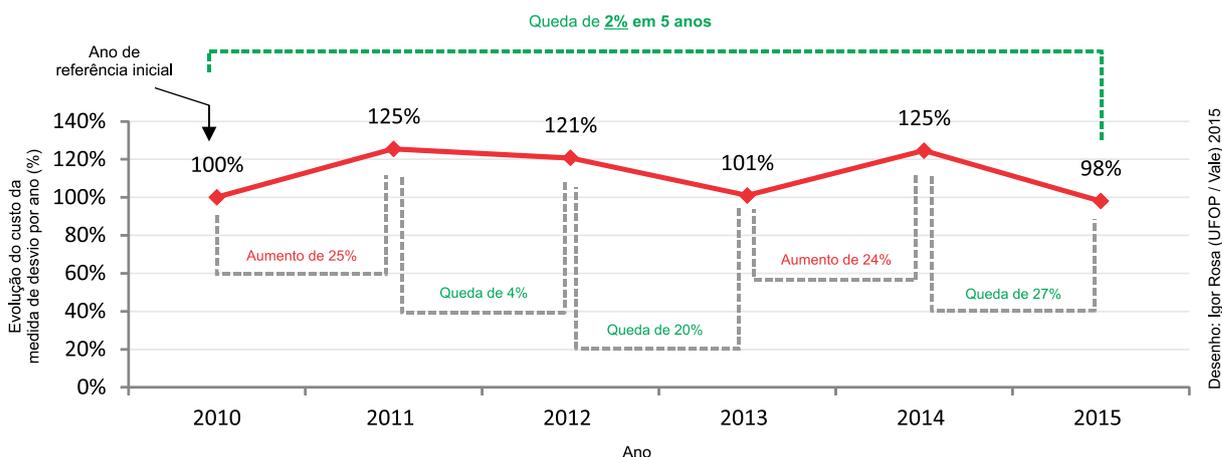


Figura 4.2 – Evolução do custo por leitura a cada 3 metros nos últimos 5 anos.

Com o avanço tecnológico hoje é possível fazer diversos levantamentos e coletas de dados relacionados à trajetória de furo de sondagem. Entretanto até o início do ano 2000, uma das técnicas mais utilizadas na obtenção de trajetória, era descer um equipamento com características de uma bússola no interior do furo, marcando a profundidade, direção e inclinação ponto a ponto, gerando assim um perfil de trajetória aproximado. Esse método era conhecido como *Tropari*. Embora o conceito dessa metodologia seja utilizado até os dias de hoje, o *Tropari* se tornou obsoleto devido o tempo de obtenção das leituras, precisão dos dados gerados e influência magnética em depósitos de ferro.

4.1 Equipamentos de medida de desvio

Diversos equipamentos de medida de desvio podem ser encontrados no mercado nacional e internacional, entretanto cada um possui uma característica específica dependendo do fornecedor e objetivo desejado (Tabela 4.1), neste estudo as marcas dos equipamentos e fornecedores foram suprimidas. O custo de operação e manutenção dos equipamentos de medida de desvio pode variar de modelo para modelo, sendo necessária uma avaliação prévia com base na campanha de sondagem programada para aquisição do que melhor se encaixa

junto à operação. Os três equipamentos mais recentemente utilizados nas medidas de desvio na mina de Serra Sul corpo D foram:

- D01 – Equipamento direcionado apenas para furos inclinados;
- M01 – Equipamento direcionado apenas para furos inclinados;
- R01 – Equipamento direcionado para furos inclinados e verticais;

Tabela 4.1 – Principais características por equipamento.

Descrição		Equipamento		
		R01	D01	M01
Dimensões	Diâmetro (mm)	32	40	44
	Cumprimento (mm)	807	4000	1200
Peso	(kg)	1,1	20	Não Informado
Temperatura de operação	° C	0 a +70	-10 a +60	-20 a +65
Fonte de energia	-	Bateria recarregável de alta capacidade NiMH	Bateria recarregável de alta capacidade NiMH	Pacote de baterias alcalina industriais
Tempo de operação	Horas	8	400	Não Informado
Precisão de leitura	DIP	+/- 0,2°	+/- 0,1°	Não Informado
	AZ	+/- 0,5°	+/- 0,1°	Não Informado
Realização de leituras	Furos Verticais	Sim	Não	Não
	furos Inclinados	Sim	Sim	Sim
Referência da leitura obtida	Relativa	Sim	Sim	Sim
	Absoluta	Não	Não	Não

Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

* Dados obtidos através do manual do equipamento apresentado em campo pela equipe de medida de desvio.

Equipamento D01

A ferramenta D01 (Figura 4.3) consiste de dois sistemas de medida independentes. Três acelerômetros e quatro medidores de tensão são usados para calcular a inclinação e mudança de azimute. Além disso, o D01 registra e armazena o vetor gravidade, a temperatura, e a capacidade da bateria.

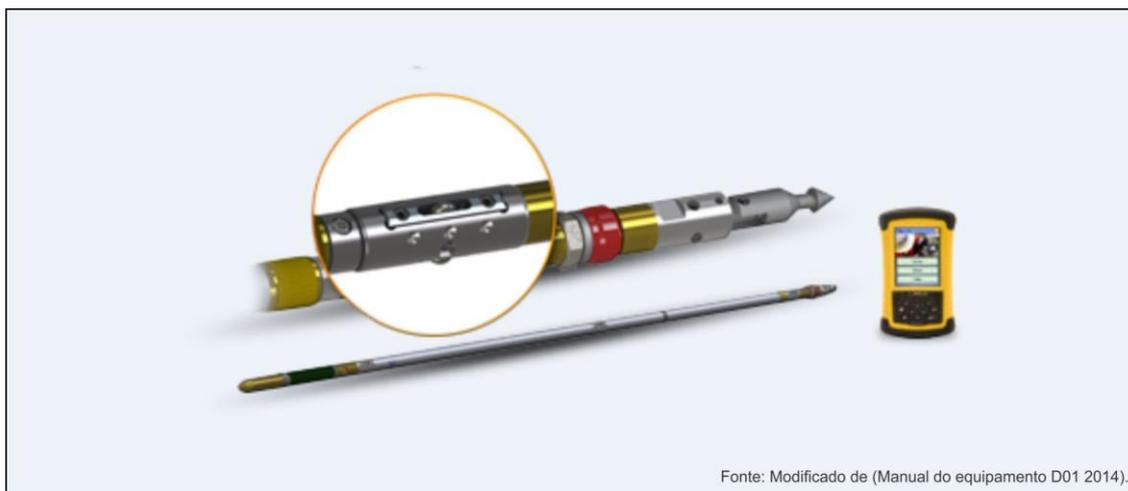


Figura 4.3 – Imagem ilustrativa do equipamento D01.

Equipamento M01

O M01 (Figura 4.4) possui três acelerômetros um para cada coordenada espacial, diâmetro externo da haste de 44 milímetros, podendo ser utilizado em uma variedade de aplicações. Pode ser executado em hastes, ou bombeado para dentro do furo com centralizadores opcionais disponíveis para a medição dentro de furo de grande diâmetro. A ferramenta não requer calibração, cálculos manuais ou correções, reduzindo o risco de erro humano.

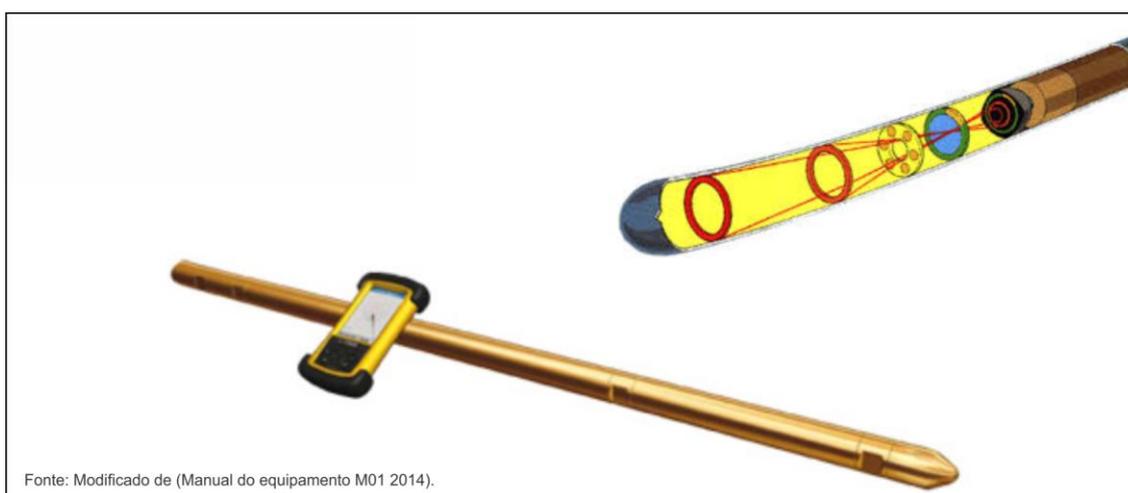


Figura 4.4– Imagem ilustrativa do equipamento M01.

Equipamento R01

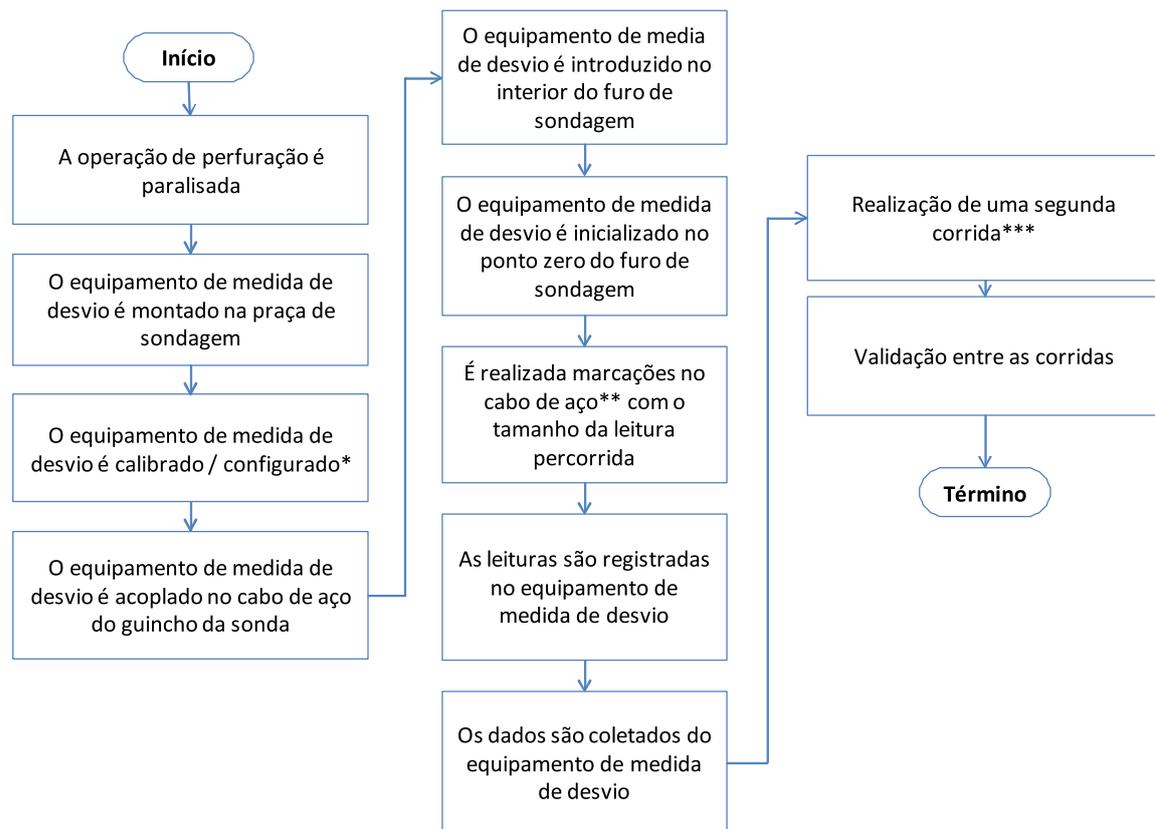
O equipamento R01 (Figura 4.5) fornece dados de azimute, mergulho e temperatura registrados em sua memória *onboard* que podem ser transferidos pela tecnologia *Bluetooth*. Os relatórios podem ser executados através de qualquer sistema operacional, inclusive o *Windows*[®], exportando em formatos [xls, dxf, asccll e ods]. O equipamento R01 não é afetado por interferências magnéticas e pode ser usado dentro das hastes de série H e N sendo possível realizar medidas em furos inclinados e verticais.



Figura 4.5 – Imagem ilustrativa do equipamento R01.

4.2 Execução das medidas de desvio

O processo de operação das medidas de desvio nos furos de sondagem inicia-se após confirmação da equipe técnica de fiscalização de sondagem, que considera alguns critérios básicos relacionados à inclinação do furo, profundidade final, situação da coluna de perfuração e fatores de segurança na praça de sondagem. O fluxo resumido de procedimentos para a medição de desvio se encontra na Figura 4.6. Caso um ou mais critérios não possibilitem a operação da medida de desvio, a fiscalização faz uma segunda avaliação sobre os impactos da metragem não perfilada. Em algumas situações se torna necessária a realização de um novo furo de sondagem.



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

(*)_ Alguns equipamentos necessitam ser calibrados conforme manual do fabricante.

(**)_ Caso não exista um contador de cabo a marcação é realizada de forma manual no cabo de aço.

(***)_ Alguns equipamentos podem ser programados para realizar uma leitura descendo e outra subindo.

Figura 4.6 – Fluxo resumido do processo para realização das medidas de desvio.

O processo de perfuração é paralisado com as hastes no interior do furo, a ferramenta de medida de desvio é montada e, caso necessário, é calibrada conforme orientação do fabricante. O cabo de aço do guincho *wireline* é acoplado na ferramenta de medida de desvio e a ferramenta é posicionada no interior do furo.

Dependendo do tipo de leitura (furo vertical ou inclinado), pode ser necessário fazer uma leitura de início. Nesse caso, para furos verticais, onde o equipamento fará uma leitura de um ponto levantado pela topográfica próximo a boca do furo, esse ponto servirá de orientação azimutal para o equipamento durante as leituras realizadas. Caso não haja um contador de cabo, o mesmo é marcado com um pincel ou *spray* a cada 3 metros, em geral. Após a realização da primeira corrida é realizada a segunda corrida com o propósito de validação da precisão das leituras geradas.

O operador das medidas de desvio pode executar várias corridas, porém, caso apresente inconsistências relevantes entre a validação de duas ou mais corridas, o processo é abortado e o equipamento é direcionado para manutenção.

4.3 Definição do posicionamento das leituras

O posicionamento espacial X, Y e Z dos pontos medidos pelos equipamentos de medida de desvio é calculado basicamente utilizando a metragem percorrida, ângulo de inclinação, ângulo de direção e referência do ponto anterior (Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9).

As leituras medidas pela grande maioria dos equipamentos de medida de desvio são de caráter relativo, ou seja, depende da posição da leitura anterior.

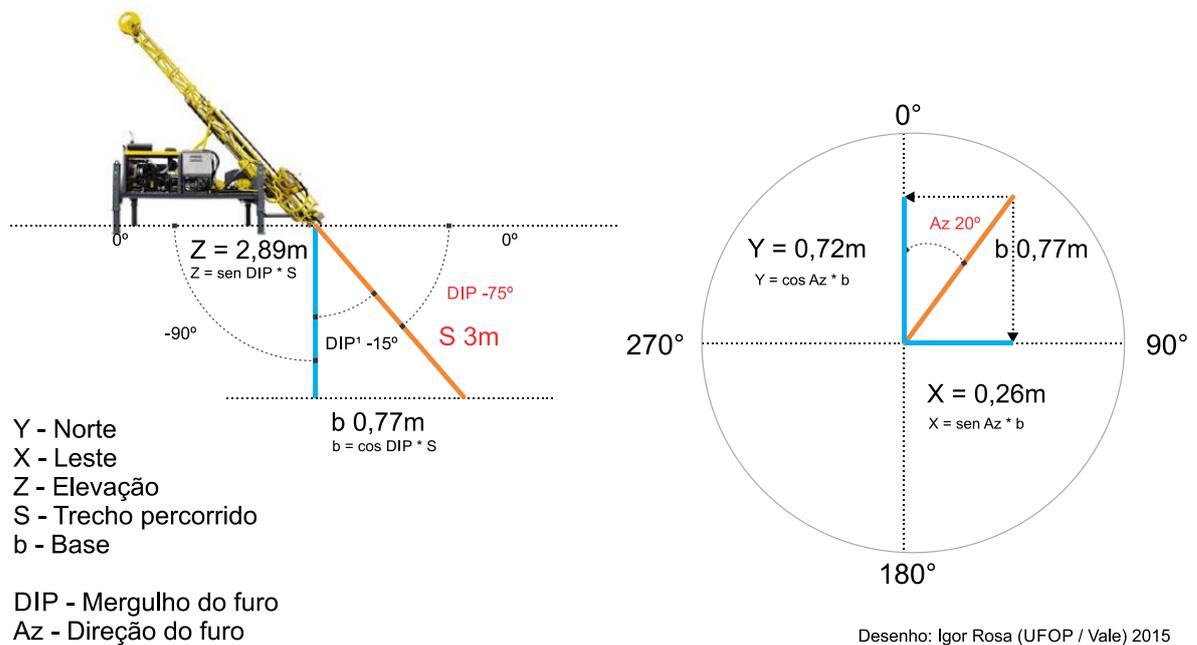
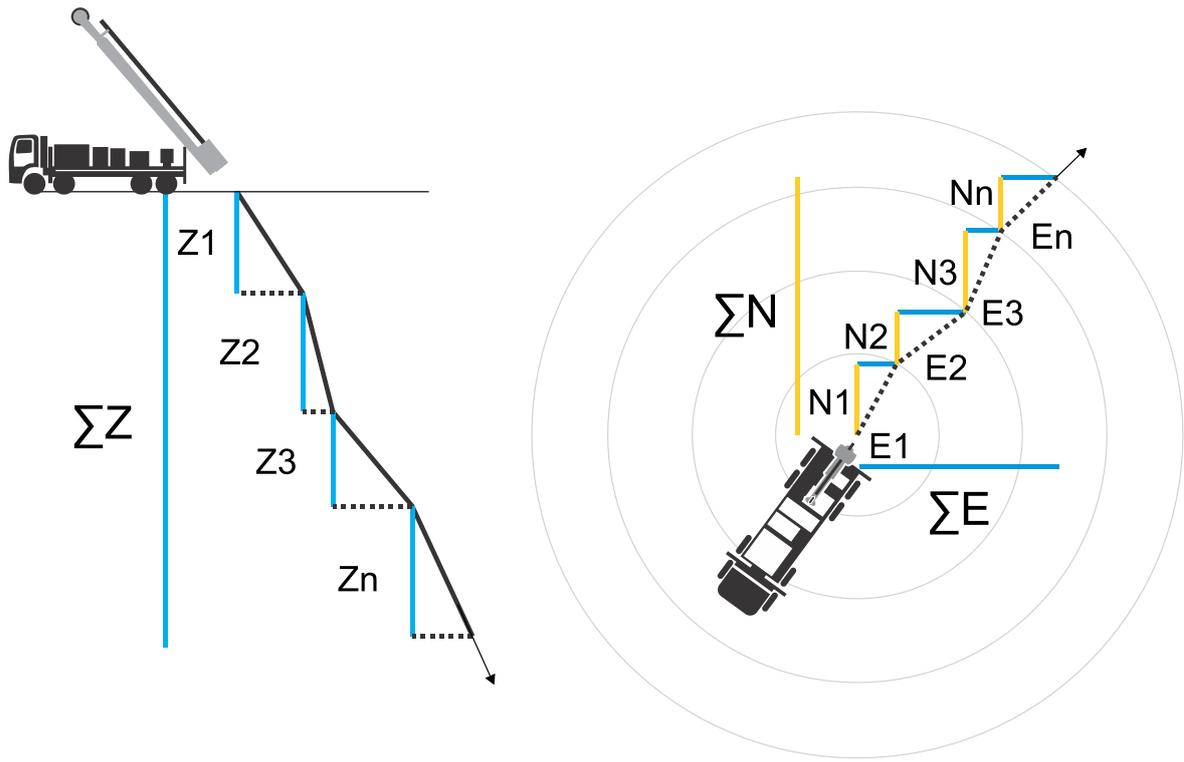


Figura 4.7 – Posicionamento espacial X, Y e Z.

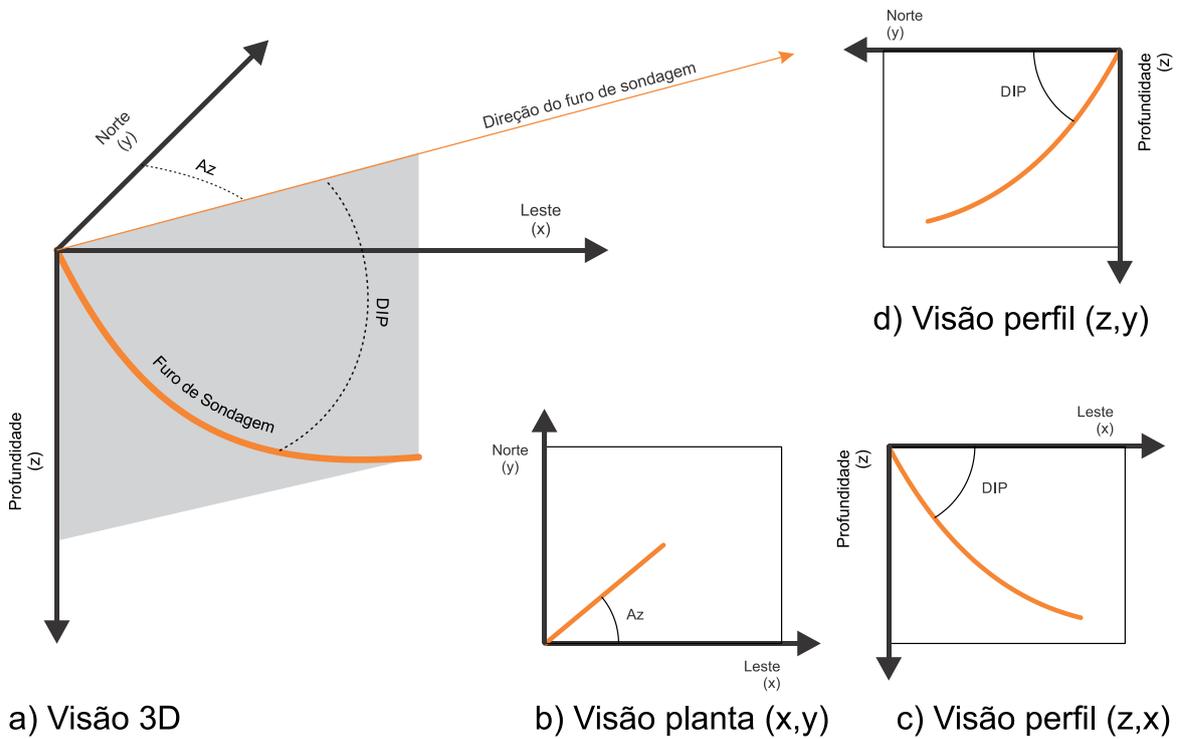


a) Visão de Perfil (Z,N)

b) Visão planta (N, E)

Figura 4.8 – Esquema ilustrativo das projeções 3D.

Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015



a) Visão 3D

b) Visão planta (x,y)

c) Visão perfil (z,x)

d) Visão perfil (z,y)

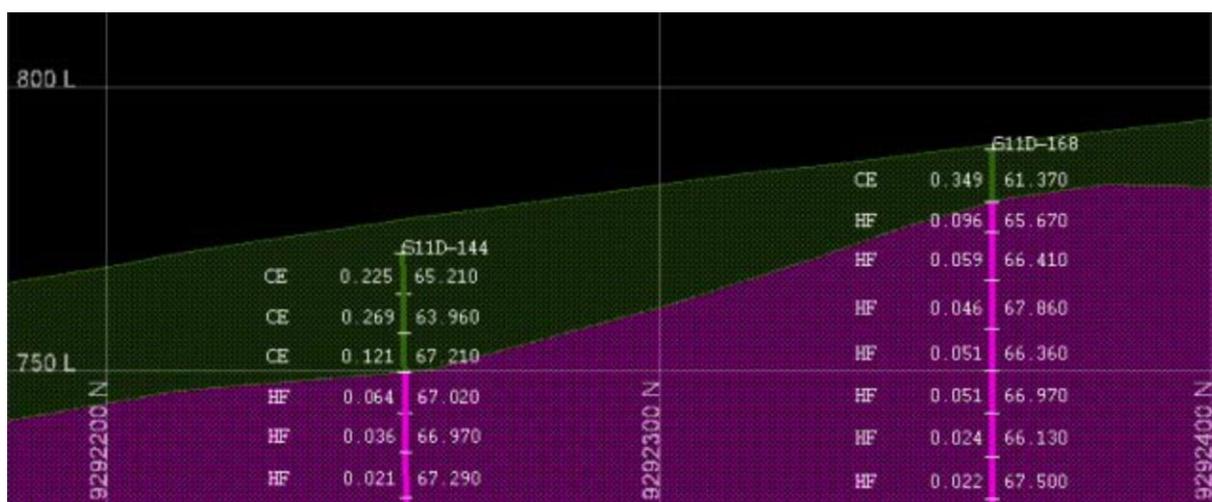
Figura 4.9 – Projeção tridimensional de um furo de sondagem.

Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

4.4 Instalação da sonda na praça de sondagem

A programação de furos de sondagem é realizada levando em consideração alguns critérios técnicos que podem ser divididos em fatores geológicos e operacionais. Os fatores geológicos (Figura 4.10), basicamente são os litotipos atravessados, mergulho e direção das camadas geológicas, recuperação da massa prevista e nível de água. Já os fatores operacionais, estão relacionados à escolha dos equipamentos de perfuração e seus acessórios, considerando a capacidade de perfuração por equipamento, posicionamento dentro da praça de sondagem, diâmetro do testemunho de sondagem, produtividade média e segurança operacional.

Os fatores geológicos e operacionais devem ser trabalhados para se encontrar o equilíbrio visando o objetivo desejado no momento do planejamento da sondagem, sendo que a limitação de um desses fatores pode ou não inviabilizar o êxito da perfuração.



Fonte: Modificado de (Relatório de Avaliação de Recurso S11D 2008).

Figura 4.10 – Exemplo de uma seção geológica vertical.

Para uma programação de sondagem com furos com mergulho de -90° é necessário um equipamento que realize medidas de desvio em furos verticais, porém a disponibilidade desse tipo de equipamento é mais limitada comparando com aqueles que realizam medidas em furos inclinados, e por consequência, pode ser mais onerosa sua aquisição e complexa a execução das medidas de desvio.

Desta forma, algumas medidas são tomadas para a realização do furo de sondagem, buscando o objetivo geológico desejado e a execução da medida de desvio. Uma dessas medidas

adotadas é a realização de furos com mergulho de -85° , pois visa impactar da menor forma possível a execução do furo com foco em seu objetivo e atende à limitação dos equipamentos que não realizam leituras em furos verticais.

Entretanto, o risco associado a essa prática torna-se real quando o furo durante o seu desenvolvimento tende a se posicionar verticalizado (Figura 4.11). Nesse momento o aparelho perde a orientação de sentido azimutal, gerando uma inconsistência de leitura nos dados obtidos.

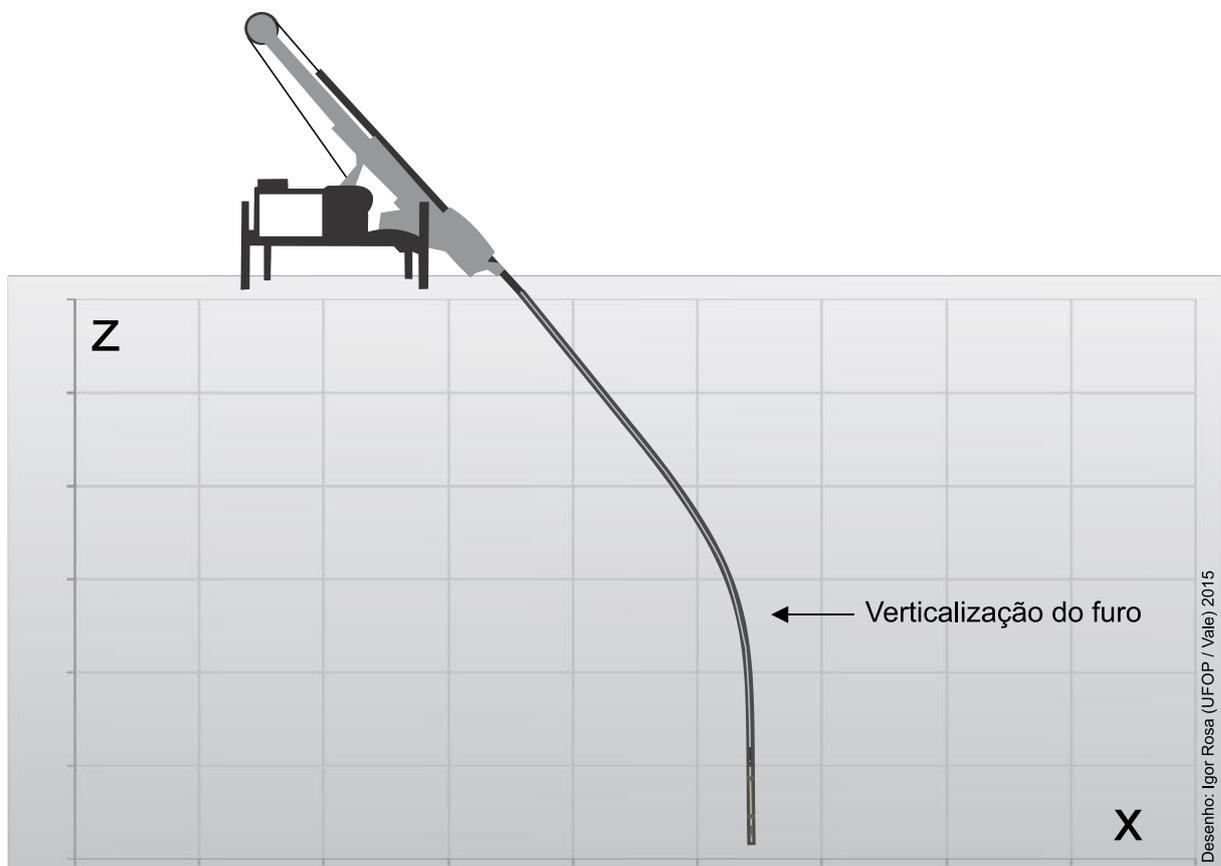


Figura 4.11 – Verticalização de um furo programado inclinado.

O descarte dos dados referente à leitura da medida de desvio de um furo de sondagem, considerando o erro de orientação do equipamento em função da verticalização do furo de sondagem, deve ser realizado após uma análise detalhada, pois durante o intervalo que o furo esteja vertical pode se considerar as leituras medidas e após o intervalo da verticalização, ou seja, quando o furo tomar direção e passar a ser inclinado, essas leituras poderão ser descartadas.

A realização de duas ou mais corridas no processo de validação das medidas de desvio dos furos de sondagem se torna necessária para conferir a precisão do equipamento. Nessa atividade é estipulado um limite médio aceitável que pode ser entre 1% ou 2% da distância entre leituras, estando esse percentual relacionado com a distância percorrida pela leitura, geralmente validada a cada 45 metros mais a leitura final (Figura 4.12). Em um furo de 150 metros é calculada a distância de afastamento entre as leituras A e B, sendo a distância percorrida os primeiros 45 metros, o afastamento entre os pontos das leituras considerando o limite de 2%, deverá ser no máximo 0,9 m.

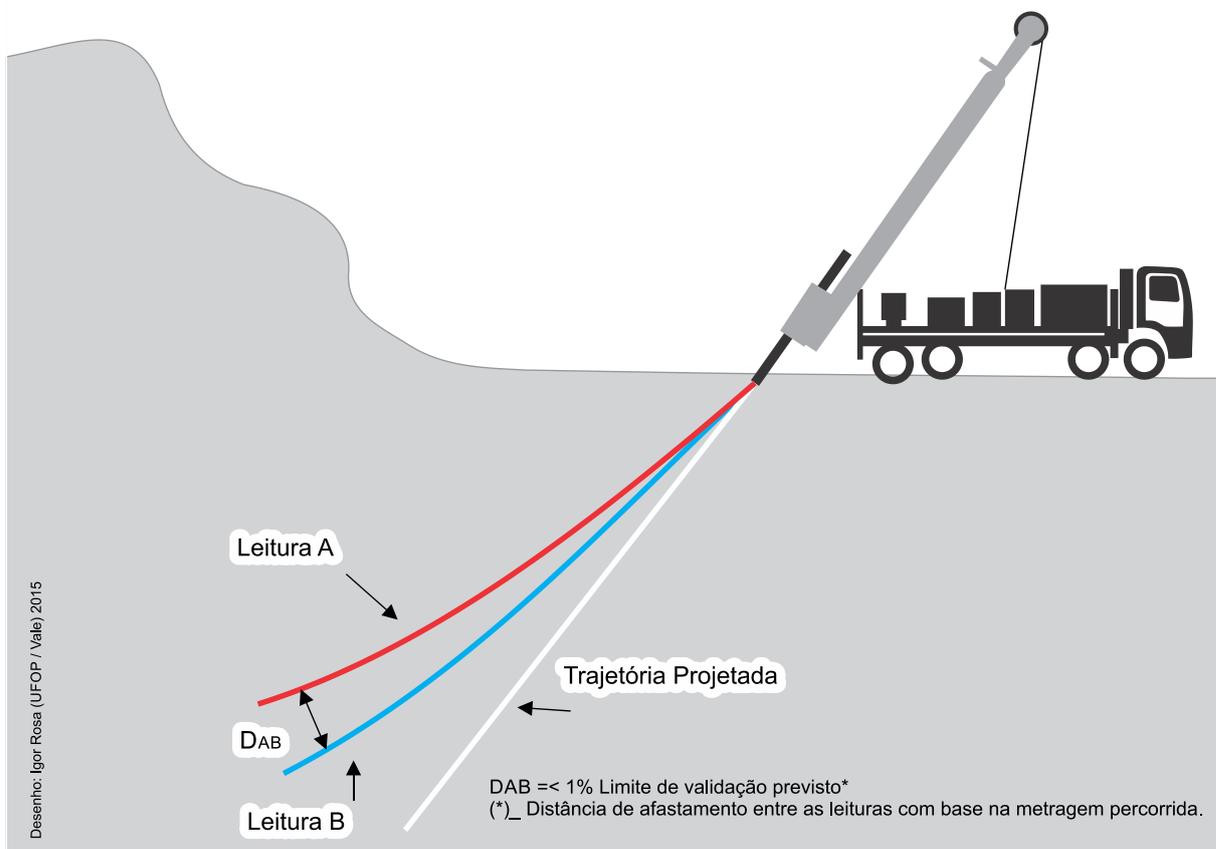


Figura 4.12 – Limite de validação entre leituras A e B.

O ângulo de inclinação da torre da sonda, (ou seja, o mergulho de perfuração desejado), influencia diretamente no processo de instalação do equipamento de sondagem e seus acessórios na praça de operação. Pois em um furo programado com direção azimutal e mergulho inferior a -90° (Figura 4.13, Figura 4.16 e Figura 4.18), o posicionamento da sonda estará condicionada a direção azimutal do furo, não sendo possível rotacionar a sonda com base no eixo vertical do furo de sondagem. Essa rotação da sonda se torna necessária em

situações que a praça de operação oferece limitações relacionadas às dimensões autorizadas (largura e comprimento). Outro ponto está relacionado à declividade do terreno, pois dependendo do posicionamento da sonda em uma praça de operação com alto índice de declividade a instalação pode se tornar inviável, porém se a sonda for rotacionada em 90° em relação ao eixo vertical da boca do furo a instalação pode ser viável.



Fonte: Arquivo Interno Vale. Auricilene Cardoso (2014)

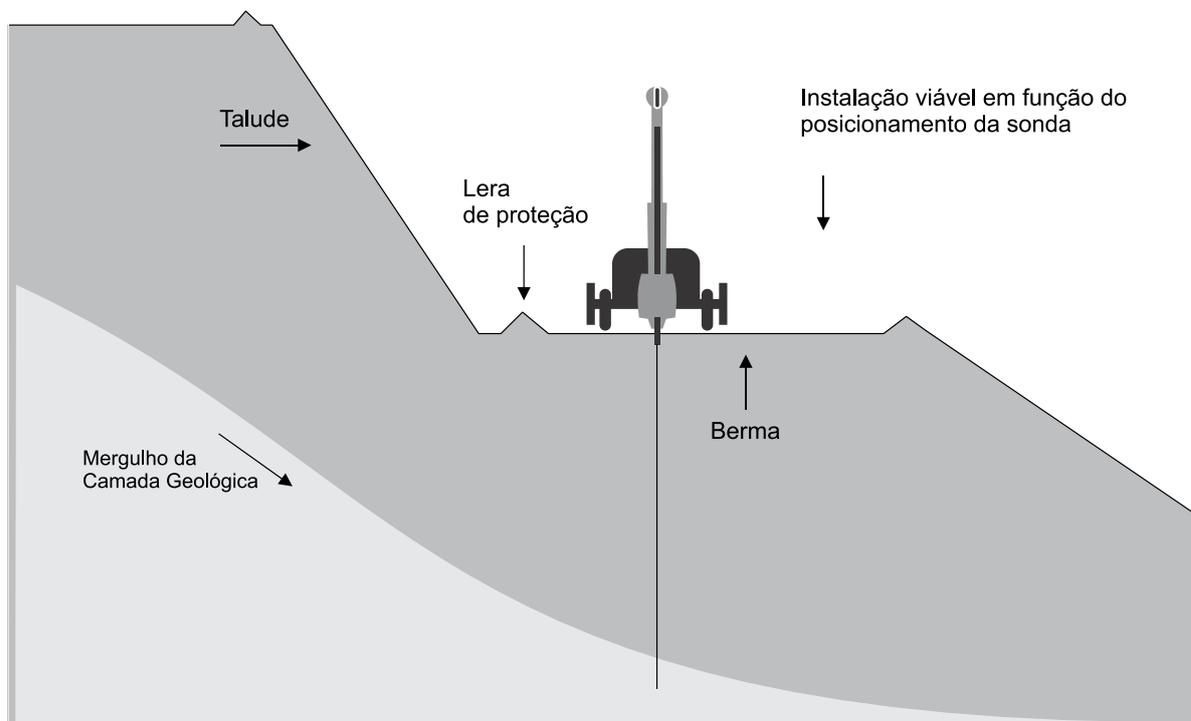
Figura 4.13 – Instalação de uma sonda com DIP 75° / Az 90°.

Para furos verticais a possibilidade de instalação do equipamento de sondagem na praça de operação se torna mais acessível em função do posicionamento com base no eixo vertical da boca do furo, sendo possível rotacionar a sonda para o posicionamento que melhor se encaixe na praça de operação (Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.17).



Fonte: Arquivo Interno Vale. Auricilene Cardoso (2014)

Figura 4.14 – Instalação de sonda, DIP 90° / Az NA.



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 4.15 – Instalação de sonda, DIP 90° / Az NA em área de operação de mina.

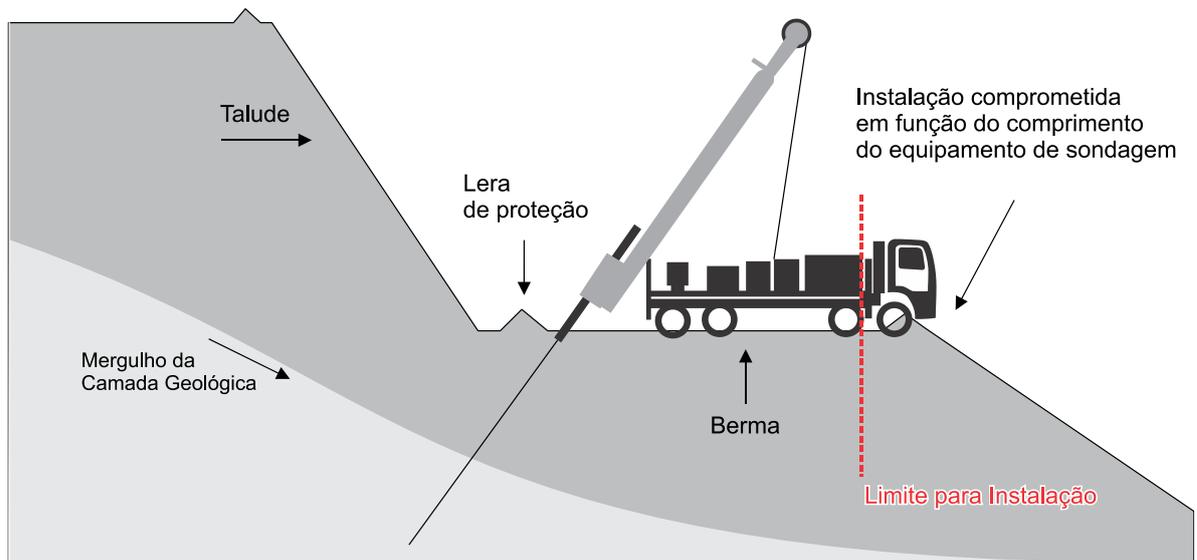


Figura 4.16 – Instalação de sonda, DIP 75° / 90° em área de operação de mina.

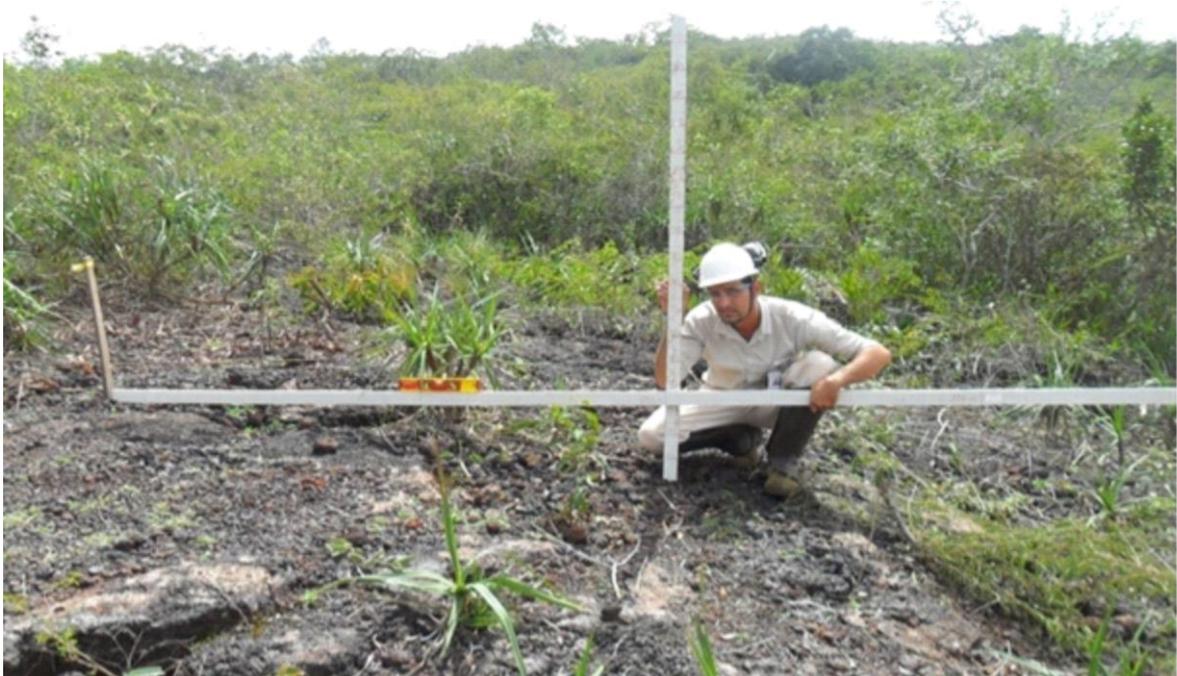


Figura 4.17 – Instalação de sonda, DIP 90° / Az NA em área de pesquisa.



Fonte: Arquivo Interno Vale. Iuri Oliveira (2014)

Figura 4.18 – Instalação de sonda, DIP 85° / Az 165° em área de pesquisa.

Para a execução de furos verticais que necessite das leituras de medidas de desvio é necessária à utilização de um equipamento específico que não perca a orientação azimutal no decorrer do furo de sondagem. Nesse caso geralmente se utiliza o Giroscópio ou equipamento similar.

Principais vantagens em executar um furo vertical:

- maior possibilidade de instalação na praça de sondagem;
- menor risco no trancamento da coluna de perfuração;
- melhor recuperação do testemunho de sondagem;
- menor tempo gasto com levantamento topográfico, pois não necessita fazer o alinhamento;

4.5 Principais fatores que influenciam o desvio do furo de sondagem

A grande maioria dos furos de sondagem para minério de ferro são projetados em profundidades considerando o ângulo de mergulho e direção inicial, ou seja, uma trajetória

retilínea independente da sua inclinação. Os furos executados com DIP -90° , em linhas gerais desviam mais que os furos inclinados, entretanto existem alguns fatores que contribuem com a direção tomada pelo furo durante a perfuração.

Considerando apenas o fator gravidade e o peso do ferramental de perfuração para descrever o desvio do furo de sondagem inclinado, encontraríamos uma trajetória côncava do ponto inicial do furo até o ponto de total verticalização (Figura 4.19). Essa trajetória é regida pelo ângulo de curvatura do ferramental de perfuração, sendo que cada fabricante pode atribuir um fator conforme material e método utilizado na fabricação da ferramenta.

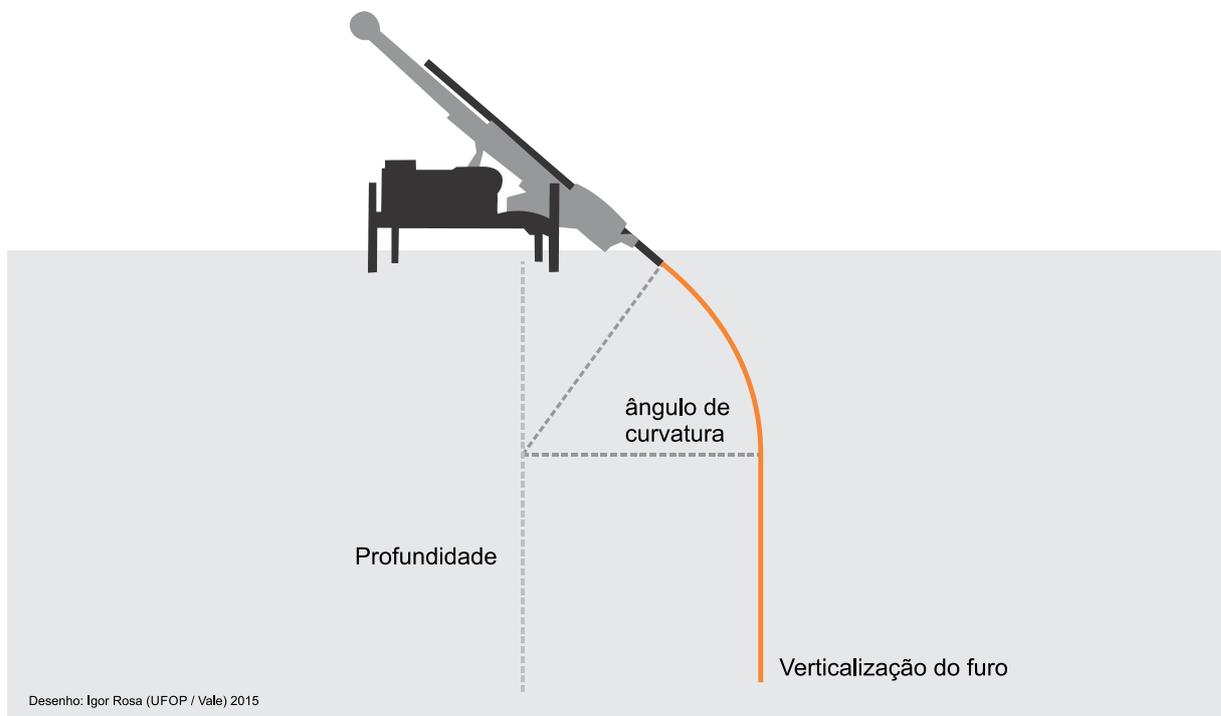
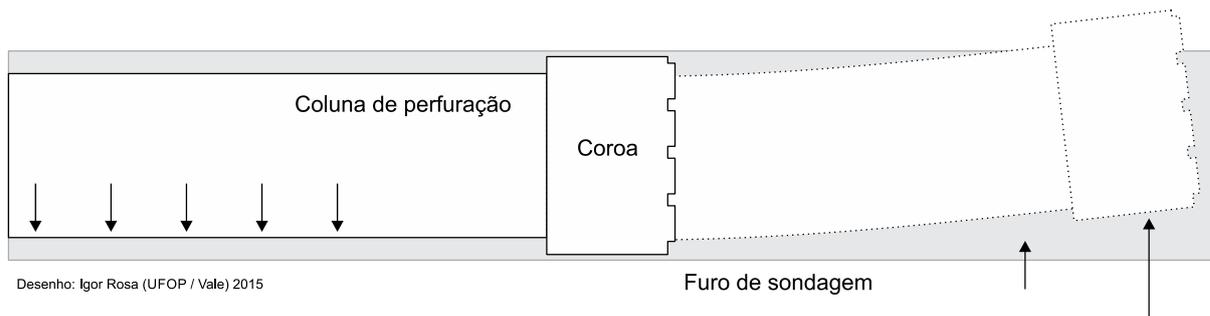


Figura 4.19 – Ângulo de curvatura do ferramental de perfuração.

Considerando apenas os fatores de inclinação e peso da coluna de perfuração, o furo de sondagem inclinado tende a desviar para cima e tanto mais quanto mais próximo da horizontal estiver (Figura 4.20). A haste tem tendência de tocar na parede inferior do furo levantando a coroa de perfuração. Se a sonda encontra rocha mais compacta no contato tem tendência a escorregar, seguindo a rocha de menor resistência.



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 4.20 – Desvio de furo inclinado considerando o peso da coluna de perfuração.

Principais fatores que contribuem para o desvio do furo de sondagem:

- diâmetro de furo de sondagem: quanto menor o diâmetro maior serão os índices de desvio;
- profundidade: quanto mais profundo o furo maior será o desvio.
- xistosidade da rocha: geralmente os furos de sondagem são programados perpendicular a camada de rocha, entretanto a tendência do desvio é acompanhar a foliação da rocha.
- pressão e rotação da coluna de perfuração: quanto maior a pressão e rotação da coluna de perfuração, maiores serão os níveis de desvio.

4.6 Fatores que influenciam na qualidade das leituras

O sentido de realização, marcação do intervalo percorrido no cabo de aço^[6], centralização do equipamento de medida de desvio no interior do furo, tempo de estabilização, fluido de perfuração, pressão d'água no interior do furo e calibração do equipamento são fatores que influenciam diretamente na qualidade dos dados e operação. A perda de confiabilidade das leituras torna-se maior quanto mais próxima à profundidade final do furo, pois a maioria dos fatores listados acima são de caráter relativo, possibilitando um acúmulo de erro no decorrer de suas realizações.

^[6] O fator de dilatação do cabo de aço em profundidade não foi considerado nesse estudo para as leituras de medida de desvio. Fator utilizado apenas na perfilagem geofísica de furos de sondagem (Tabela 5.6).

4.6.1 Sentido de realização das leituras

Dois sentidos podem ser utilizados para realização das leituras de medida de desvio, ascendente e descendente, cada uma possui suas vantagens e desvantagens durante a operação. Algumas técnicas de validações podem utilizar a combinação de ambos, realizando a primeira corrida descendo e a segunda subindo, objetivando o ganho de tempo.

Descendente:

As medidas realizadas no sentido descendente, da boca para o interior do furo de sondagem, podem ser impactadas pelo atrito do equipamento de medida de desvio com as paredes interna das hastes de perfuração gerando assim uma inconsistência na distância percorrida e folga no cabo de aço (Figura 4.21). Um método que pode ser utilizado para diminuir esse risco da não descida do equipamento seria injetar pressão com a bomba de água no interior do furo forçando o equipamento para baixo.

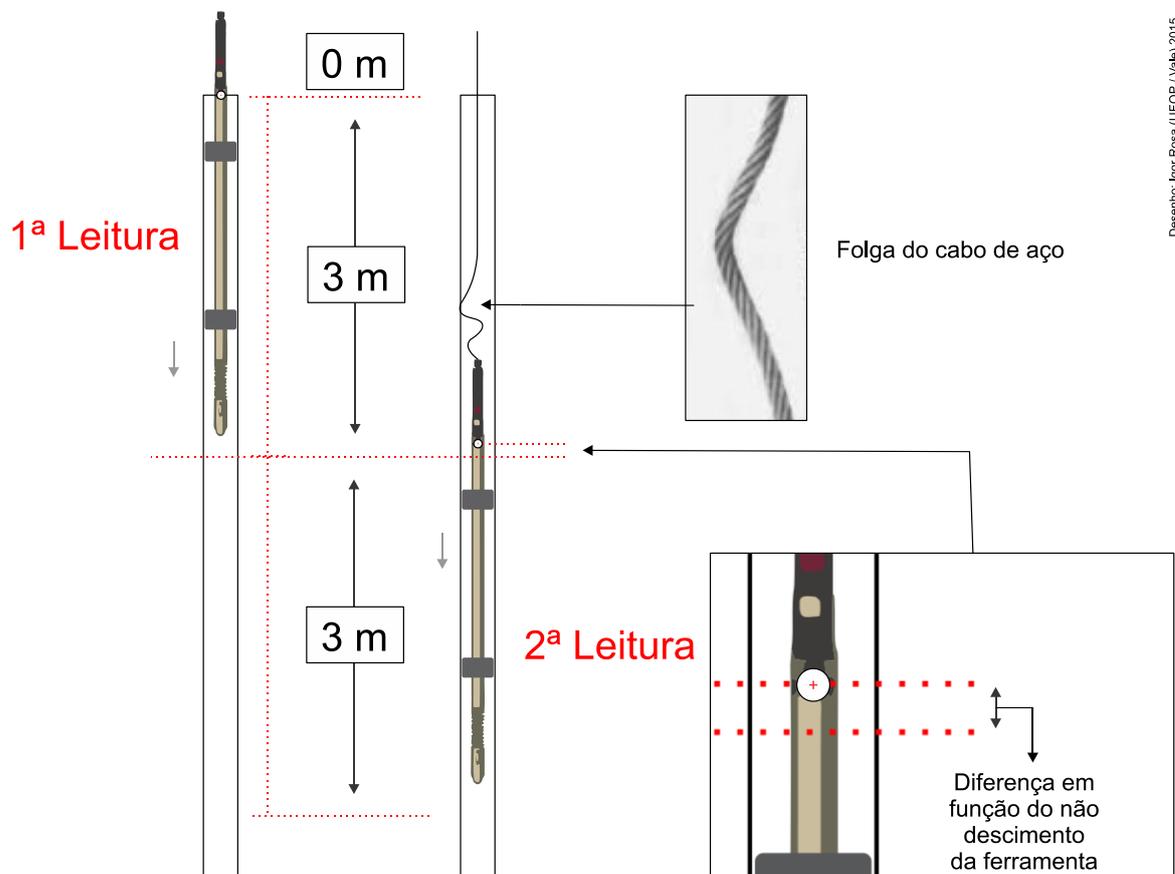


Figura 4.21 – Leituras realizadas no sentido descendente.

Fatores relacionados à descida do equipamento de medida de desvio:

- necessita de maior tempo para o equipamento descer (estabilizar);
- o tempo total gasto com todas as leituras é menor quando comparada com o método ascendente, pois é necessário descer o equipamento, sendo esse tempo de descida somado ao tempo das leituras a ser realizada;
- se existir fluido de perfuração no interior do furo, a descida do equipamento pode ser comprometida em função da densidade e viscosidade do fluido, gerando assim um obstáculo na descida do equipamento;
- se existir pressão d'água no interior do furo a descida do equipamento pode ser comprometida, pois existira uma pressão contrária à descida do equipamento;

Ascendente:

As medidas realizadas no sentido ascendente, do interior para a boca do furo de sondagem, possuem uma confiabilidade maior que a realização no sentido descendente, pois durante todo o processo o cabo e aço tende a se manter tensionado, reduzindo o risco de erro de posição das leituras (Figura 4.22).

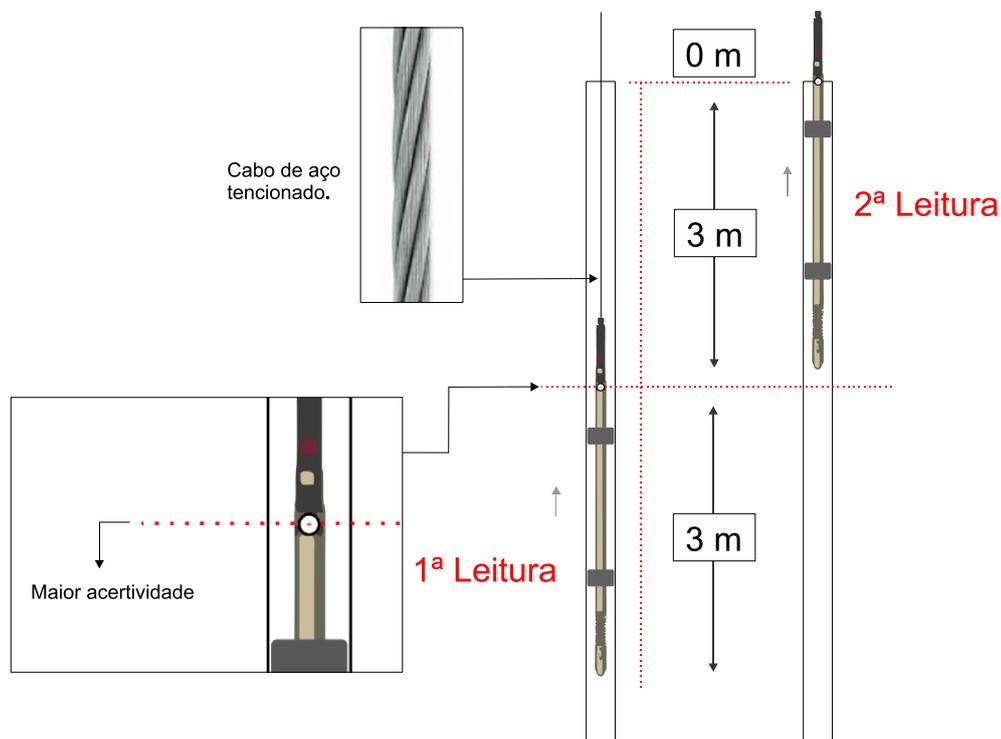


Figura 4.22 – Leituras realizadas no sentido ascendente.

O risco de diferença entre posições de leituras nesse processo pode vir a ser real quando existir uma pressão d'água no interior do furo que impulse a ferramenta de medida de desvio no sentido ascendente.

Fatores relacionados à subida do equipamento de medida de desvio:

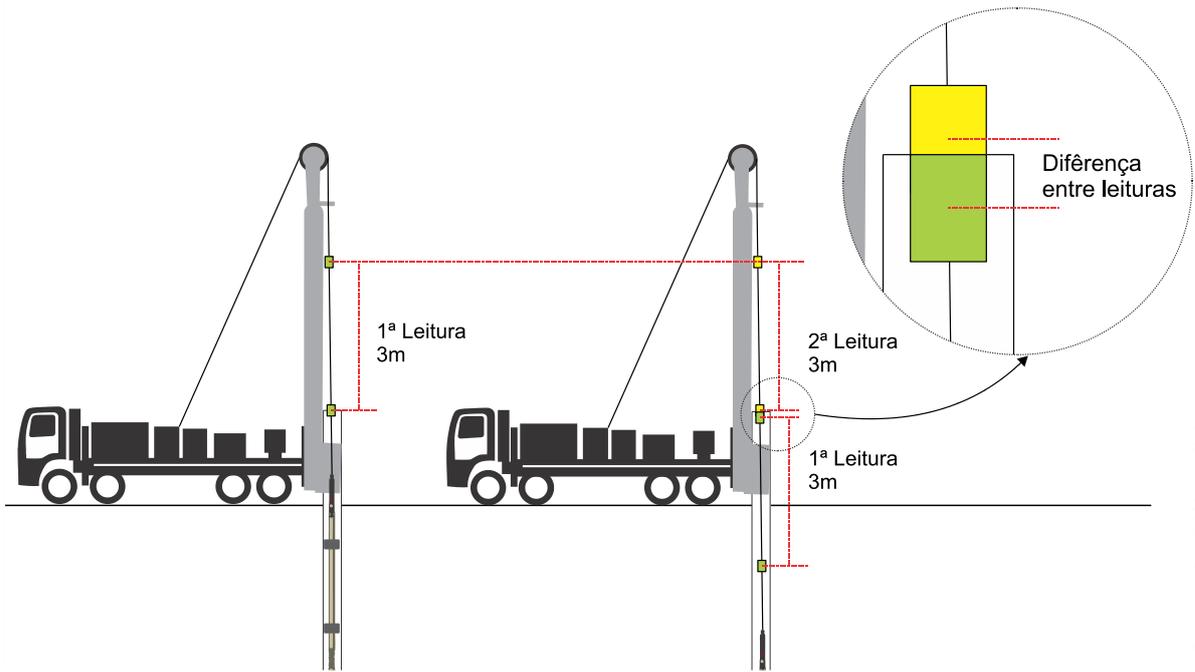
- aumenta o tempo total da realização da perfilagem quando comparado com o método descendente em função de descer o equipamento para depois subir com as leituras realizadas;
- diminui o tempo de estabilização entre as leituras, comparado com o método de descida;
- se existir pressão d'água no interior do furo a subida é comprometida, pois pode gerar um deslocamento do equipamento para cima;

4.6.2 Método de marcação entre as leituras

Geralmente podem ser utilizadas duas formas de marcação entre as leituras: a forma mecânica, que consiste na utilização de um contador de cabo fixado na haste de perfuração; e a marcação manual do cabo de aço, onde o operador sinaliza no cabo de aço a metragem desejada. Essa sinalização pode ser realizada de diversas formas, com utilização de uma fita adesiva para sinalizar o ponto desejado no cabo de aço ou utilização de um *spray*.

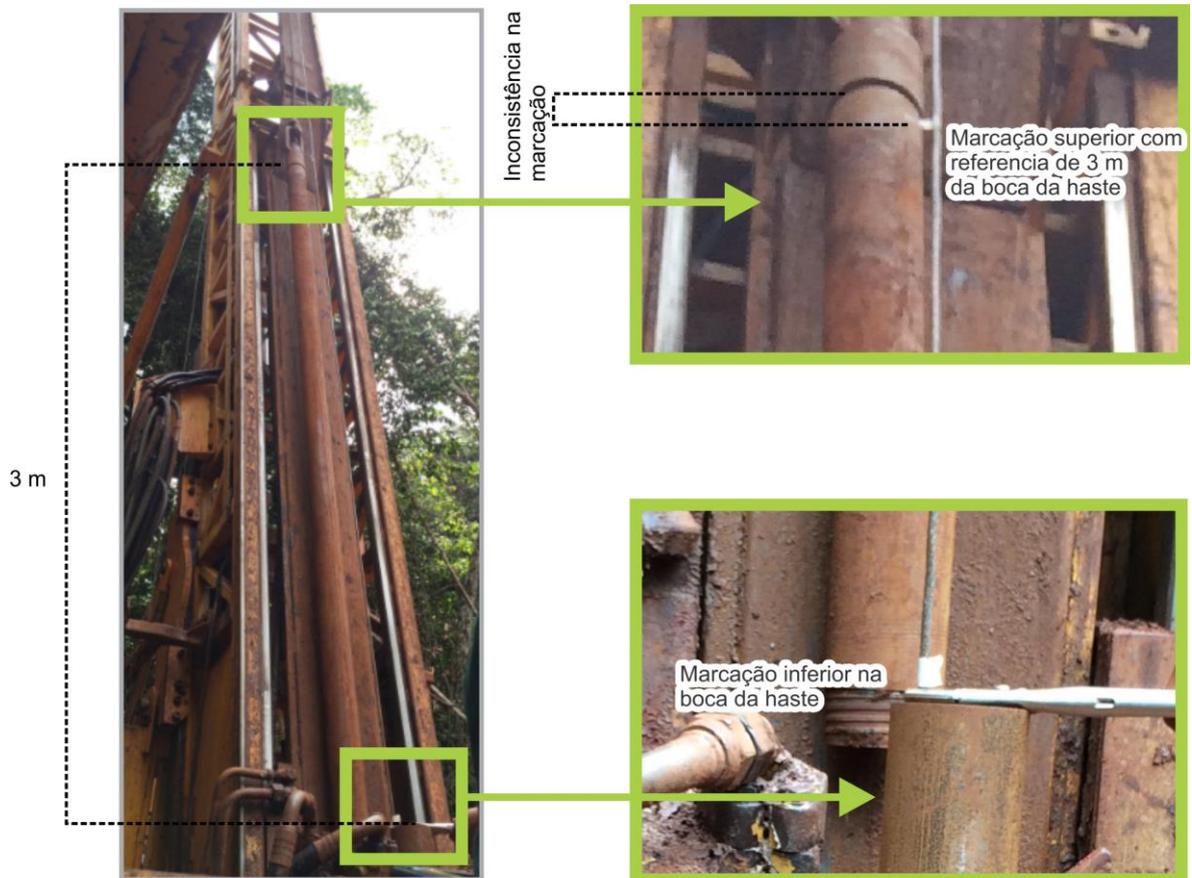
Método manual (marcação com tinta):

O risco associado a esse método está relacionado à precisão do ponto de marcação no cabo de aço, pois geralmente pode variar de 2 a 5 centímetros, tornando-se assim um fator de possível erro cumulativo (Figura 4.23 e Figura 4.24).



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 4.23 – Diferença de espaçamento entre leituras medidas.



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 4.24 – Método manual de marcação das leituras no cabo de aço.

Método mecânico (contador de cabo):

A precisão de marcação das leituras com o contador de cabo método mecânico (Figura 4.25) é maior que o método manual, pois a diferença entre as leituras com o contador de cabo pode estar na ordem de milímetros e o método manual na ordem de centímetros. O índice de eficácia entre a marcação mecânica e a manual está na ordem de 3,4% em relação à profundidade medida. A utilização do contador de cabo comparada com o método de marcação manual é mais ágil no processo de descida e subida do cabo de aço que desloca a ferramenta de medida de desvio no interior do furo, reduz o tempo de marcação das leituras em 40%, diminui a exposição de um empregado na atividade como um todo (sendo necessário apenas o perfilador e o sondador) e diminui o risco de segurança atrelado à exposição de um empregado no deslocamento próximo ao cabo de aço do guincho *wireline*. O tempo médio gasto por leitura a cada 3 metros sem o contador de cabo está na ordem de 54 segundos, incluindo o tempo de deslocamento e leitura.

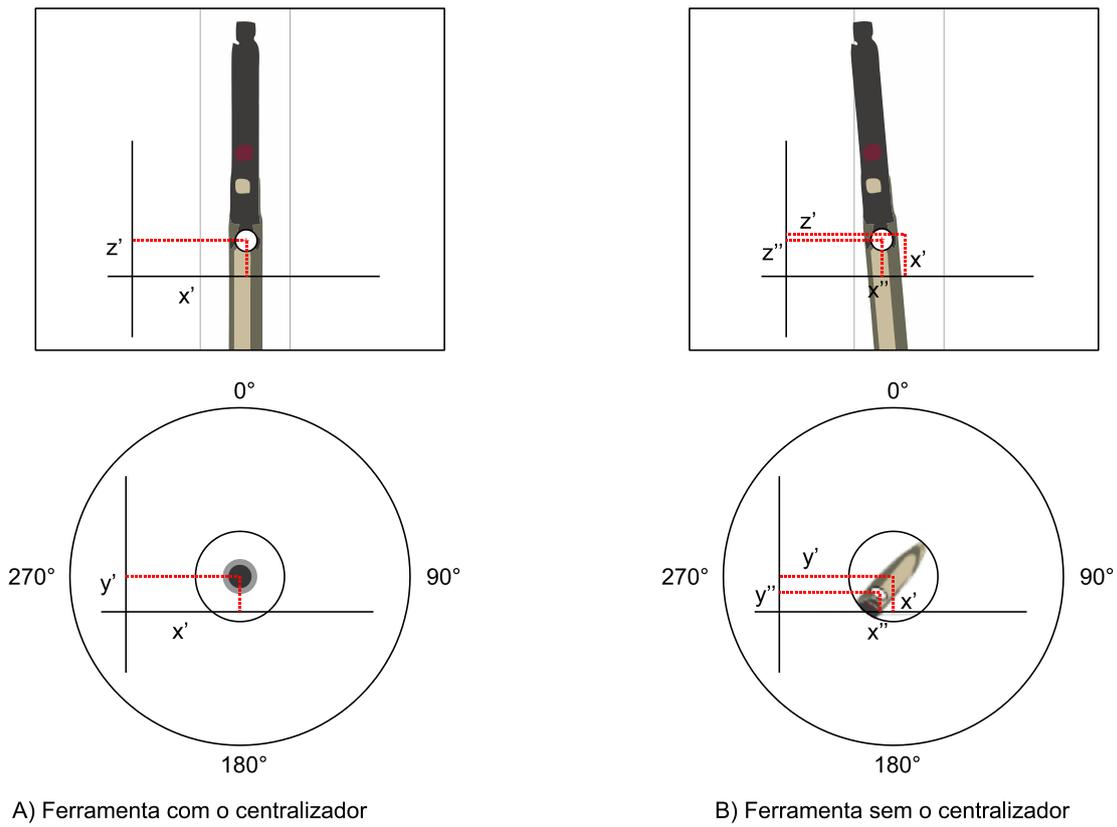


Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 4.25 – Método mecânico (contador de cabo).

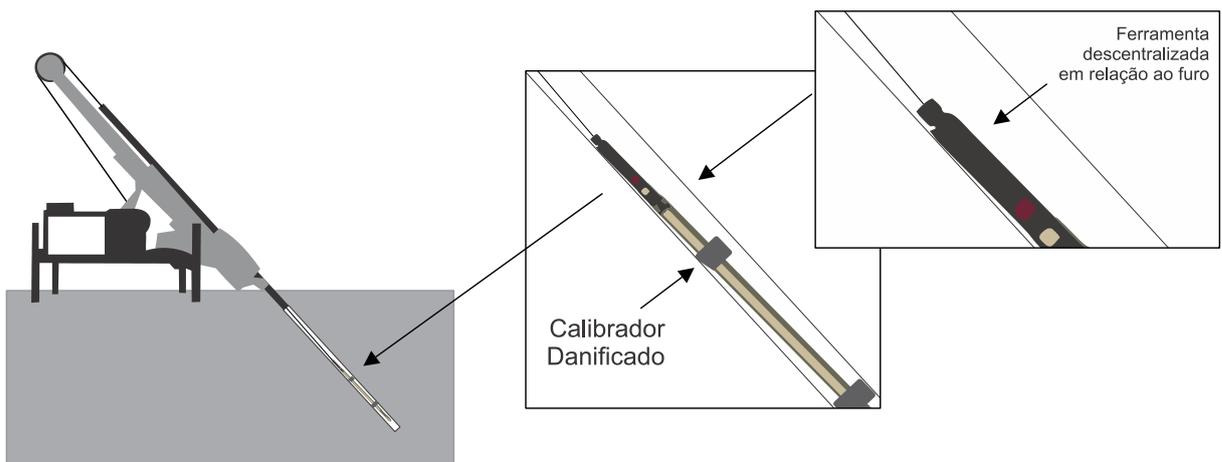
4.6.3 Sistema de centralização do equipamento de medida de desvio

Os centralizadores possuem papel de grande importância na operação, eles estabilizam a ferramenta no interior das hastes de sondagem (Figura 4.26). Um centralizador danificado, descalibrado ou até a sua não utilização, pode gerar inconsistência nas leituras, pois afeta diretamente na inclinação, direção e profundidade do ponto medido (Figura 4.27).



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 4.26 – Centralização da ferramenta no interior do furo de sondagem.



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 4.27 – Centralizador danificado.

O tipo de centralizador também influencia diretamente no posicionamento e deslocamento da ferramenta no interior das hastes de sondagem, abaixo estão listados os tipos mais comuns.

- Tipo aranha com chapa lisa: Esse centralizador geralmente possui quatro lâminas lisas flexíveis em formato de meia lua, sendo presas a dois anéis, uma na base superior das lâminas e outra na base inferior. Um desses anéis é fixado à ferramenta de perfilagem deixando o outro móvel para que seja possível, em um sentido de deslocamento no interior do furo, as lâminas se fecharem, tornando o deslocamento da ferramenta mais fácil, e quando for realizada a corrida no sentido contrário, as lâminas se abram, desta forma, centralizando a ferramenta no interior do furo. Uma das vantagens desse tipo de centralizador é a facilidade da passagem do fluido ou água durante o deslocamento da ferramenta.
- Tipo aranha com rolamento: Esse tipo de centralizador possui as mesmas características do tipo aranha com chapa lisa, seu diferencial é que no centro de cada chapa há um rolamento que diminui o atrito da chapa com a parede do furo.
- Tipo rosca: Esse tipo de centralizador geralmente é confeccionado com material plástico, no formato de uma rosca. A abertura lateral para passagem do fluido de perfuração ou água no interior do furo é muito pequena, dessa forma existe maior resistência de deslocamento da ferramenta de perfilagem.

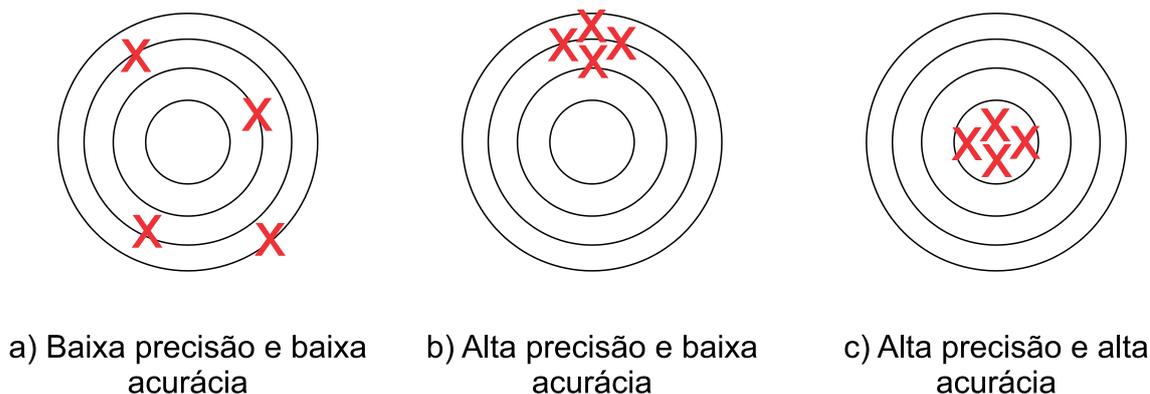
4.6.4 Tempo de estabilização das leituras

Após o deslocamento entre as leituras torna-se necessário aguardar um breve momento para o equipamento estabilizar no interior do furo de sondagem. Alguns equipamentos já possuem mecanismos de controle bloqueando o início de uma leitura antes do tempo pré-estabelecido. Esse tempo varia geralmente entre 10 a 15 segundos.

4.6.5 Calibração do equipamento

A grande maioria dos equipamentos possui *softwares* com alguns controles de qualidade já pré-definidos, entretanto se torna necessária a utilização de algumas técnicas complementares para garantir a qualidade de aferição dos mesmos, técnicas relacionadas à precisão e acurácia.

Embora possa haver certa semelhança entre precisão e acurácia, tecnicamente esses dois termos deve ser considerado separadamente durante a análise de validação das leituras do equipamento de medida de desvio. A precisão está relacionada a uma série de medidas onde as repetições se dão muito próximas umas das outras, já a acurácia está relacionada com a medida de um valor real ou aceito (Figura 4.28).



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 4.28 – Relação entre precisão e acurácia.

Atualmente o método mais utilizado para validar as leituras geradas pelo equipamento de medida de desvio está relacionado à sua precisão, onde são realizadas duas corridas no mesmo furo de sondagem. Esse método consiste em validar uma corrida com base nos dados da outra, utilizando limites entre as leituras de 1% a 2%, com base na estação percorrida (Tabela 4.2).

Embora possa existir aceitação de ambas as leituras considerando o percentual descrito acima, para utilização desses dados na grande maioria dos *softwares* de modelamento geológico, em decorrência da estrutura de entrada de dados prevista, é necessário escolher apenas uma. Desta forma, para se encontrar parâmetros que balizem a escolha da leitura mais assertiva se podem utilizar os dados do levantamento topográfico na boca do furo como referência.

Fórmula de validação entre as corridas:

- D^{AB} = Distância entre as Corridas;
 D^V = Limite aceitável entre as leituras A e B;
 S = Estação ou profundidade da corrida ou profundidade da leitura;
 $\%$ = Percentual de aceitação;
 V = Validação da leitura medida;

$$D^{AB} = \sqrt{(X^A - X^B)^2 + (Y^A - Y^B)^2 + (Z^A - Z^B)^2}$$

$$D^V = S * \%$$

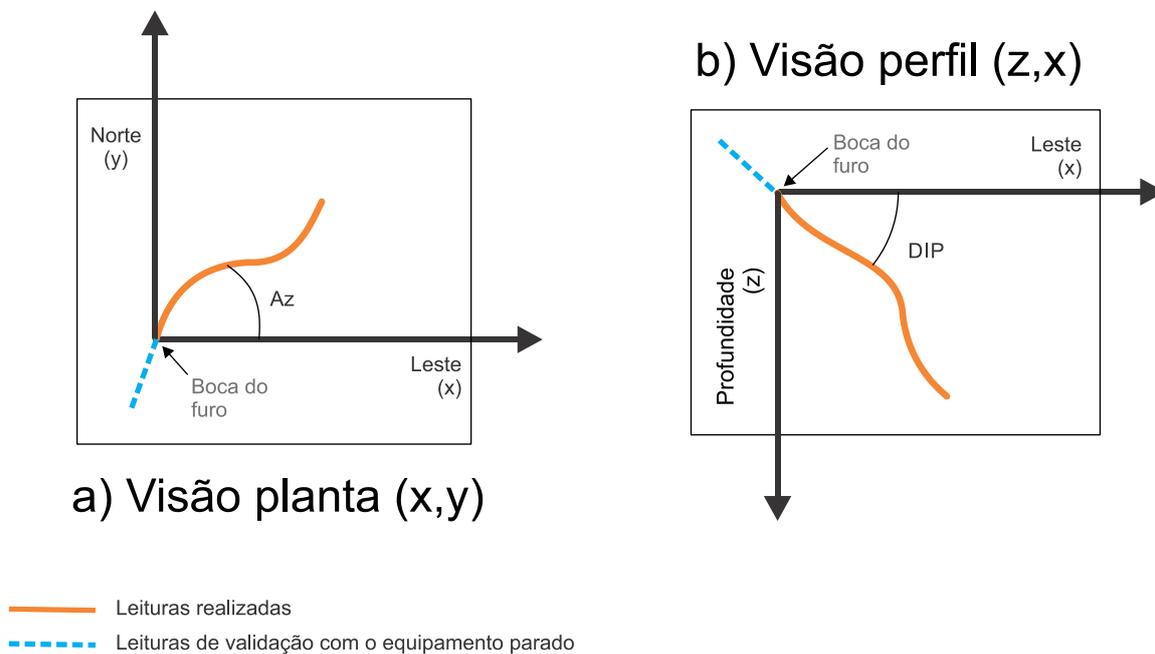
$$V = (D^{AB} \leq D^V)$$

Tabela 4.2 – Validação entre leituras A e B.

Id	PROF	XA	YA	ZA	XB	YB	ZB	DAB	%	Status
524-S11_1	48	-0,148	3,631	-47,862	-0,158	3,577	-47,866	0,0550636	0,5	Ok
524-S11_1	96	-0,253	6,498	-95,775	-0,278	6,443	-95,779	0,0605475	1	Ok
524-S11_1	144	-0,73	8,354	-143,73	-0,765	8,298	-143,74	0,0661589	1,4	Ok
524-S11_1	192	-0,421	8,51	-191,73	-0,457	8,455	-191,74	0,0659242	1,9	Ok
524-S11_1	240	0,747	8,528	-239,72	0,711	8,479	-239,72	0,06093439	2,4	Ok
524-S11_1	288	2,403	8,639	-287,69	2,366	8,598	-287,69	0,05537147	2,9	Ok
524-S11_1	336	4,531	8,829	-335,64	4,493	8,799	-335,64	0,04857983	3,4	Ok
524-S11_1	384	7,211	9,085	-383,56	7,172	9,069	-383,57	0,04234383	3,8	Ok
524-S11_1	432	10,39	9,407	-431,46	10,35	9,407	-431,46	0,0401995	4,3	Ok
524-S11_1	480	14,03	9,721	-479,32	13,99	9,74	-479,32	0,04627094	4,8	Ok
524-S11_1	528	18,21	10,04	-527,13	18,16	10,08	-527,14	0,06027437	5,3	Ok
524-S11_1	555	20,88	10,15	-554	20,83	10,2	-554,01	0,07046985	5,6	Ok

Fonte: Arquivo Interno Vale, 2014.

Para conseguir índices de acurácia na validação das medidas de desvio torna-se necessário encontrar valores reais ou absolutos que validem as corridas realizadas. Esses valores podem ser encontrados na boca do furo de sondagem através do cadastramento topográfico. Esse método consiste em realizar algumas leituras com o equipamento parado em um ângulo de direção e inclinação conhecido após, ou antes, da realização das medidas de desvio no interior do furo (Figura 4.29).



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 4.29 – Método de validação considerando fatores de acurácia.

Outra forma de validar a calibração do equipamento de medida de desvio é executar algumas leituras com o equipamento parado em ângulos de inclinação e direção conhecidos, o resultado gráfico gerado pelo equipamento de medida de desvio deverá ser uma trajetória reta obedecendo aos ângulos que o equipamento foi posicionado.

A Figura 4.30, demonstra o comportamento das leituras obtidas com o equipamento de medida de desvio parado (R01)^[7], sendo alterados os ângulos de mergulho e direção a cada intervalo. Os ângulos foram medidos com ajuda de uma bússola de geólogo em local sem interferência magnética.

^[7] Teste realizado com o equipamento R01, não sendo possível realizar leituras com os equipamentos D01 e M01.

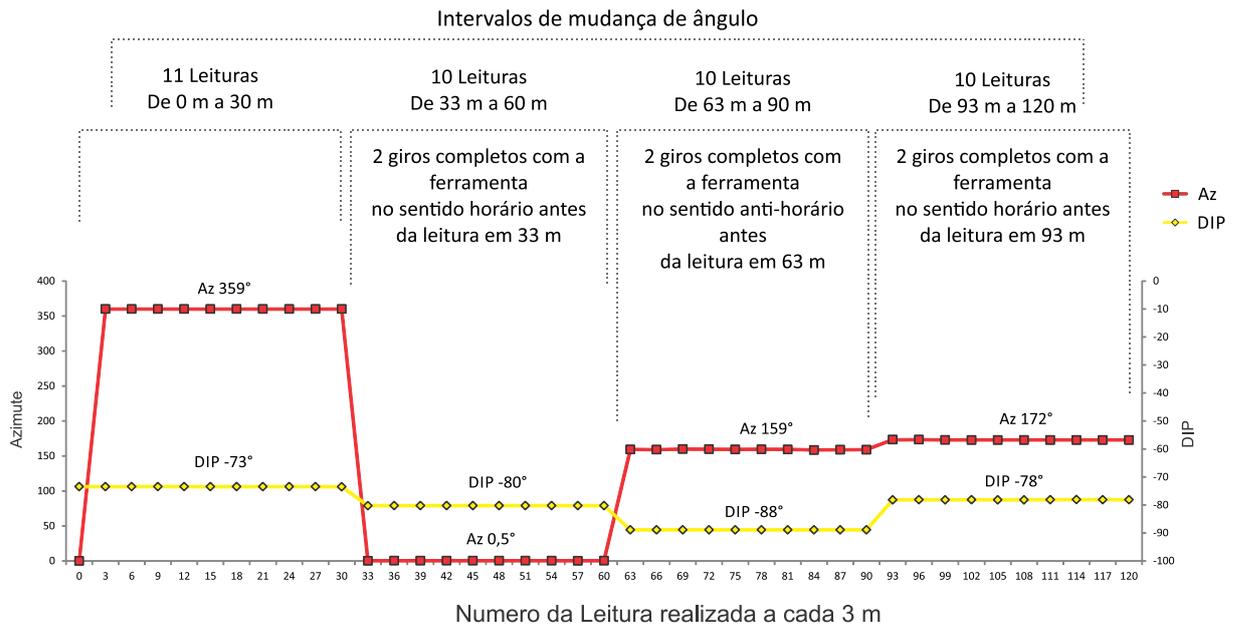


Figura 4.30 – Execução de medidas com a ferramenta de medida de desvio parada.

4.6.6 Fluido de perfuração

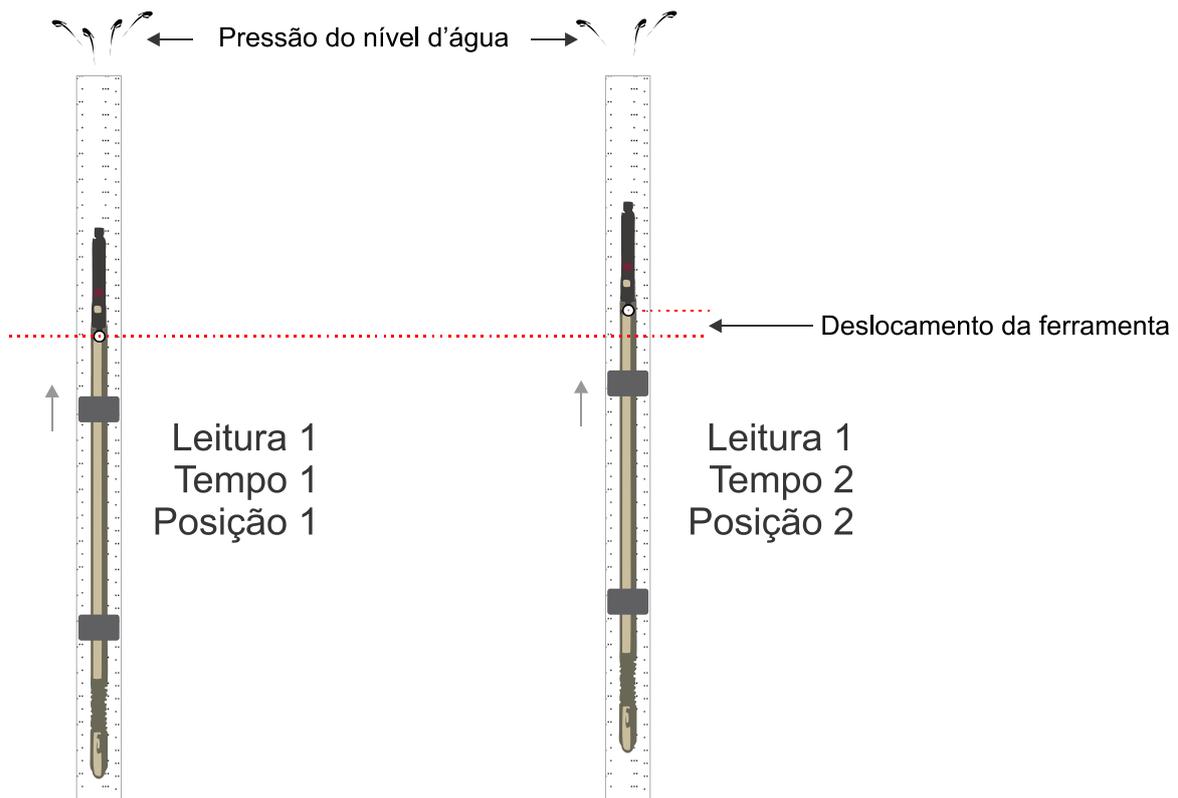
Os Fluidos de perfuração são utilizados durante a operação como técnica complementar para o auxílio da sondagem. Eles possuem algumas funções básicas:

- manter as pressões do interior do furo sob controle;
- transportar os cascalhos até a superfície;
- manter a estabilidade mecânica do furo;
- resfriar a broca de perfuração;
- transmitir força hidráulica até a broca de perfuração;
- manter os cascalhos em suspensão quando sem circulação da coluna de perfuração;

Um furo com fluido muito denso em seu interior pode dificultar a descida do equipamento, nesse caso torna-se necessária a utilização de um estabilizador mais aberto onde favoreça a passagem do fluido no momento da descida da ferramenta de medida de desvio. Outra forma seria o bombeamento do fluido de perfuração para fora do furo de sondagem.

4.6.7 Pressão d'água no interior do furo

A medida de desvio realizada em furos com pressão d'água no interior ou parte do furo pode comprometer as leituras realizadas em função do deslocamento da ferramenta em relação a sua posição real (Figura 4.31).



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 4.31 – Pressão d'água no interior do furo.

A condição natural para esse tipo de evento é a presença de lentes ou camadas de material permeável, envolvidas por material impermeável (Figura 4.32). Se as camadas possuírem uma pequena inclinação o fenômeno será mais característico. A camada permeável deverá ter uma zona de alimentação, por onde a infiltração da água compensará a quantidade extraída. A saída de água por pressão natural é consequência da pressão hidrostática (CHIOSSI, 1971).

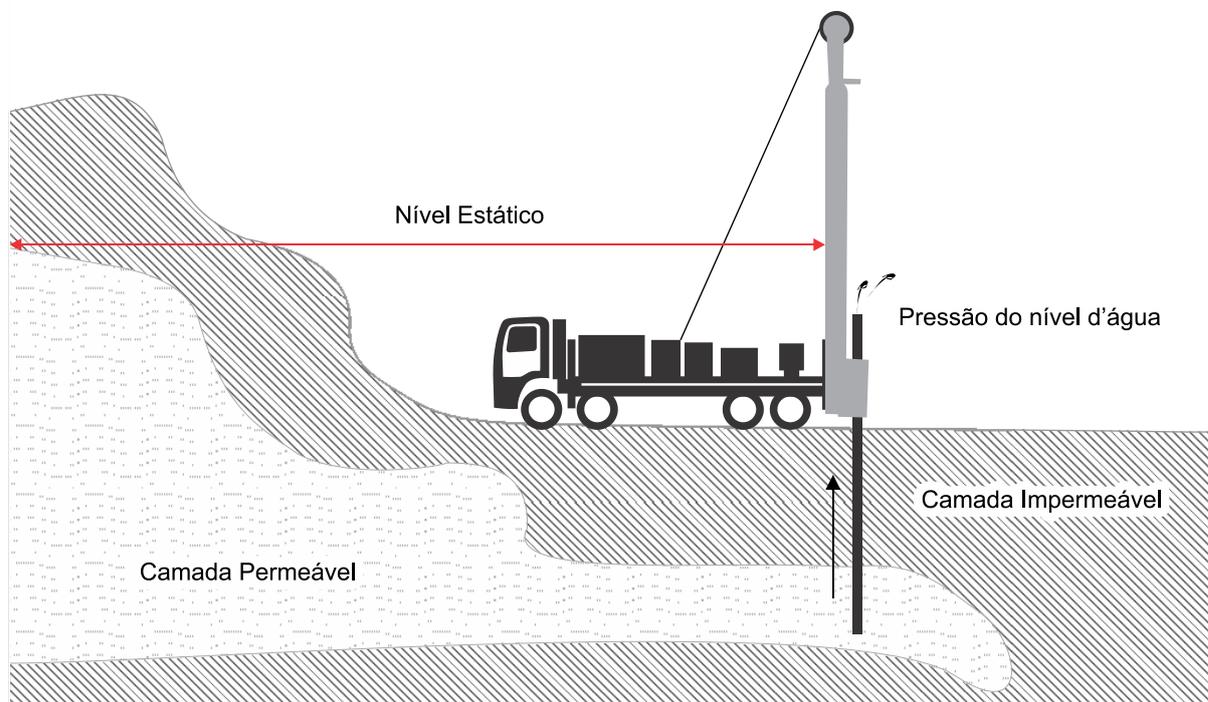


Figura 4.32 – Furo jorrante em função da pressão do nível d'água.

Algumas medidas que podem ser adotadas para realizar a medida de desvio nessa condição:

- utilização de fluido de perfuração que sele as paredes e o fundo do poço;
- exercer uma pressão contrária com auxílio da bomba de água da sonda no interior do furo, forçando a ferramenta de medida de desvio se deslocar no interior do poço;
- bombear a água do interior do furo até baixar o nível dinâmico do aquífero;

5. AQUISIÇÃO, ANÁLISE E INTEPRETAÇÃO DOS DADOS

Foram analisados 165 furos de sondagem realizados no período de 2010 a 2014 na mina de Serra Sul corpo D, furos executados por empresas de sondagem geológica prestadoras de serviço para a Vale. Cada furo teve sua particularidade e objetivo específico, entre eles o atendimento para o modelo geológico de longo prazo, monitoramento dos níveis d'água através de inspeção de piezômetro e furos de curto prazo, estes últimos sendo para o atendimento da caracterização da frente de lavra em áreas de operação de mina.

5.1 Aquisições dos dados de estudo

Seis atividades foram analisadas e seus principais dados tabulados e quantificados de forma que fosse possível uma correlação estratificada entre elas:

- acompanhamento da programação e execução de furos de sondagem com base no PGSond – Programa de Gerenciamento de Sondagem;
- acompanhamento em campo com base nos boletins de furo de sondagem (Anexo I);
- medida de desvio de furo de sondagem (Anexo V);
- descrição geológica de furo de sondagem (Anexo X);
- descrição geotécnica de furo de sondagem (Anexo XI);
- perfilagem geofísica de furo de sondagem (Anexo VIII);

Dez campos foram utilizados do PGSond - Programa de Gerenciamento de Sondagem que estão relacionados à programação e execução da campanha anual. Esses campos servem de referência para as demais tabelas e atividades (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – PGSond - Programa de Gerenciamento de Sondagem.

Item	Campo	Descrição
1.1	Cliente / Objetivo	Descreve o tipo de cliente demandante para a realização do furo de sondagem.
1.2	ID do Furo	Descreve a identificação do furo de sondagem com base nos dados de programação / execução
1.3	Campanha	Descreve o ano da campanha de sondagem realizada
1.4	X	Descreve a coordenada leste* com base no levantamento topográfico do furo de sondagem
1.5	Y	Descreve a coordenada norte* com base no levantamento topográfico do furo de sondagem
1.6	Z	Descreve a elevação topográfica* com base no levantamento topográfico do furo de sondagem
1.7	Metragem (m)	Descreve a metragem total do furo de sondagem executado
1.8	Az	Descreve o ângulo de direção do furo de sondagem com base no levantamento topográfico da boca do furo
1.9	DIP	Descreve o ângulo de mergulho do furo de sondagem com base no levantamento topográfico da boca do furo
1.10	Equipamento	Descreve o equipamento utilizado para medida de desvio do furo de sondagem

(*) As coordenadas topográficas foram suprimidas nesse estudo, dessa forma não será apresentado o DATUM de referência.

Os dados de medida de desvio de furo de sondagem são coletados do equipamento ou cápsulas que leem as informações no interior do furo e as transfere para um computador, *pocket* ou *tablet* que processa e trata as informações (Tabela 5.2). Geralmente esses dados são processados e validados em campo após a realização da medida de desvio, sendo esse processo fiscalizado por outra empresa que gerencia a confiabilidade dos dados levantados.

Tabela 5.2 – Levantamento das medidas de desvio de furo de sondagem.

Item	Campo	Descrição
2.1	ID do Furo	Descreve a identificação do furo de sondagem com base no relatório de medida de desvio
2.2	Repetições	Descreve o número de repetições das leituras de medida de desvio no furo de sondagem. Na repetição são consideradas as duas corridas. Ex.: Leituras A e B
2.3	Leitura	Descreve o tipo de leitura realizada. Ex.: A ou B
2.4	De (m)	Descreve o intervalo inicial da leitura
2.5	Até (m)	Descreve o intervalo final da leitura

Continuação >>

Item	Campo	Descrição
2.6	X	Descreve a coordenada leste** com base no intervalo percorrido e inclinações realizadas
2.7	Y	Descreve a coordenada norte** com base na no intervalo percorrido e inclinações realizadas
2.8	Z	Descreve a elevação** com base na no intervalo percorrido e inclinações realizadas
2.9	DIP	Descreve o ângulo de mergulho da leitura realizada
2.10	Az	Descreve o ângulo azimutal/direção da leitura realizada
2.11	DIP Inicial	Descreve o ângulo de mergulho da boca do furo ou primeira leitura
2.12	Az Inicial	Descreve o ângulo azimutal da boca do furo ou primeira leitura

(**) As coordenadas descritas no relatório de perfuração geralmente são geradas na primeira leitura.

Os dados da atividade relacionados à perfuração são descritos em campo nos boletins de sondagem pela empresa executora e fiscalizada por outra empresa. Na Tabela 5.3 estão descritos os principais campos do boletim de sondagem.

Tabela 5.3 – Acompanhamento das atividades de sondagem me campo.

Item	Campo	Descrição
3.1	ID do Furo	Descreve a identificação do furo de sondagem
3.2	De (m)	Descreve o intervalo inicial da manobra executada em relação à profundidade do furo de sondagem
3.3	Até (m)	Descreve o término do intervalo da manobra executada em relação à profundidade do furo de sondagem
3.4	Av (m)	Descreve o tamanho do avanço perfurado
3.5	Rec (m)	Descreve o tamanho do testemunho recuperado com base no avanço realizado
3.6	Diâmetro***	Descreve a série do diâmetro de perfuração utilizado
3.7	Litologia	Descreve a litologia atravessada com base nos critérios de operação visual
3.8	Perfuração (mim)	Descreve o tempo de perfuração da rocha com base no avanço realizado

(***) Foram utilizados para esse estudo a série do diâmetro (H e N).

As descrições geológicas e geotécnicas (Tabela 5.4 e 5.5) foram realizadas por geólogos da Vale nos arquivos de testemunho de sondagem da mina de N5, local onde são centralizados todos os furos de sondagem do complexo de Carajás, de responsabilidade da Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos. Antes da descrição é realizada uma segunda conferência dos furos após validação em campo.

Tabela 5.4 – Descrição geológica de furo de sondagem.

Item	Campo	Descrição
4.1	ID do Furo	Descreve a identificação do furo de sondagem
4.2	De (m)	Descreve o início do intervalo com base na litologia observada e características geológicas
4.3	Até (m)	Descreve o término do intervalo com base na litologia observada e características geológicas
4.4	Compacidade	Descreve de forma qualitativa 6 níveis de compacidade da litologia observada
4.5	Hidratação	Descreve de forma qualitativa 5 níveis de hidratação da litologia observada
4.6	Litologia	Descreve a litologia observada

Tabela 5.5 – Descrição geotécnica de furo de sondagem.

Item	Campo	Descrição
5.1	ID do Furo	Descreve a identificação do furo de sondagem
5.2	De (m)	Descreve o início do intervalo com base nas características geotécnicas observadas
5.3	Até (m)	Descreve o término do intervalo com base nas características geotécnicas observadas
5.4	RQD	Descreve a classificação da rocha considerando a somatória de fragmentos maiores que 10 cm em 5 níveis
5.5	Consistência	Descreve de forma qualitativa a consistência em 7 níveis

A perfilagem geofísica no interior do furo de sondagem é realizada após a conclusão do furo ou autorização prévia por parte da empresa fiscalizadora de sondagem que pode considerar 80% da metragem executada como base para o início das atividades de geofísica (Tabela 5.6). As leituras podem ser realizadas direto nas paredes do furo ou com o ferramental de sondagem no seu interior, sendo, neste caso, necessário aplicar uma correção em função do ferramental de perfuração.

Os dados coletados em campo são processados e disponibilizados para a Vale, que por sua vez, aplica rotinas de validações garantindo a confiabilidade dos dados disponibilizados.

Tabela 5.6 – Perfilagem geofísica de furo de sondagem.

Item	Campo	Descrição
6.1	ID do Furo	Descreve a identificação do furo de sondagem
6.2	De (m)	Descreve o início do intervalo medido
6.3	Até (m)	Descreve o término do intervalo medido
6.4	Caliper (mm)	Descreve o diâmetro interno do furo de sondagem em furos abertos (sem o ferramental de sondagem)
6.5	Integridade das paredes	Descreve a situação das paredes do furo com base na diferença do diâmetro do furo de sondagem e Caliper medido
6.6	Diâmetro (mm)	Descreve o diâmetro do furo de sondagem
6.7	Densidade (g/cm³)	Descreve de forma pontual a densidade com base no intervalo medido

5.2 Consolidação dos dados de estudo

Três equipamentos foram utilizados para medição das leituras de desvios dos furos de sondagem (Tabela 5.7). Por motivos comerciais o nome técnico dos equipamentos e seus fornecedores foram suprimidos. O Equipamento R01 foi o único aparelho específico para realização das leituras em furos verticais, porem não restringindo sua execução em furos inclinados.

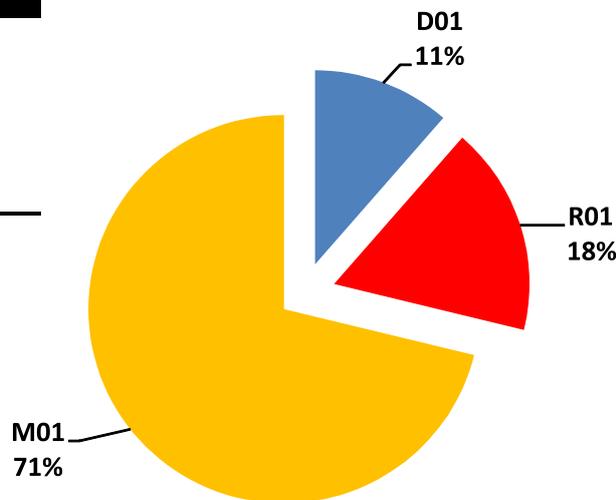
Tabela 5.7 – Metragem e furos executados por equipamentos de medida de desvio.

Tipo de equipamento de medida de desvio	Metragem total dos furos perfilados (m)	Total de furos perfilados (unid.)	Profundidade média perfilada (m)
D01	5.120,05	20,00	256,00
R01	7.561,70	27,00	280,06
M01	33.116,45	118,00	280,65
Total Geral	45.798,20	165,00	277,56

O total de 29.509 leituras (Figura 5.1) está relacionado aos 165 furos com leituras a cada 3 metros, com duas corridas A e B em cada furo, sendo que em alguns furos foi necessário realizar duas ou mais vezes a mesma corrida, gerando assim uma corrida A e B e uma segunda corrida A2 e B2 em profundidades finais iguais ou diferentes.

Tipo de equipamento de medida de desvio	Total de leituras realizadas a cada 3 metros (unid.)
D01	3.370,00
R01	5.158,00
M01	21.081,00
<hr/>	
	29.609,00

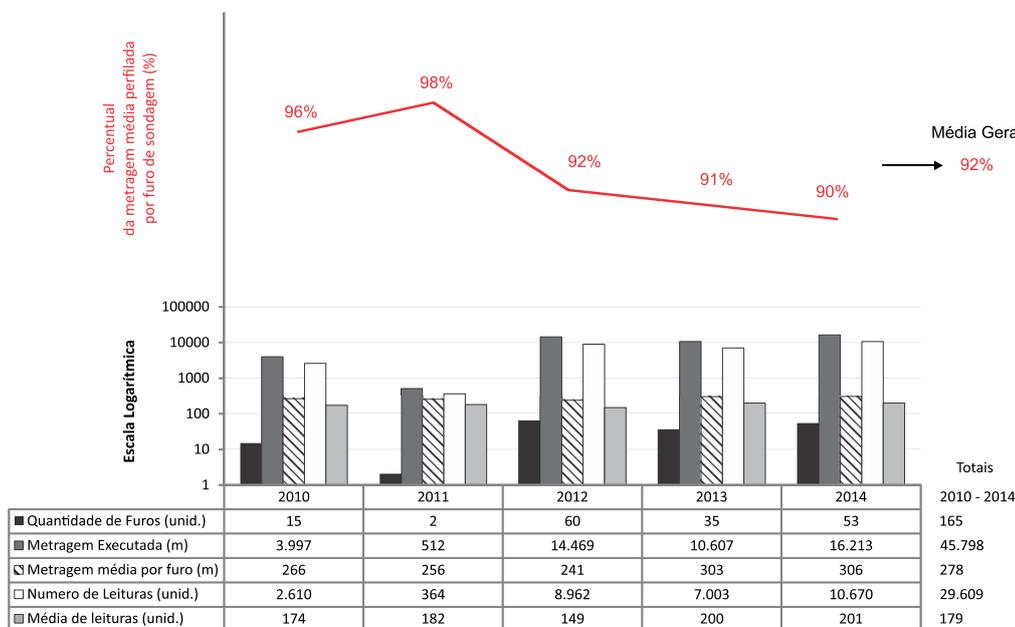
2012 - 2014 Mina de SSD



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Figura 5.1 – Total de leituras realizadas por equipamento.

Foram considerados furos perfilados nas cinco últimas campanhas de sondagem (Figura 5.2). Os dois furos executados na campanha de 2011 são parte dos furos do cliente FH (furos para hidrogeologia, Anexo VII) programados da campanha de 2010 que se estenderam para o ano posterior. Embora existam alguns impedimentos técnicos e operacionais que impeçam a realização da medida de desvio em um furo de sondagem por completo ou parcial, 92% da metragem executada entre 2010 e 2014 foi perfilada.



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

[CAMPANHA] - [N DE FURO] - [METRAGEM] - [MÉDIA METRAGEM] - [LEITURA] - [MÉDIA DE LEITURA]

Figura 5.2 – Distribuição de dados por campanha de sondagem.

Os furos de sondagem são executados com base em determinados objetivos. Esses objetivos podem ser classificados por clientes demandantes (Figura 5.3), sendo eles:

- FD – sondagem para atendimento do modelo geológico de longo prazo;
- FH – sondagem para atendimento a hidrogeologia;
- FR – sondagem para atendimento ao avanço de mina em curto prazo (< 1 ano);

O baixo número de furos perfilados para o cliente FR (furos para a sondagem de curto prazo) se deu em função da metragem perfurada, pois a grande maioria dos furos executados não ultrapassaram 100 m, sendo que furos com metragem inferior a essa profundidade, não são perfilados conforme procedimentos da Gerencia de Exploração Mineral de Ferrosos

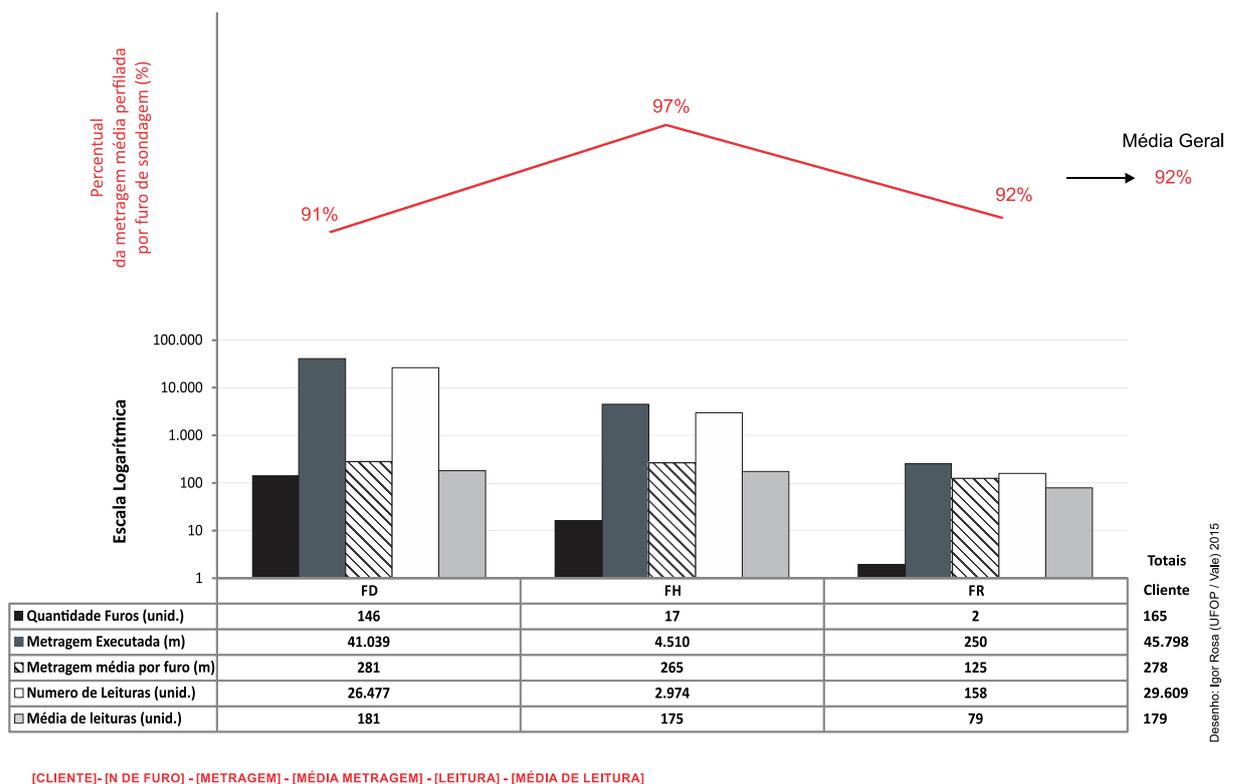
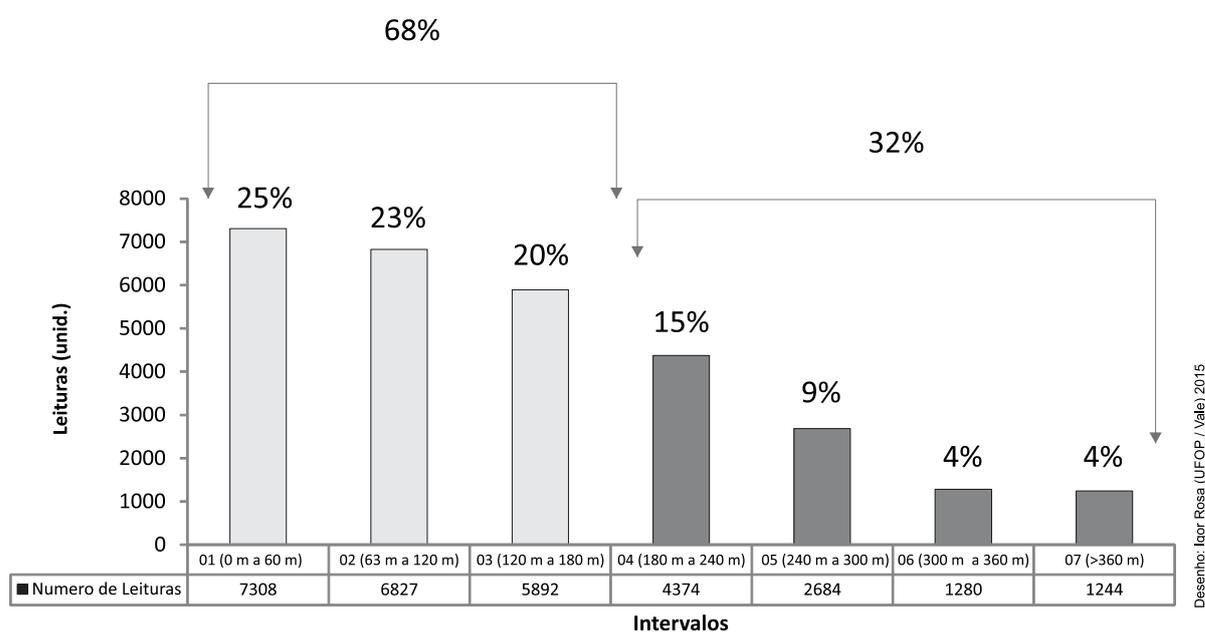


Figura 5.3 – Distribuição de dados por cliente / objetivo do furo de sondagem.

A profundidade entre 0 a 180 metros corresponde a 68% das leituras realizadas nos 165 furos, essas leituras estão entre as faixas 1, 2 e 3 do Gráfico 5.4 e 32% estão entre as faixas 4, 5, 6 e 7. Todos os furos são perfilados a partir de sua metragem inicial, ou seja, da boca do furo até

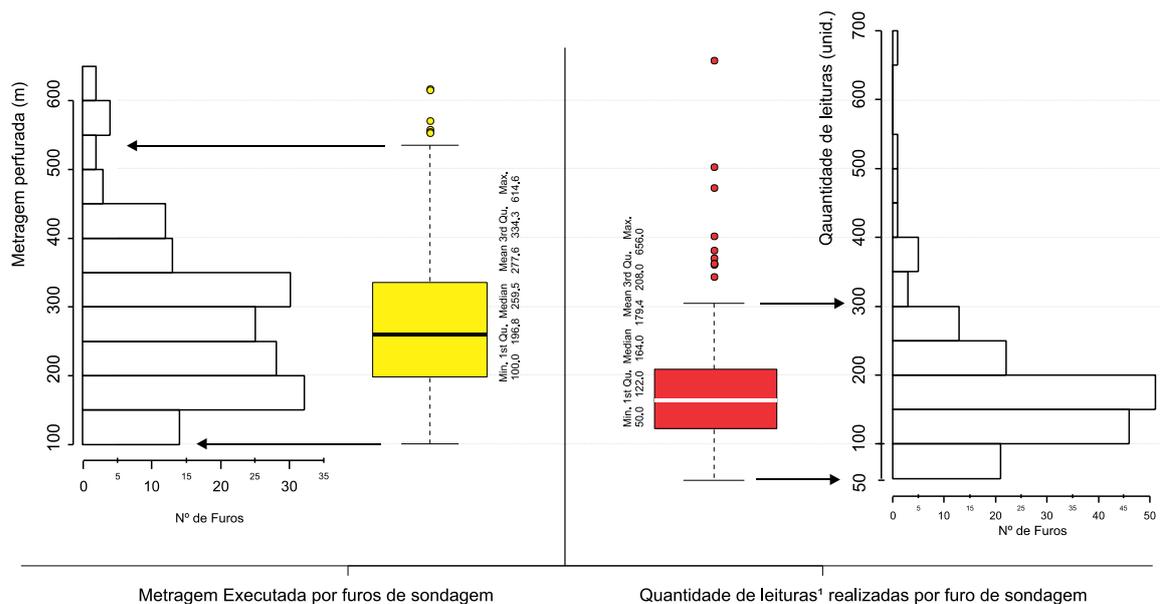
a metragem máxima permitida. Há alguns furos nos quais é necessário realizar mais de uma medida de desvio. A segunda ou demais leituras sempre inicia da metragem inicial, desta forma não existirão leituras complementares no mesmo furo. Exemplo, um furo com 300 m de profundidade executada, a primeira leitura de medida de desvio vai de 0 m até 150 m e, em outro momento, se torna necessário realizar nova leitura de medida de desvio até 300 m, a segunda leitura não inicia de 150 m, ela será realizada de 0 m até 300 m.



[LEITURAS] - [INTERVALO]

Gráfico 5.4 – Total de leituras realizadas por intervalo.

O Gráfico 5.5 demonstra a metragem executada e o número de leituras por furos de sondagem, sendo considerado para o número de leituras perfiladas, o total de leituras realizadas nos furos de sondagem (incluindo as corridas A e B mais as repetições quando necessárias no mesmo furo).



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

(¹) Leituras realizadas a cada 3 m, incluindo as leituras A e B mais as repetições quando necessário no mesmo furo.

[METRAGEM] - [LEITURAS] - [FURO]

Gráfico 5.5 – Metragem executada e leituras realizadas por furos.

O Gráfico 5.6 demonstra a razão entre a metragem executada por furo de sondagem e a quantidade de leituras realizadas. Em geral essa relação, em situações normais, é de 1,5 metros/leitura, sendo que a cada 3 metros perfurados são realizadas duas leituras (A e B).

Os valores acima de 1,5 m no Gráfico 5.6 demonstram que no mesmo furo de sondagem houve repetições da perfilagem, ou seja, duas leituras A e duas leituras B em uma mesma profundidade, esse processo pode ser realizado visando atingir diversos objetivos, entre eles, garantir a realização das leituras de medida de desvio em um furo de sondagem que apresente problemas operacionais de trancamento, nesse caso é realizada a medida de desvio até a metragem possível. Após aprofundamento do furo de sondagem é realizada nova medida de desvio.

Os valores abaixo de 1,5 metro/leitura demonstram que o furo não foi perfilado por completo, geralmente em função de ferramental de perfuração preso no interior do furo ou risco de perda da ferramenta de perfilagem. A área sinalizada no Gráfico 5.6 como zona de instabilidade demonstra as dificuldades operacionais encontradas, pois existem furos em que foi necessário realizar mais de uma leitura, desta forma aumentando o indicador de 1,5 metro/leitura, e casos que não foi possível perfilar o furo por completo, demonstrando um indicador mais baixo.

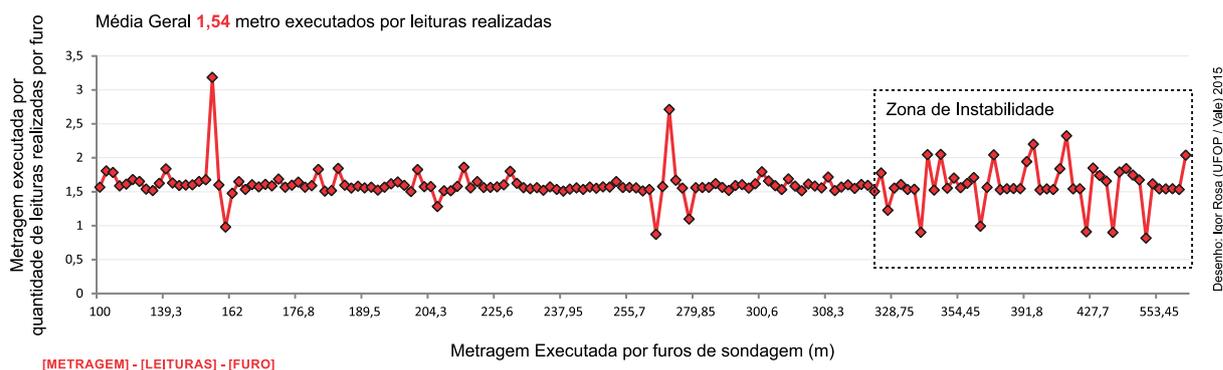


Gráfico 5.6 – Metragem executada por quantidade de leituras realizadas.

Foram utilizadas duas séries referentes ao diâmetro de perfuração conforme Tabela 5.8 sendo que 89% da metragem executada foi executada no diâmetro H e 11% no diâmetro N. Devido a algumas limitações técnicas todos os 165 furos iniciaram com a série H, sendo reduzidos para a série N conforme programação ou necessidade técnica. A inclinação dos furos de sondagem em relação à horizontal se refere ao ângulo de mergulho (DIP), sendo considerados furos verticais aqueles com DIP^[8] inferior a -88° e furos inclinados aqueles com DIP superior a -88°. Essa definição se dar em função da limitação dos equipamentos de medida de desvio que só realizam leituras em furos inclinados, considerado -88° o ângulo de maior abertura em relação a superfície.

Tabela 5.8 – Percentual de realização com base no diâmetro dos furos executados.

DIÂMETRO	INCLINAÇÃO		Total Geral
	Inclinado	Vertical	
H	<u>71%</u>	<u>18%</u>	<u>89%</u>
N	10%	1%	11%
Total Geral	<u>81%</u>	<u>19%</u>	100%

Foram considerados quatro categorias referente à compacidade dos litotipos descritos: pulverulento, friável, semicompato e compacto. E cinco categorias referentes à hidratação: muito hidratado, hidratado, pouco hidratado, não hidratado e não observado.

Essas categorias foram descritas através da classificação visual dos geólogos descritores (Tabela 5.9). Cada categoria de compacidade possui uma série de litotipos distribuídos em

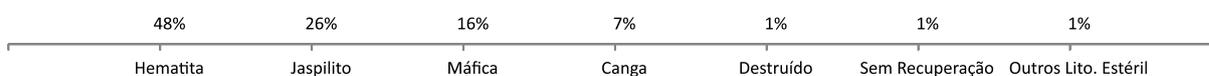
^[8] Precisão de $\pm 0,2^\circ$

linhas que estão relacionados com as categorias de hidratação nas colunas. O total geral da última coluna da tabela representa o percentual de uma dada litologia para uma dada categoria de compactidade, para as várias categorias de hidratação. Já o total geral da última linha da tabela representa os percentuais de cada categoria de hidratação, para todas as categorias de compactidade e tipos litológicos. O material friável representa 55,3% da metragem analisada, seguido de 34% de material compacto e na categoria hidratação 48,2% da metragem descrita está relacionado ao campo A1 (muito hidratado) conforme total geral do eixo horizontal da Tabela 5.9, seguida de 46,9% do campo A3 (pouco hidratado) e apenas 3,3% do campo A5 (não hidratado).

Tabela 5.9 – Percentual de material descrito por litologia, compactidade e hidratação.

COMPACTIDADE	LITOLOGIA	HIDRATAÇÃO					Total Geral (B1 a B4)
		A1-MUITO HIDRATADO	A2-HIDRATADO	A3-POUCO HIDRATADO	A4-NÃO HIDRATADO	A5-NÃO OBSERVADO	
B1-PULVERULENTO	Canga	9,2%					8,4%
	Hematita	27,3%		<u>100,0%</u>			33,4%
	Máfica	<u>62,7%</u>					<u>57,5%</u>
	Outros Lito. Estéril	0,7%					0,7%
	B1-PULVERULENTO Total	2,7%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	1,4%
B2-FRIÁVEL	Canga	1,6%					1,0%
	Hematita	<u>76,1%</u>	<u>57,3%</u>	<u>95,0%</u>	<u>97,0%</u>	<u>100,0%</u>	<u>83,4%</u>
	Jaspilito	0,8%		4,2%	3,0%		1,9%
	Máfica	20,9%	42,7%				13,0%
	Outros Lito. Estéril			0,6%			
B2-FRIÁVEL Total	67,9%	79,8%	44,6%	22,2%	36,4%	55,3%	
B3-SEMI-COMPACTO	Canga	<u>56,1%</u>		0,0%			<u>44,0%</u>
	Hematita	2,3%		10,5%		<u>100,0%</u>	4,1%
	Jaspilito	13,0%		<u>57,7%</u>			22,5%
	Máfica	28,1%	<u>100,0%</u>	30,9%			28,8%
	Outros Lito. Estéril			0,8%			0,6%
B3-SEMI-COMPACTO Total	15,1%	1,5%	4,2%	0,0%	0,3%	9,3%	
B4-COMPACTO	Canga	<u>37,1%</u>	16,2%				7,8%
	Hematita	10,3%		2,9%			4,2%
	Jaspilito	45,8%	14,4%	<u>77,9%</u>	40,2%	<u>100,0%</u>	<u>68,5%</u>
	Máfica	3,6%	<u>46,5%</u>	18,7%	<u>58,8%</u>		18,5%
	Outros Lito. Estéril	3,2%	22,9%		0,9%		1,0%
B4-COMPACTO Total	14,3%	18,7%	50,9%	77,8%	63,3%	34,0%	
Total Geral (A1 a A5)		<u>48,2%</u>	0,9%	46,9%	3,3%	0,7%	100,0%

Resumo por Litologia (%)



Na Tabela 5.10 está relacionada a consistência da litologia perfurada pelo RQD – *Rock Quality Designation*, sendo 67% da litologia descrita classificada como não observado ou sem estrutura de classificação para o RQD. O total geral da coluna final da planilha apresenta os valores em percentual da classificação do RQD, já o total geral da última linha descreve os valores de consistência. O índice de 91% entre a consistência 06-Extremamente Dura e RQD 01-Muito Pobre está em sua grande maioria relacionada ao jaspilito muito fraturado.

O RQD é o índice de maior divulgação global na classificação da rocha através dos testemunhos de sondagem. Ele foi proposto por Deere e Miller (1966) sendo levadas em consideração as peças de rocha são de comprimento superior a 10 cm, estabelecendo a relação entre o comprimento acumulado e a extensão total da manobra de perfuração num determinado trecho (GUIDICINI *et al.*, 2010)

Tabela 5.10 – Percentual de material descrito relacionado ao RQD e Consistência.

RQD	CONSISTÊNCIA								
	00-Extremamente Macia	01-Macia	02-Média Macia	03-Média	04-Média Dura	05-Dura	06-Extremamente Dura	NA / NO	Total Geral
NA / NO	<u>85%</u>	<u>94%</u>	<u>92%</u>	<u>93%</u>	<u>65%</u>	11%	2%	<u>100%</u>	<u>67%</u>
01-Muito Pobre	15%	4%	5%	2%	7%	27%	<u>91%</u>		20%
02-Pobre		0,4%	3%	2%	1%	2%	0,2%		1%
03-Regular		1%	0,1%	1%	3%	4%	3%		2%
04-Bom				1%	10%	11%	0,1%		3%
05-Excelente					15%	<u>45%</u>	3%		8%
Total Geral	14%	19%	<u>20%</u>	8%	8%	15%	12%	4%	100%

Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

A leitura do *caliper* da perfuração geofísica no Gráfico 5.7 descreve a integridade das paredes do furo sendo possível observar dois tipos de comportamento: contração e expansão das paredes do furo. Tomando como referência o furo de sondagem, na expansão o furo tende a diminuir seu diâmetro interno, embora se perceba valores máximos na ordem de menos trinta milímetros. No Gráfico 5.7 existem casos que o furo se fecha por completo, desta forma não

sendo possível realizar esse tipo de leitura. Na contração, o diâmetro interno do furo tende a aumentar em relação ao diâmetro inicial, sendo possível observar valores máximos na ordem de cento e vinte e dois milímetros; entretanto, 48% das leituras medidas ficaram entre os intervalos de zero a cinco milímetros.

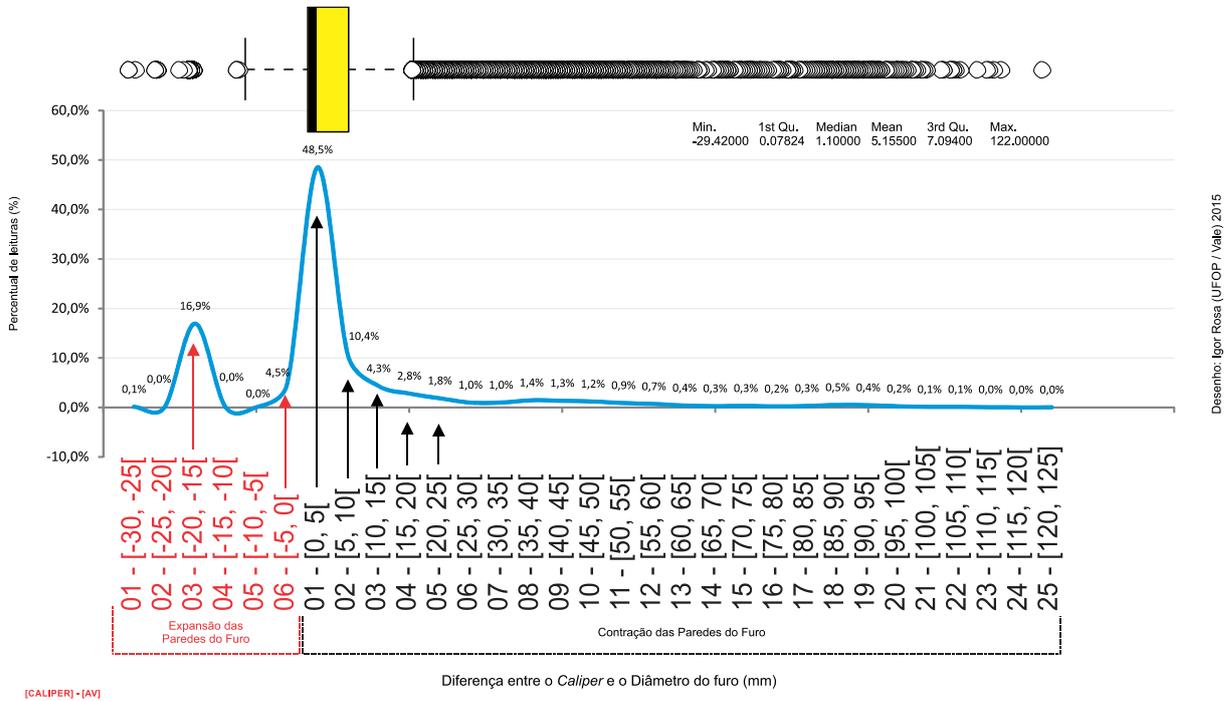


Gráfico 5.7 – Integridade das paredes dos furos de sondagem - Caliper (mm).

Observou-se que 50% dos valores de densidade medidos nos furos de sondagem estiveram entre 2,76 g/cm³ e 3,44 g/cm³, 25% entre 1,78 g/cm³ e 2,76 g/cm³ e 25% entre 3,44 g/cm³ e 4,46 g/cm³, conforme Gráfico 5.8. Na distribuição por categoria 43% dos valores medidos pertence ao grupo 06 – [3,0, 3,5[, sendo valores muito próximos da hematita compacta atribuída à mina de Serra Sul.

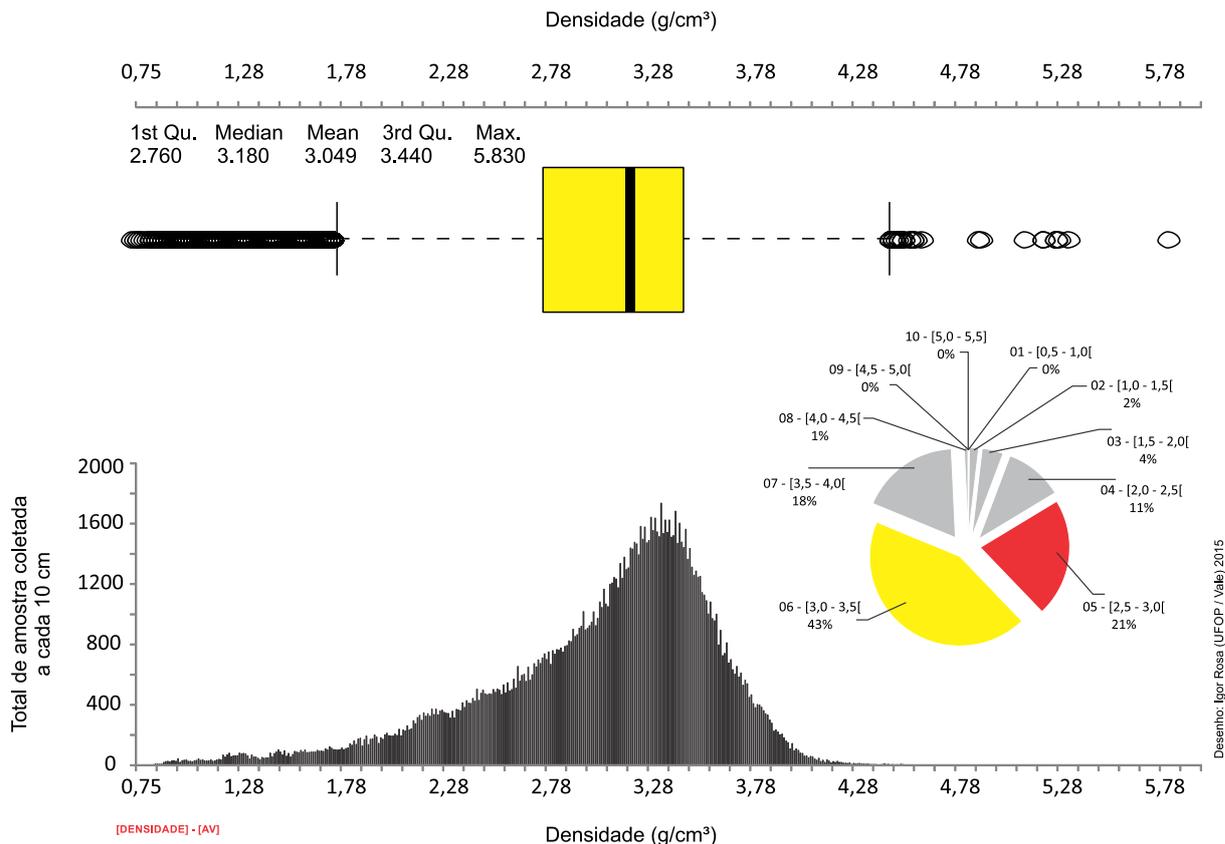
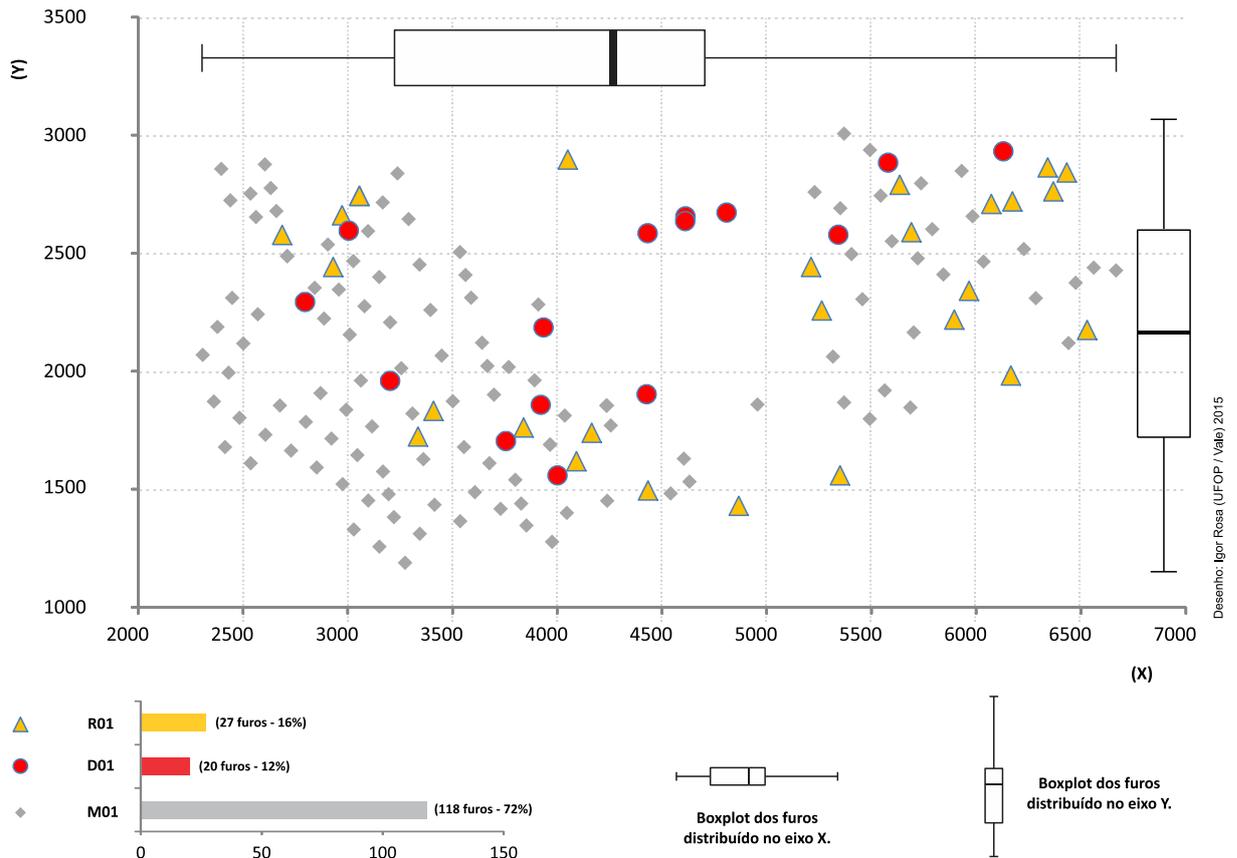


Gráfico 5.8 – Distribuição das leituras de densidade (g/cm³).

5.3 Análise e interpretação dos dados

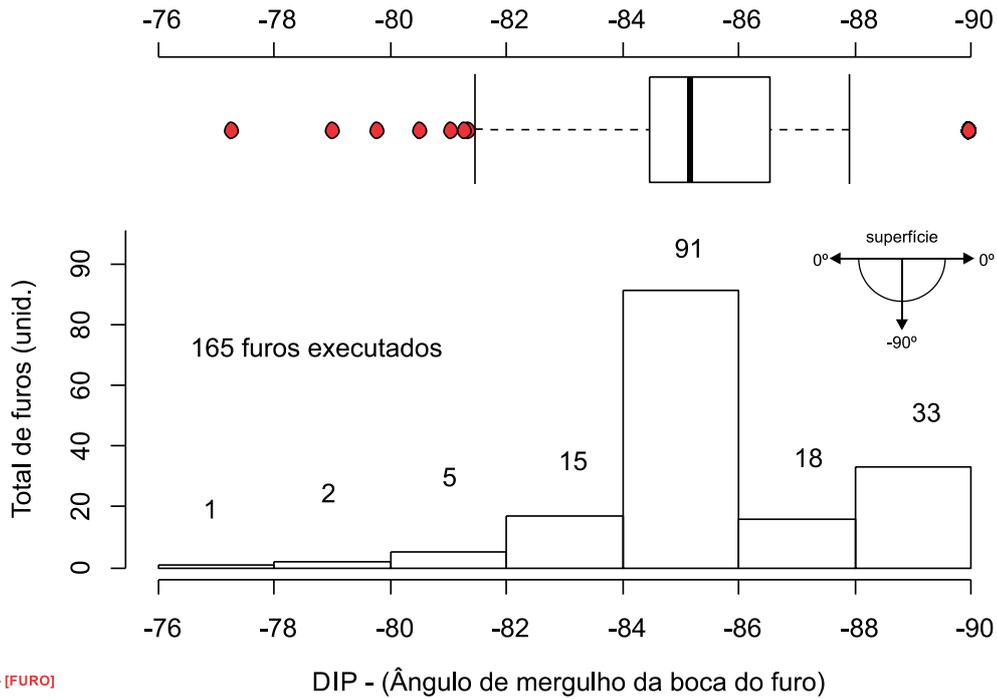
O Gráfico 5.9 demonstra a distribuição espacial dos 165 furos realizados com os equipamentos M01, D01 e R01 no corpo D da mina de Serra Sul. Em grande quantidade dos furos foram realizadas medidas de desvio com o equipamento M01 em função do seu maior tempo na área, em seguida entrou o equipamento D01 seguindo a mesma metodologia do equipamento M01 (realizando leituras em furos inclinados) e, por último, houve a chegada do equipamento R01, onde seria suprida a necessidade de realizar medida de desvios em furos verticais.



[EQUIPAMENTO] - [COORDENADAS] - [FURROS]

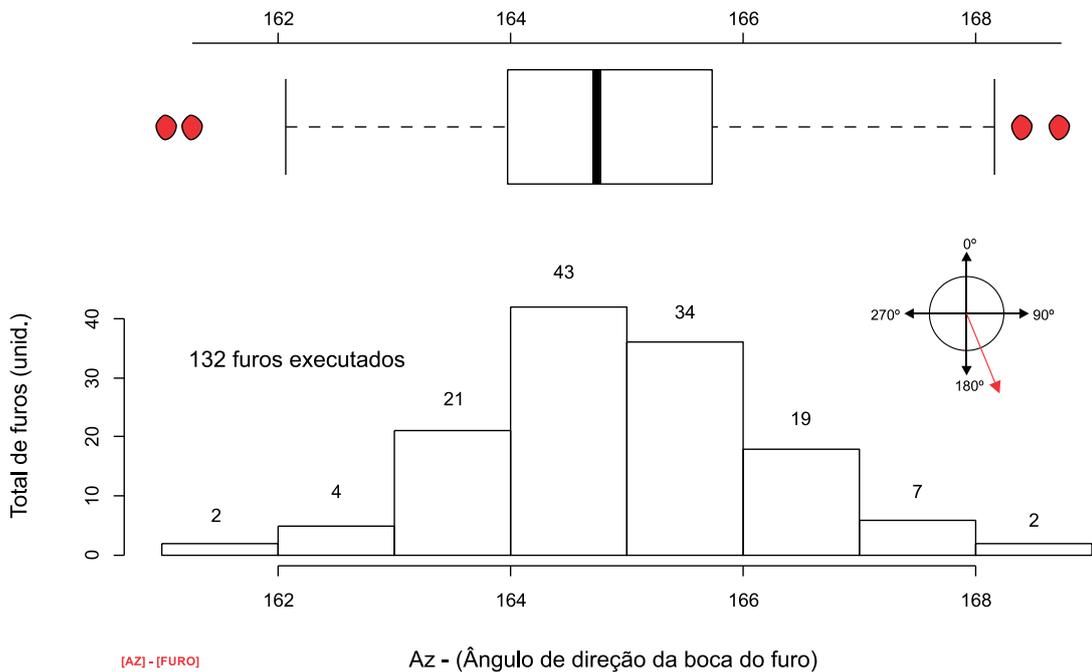
Gráfico 5.9 – Distribuição espacial dos furos por equipamentos de medida de desvio.

Observou-se que 55% dos furos analisados (total de 91), estiveram entre os ângulos de mergulho de -84° a -86° , conforme Gráfico 5.10, e 20% com inclinação vertical. Essa distribuição demonstra uma grande tendência da execução de furos mais próximo do eixo vertical, que na grande maioria dos casos não foi possível ser vertical em função da limitação dos equipamentos M01 e D01. No Gráfico 5.11 fica evidente a distribuição de direção dos furos de sondagem, sendo que 132 furos inclinados tiveram ângulo azimutal entre 161° a 168° caracterizando um posicionamento SE, sendo este ângulo perpendicular ao mergulho da camada geológica pesquisada.



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Gráfico 5.10 – Distribuição do número de furo por ângulo de mergulho.



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Gráfico 5.11 – Distribuição da quantidade de furos por ângulo de direção - Az.

Foram utilizadas quatro categorias de compacidade para as rochas perfuradas com base na CLV – Classificação Litológica Visual, realizada pelos geólogos descritores conforme Gráfico 5.12. Neste gráfico é possível identificar o tempo de corte do testemunho de sondagem relacionado à integridade das paredes do furo a compacidade da rocha. O tempo de corte em material compacto é inferior quanto às demais categorias, seguido do material

pulverulento, material semicompacto e friável. Para a categoria do material pulverulento não foi identificada expansão das paredes do furo, fato inverso ao material compacto que apresentou uma média mais alta que as demais categorias tanto na contração como na expansão.

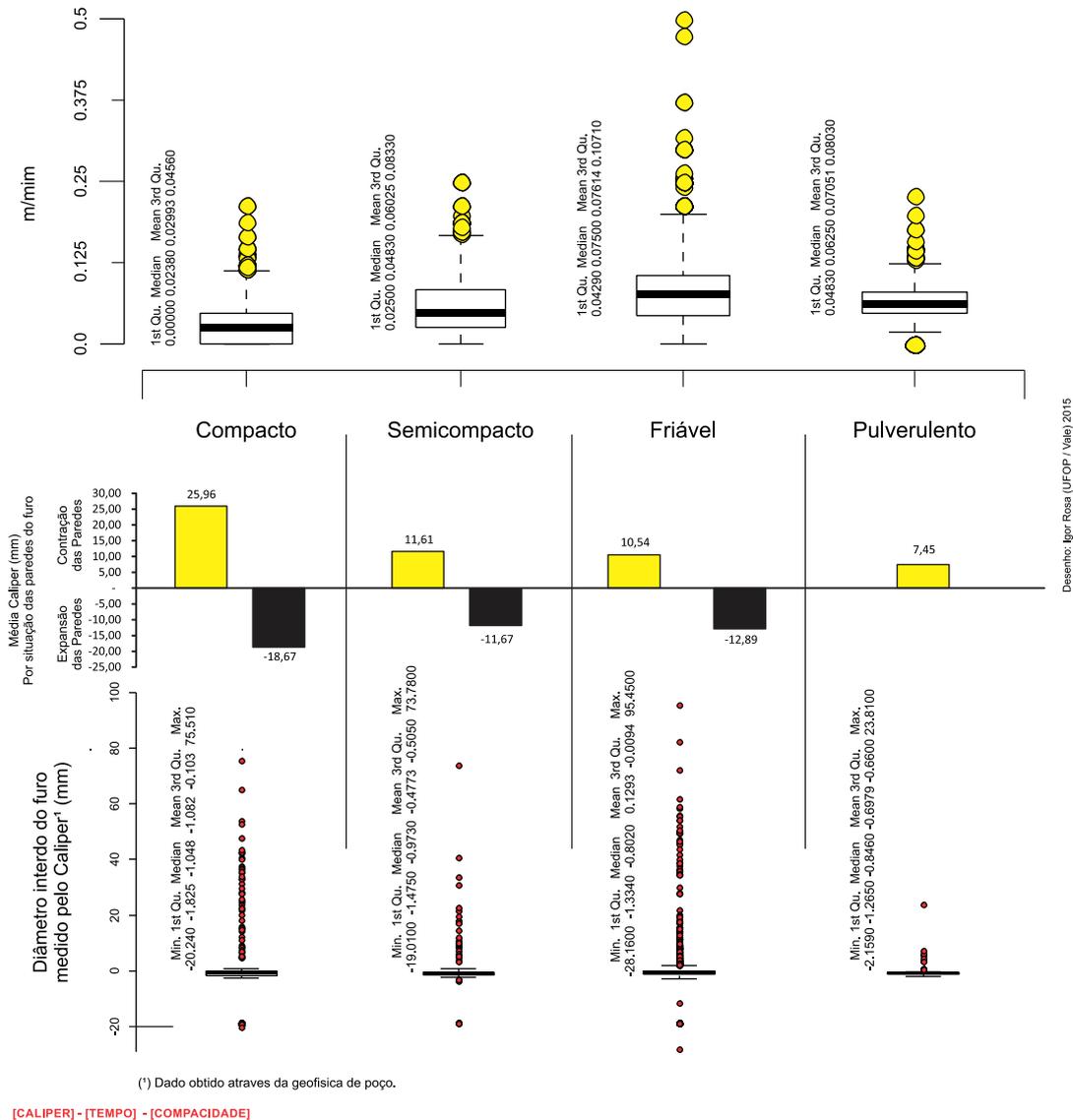
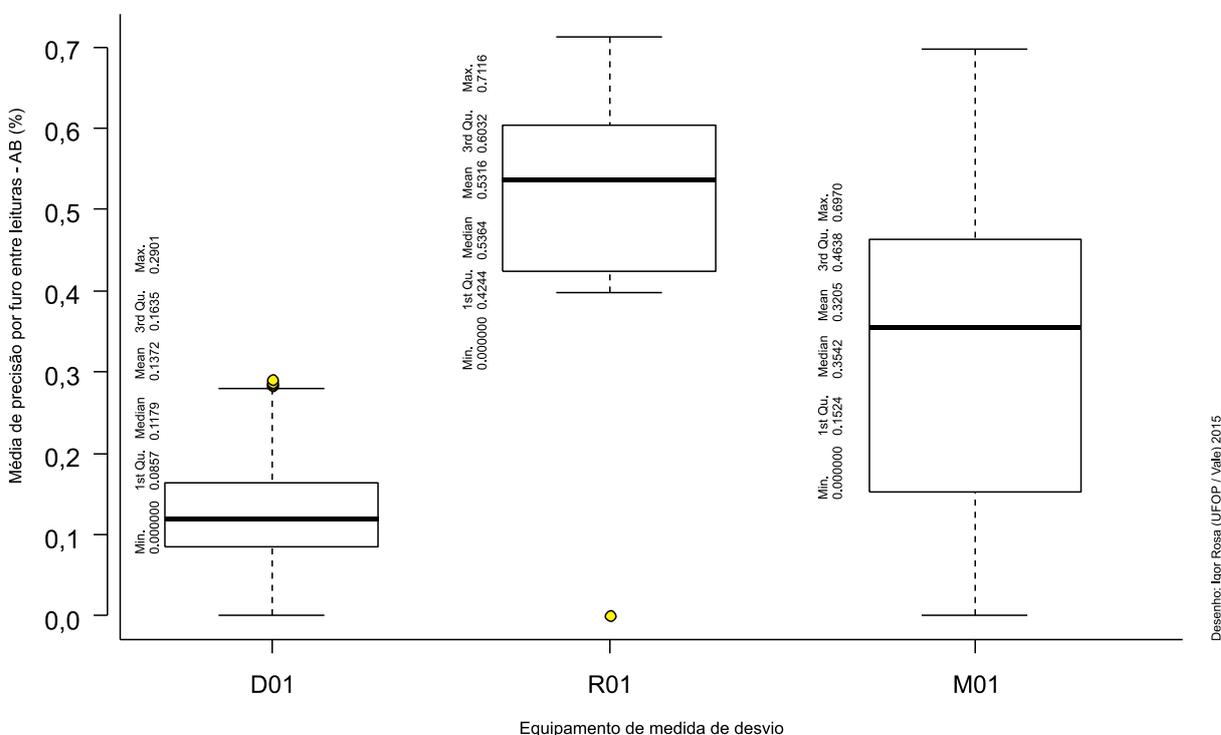


Gráfico 5.12– Tempo médio de perfuração por compacidade e integridades das paredes.

5.3.1 Precisão entre leituras de medida de desvio

Cada equipamento demonstra uma faixa de precisão bem distinta em relação às corridas A e B. O equipamento D01 demonstrou uma média de precisão maior que os equipamentos R01 e o M01 por furo perfilado, entretanto essa precisão pode ser relacionada a fatores operacionais citados em capítulos anteriores (Gráfico 5.13). A precisão aceitável entre as leituras A e B

está na ordem de 1% a 2%, portanto, todos os equipamentos apresentaram índices de precisão aceitáveis.



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

[LEITURA] - [PRECISÃO] - [EQUIPAMENTO]

Gráfico 5.13 – Precisão da leitura por equipamento.

O Gráfico 5.14 demonstra a precisão entre leituras por furo, metragem executada e a quantidade de amostras observadas. O valor máximo de precisão atingido ficou entre as profundidades 240 m a 300 m, tanto na média geral como em um dos furos observados. 50% da precisão média dos furos ficaram entre 0,21% e 0,45%. Dois furos ultrapassaram 5% sendo esses, considerados casos isolados, não inviabilizando o furo de sondagem, pois nessa situação a medida de desvio é repetida, buscando atingir índice inferior ou igual a 2%. Caso essa inconsistência permaneça o equipamento deverá ser calibrado pelo fornecedor.

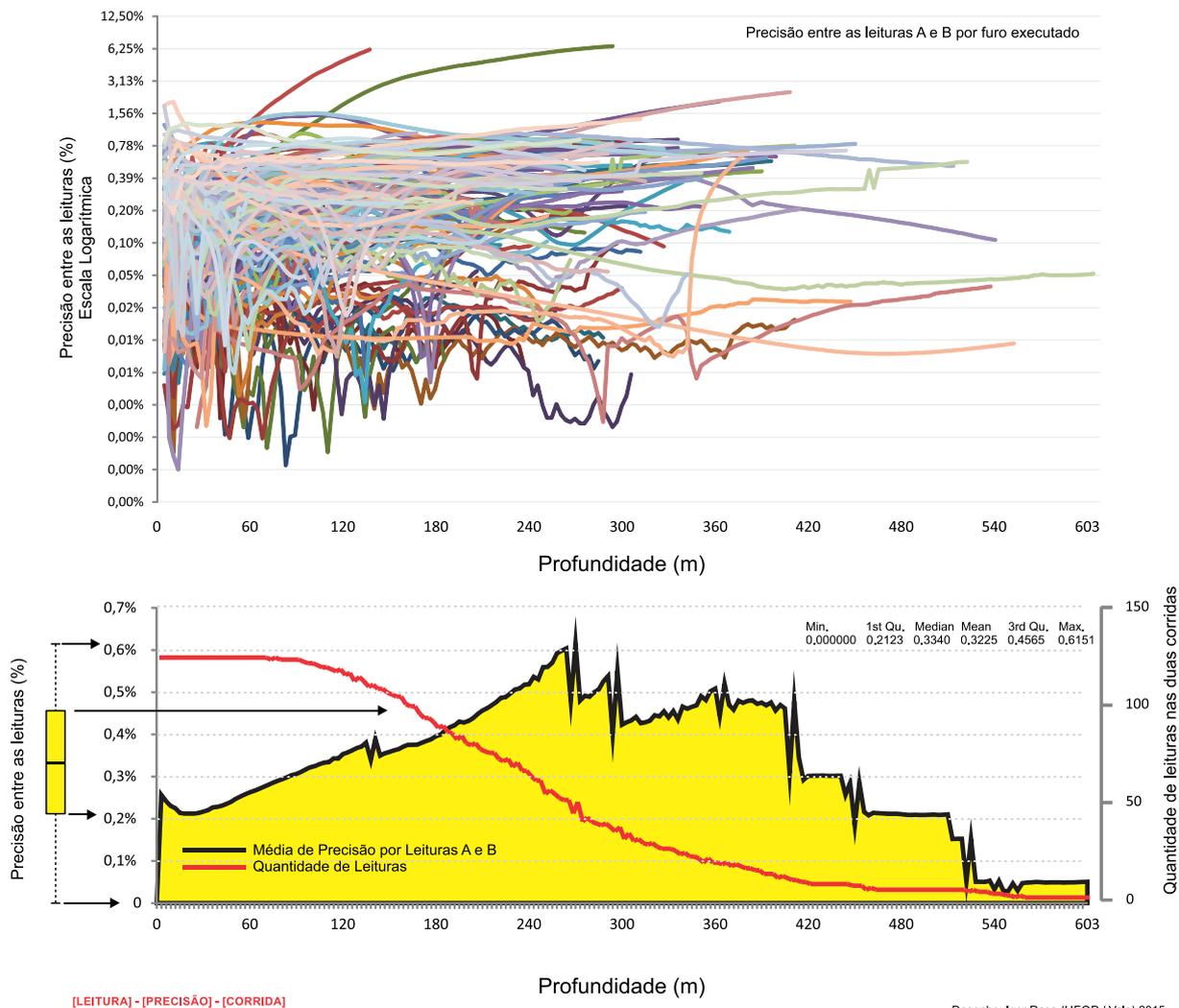
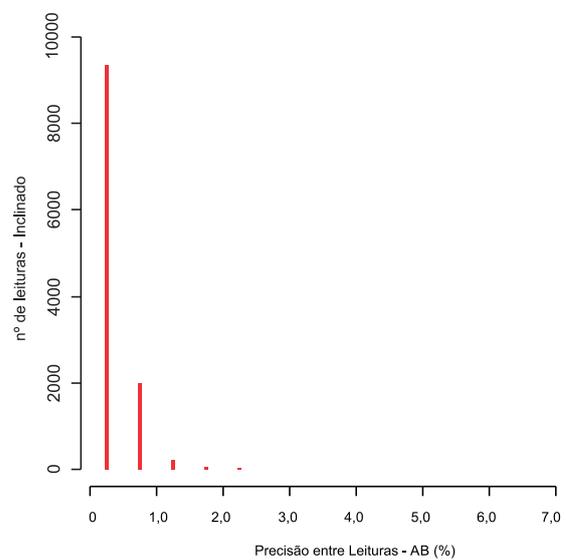
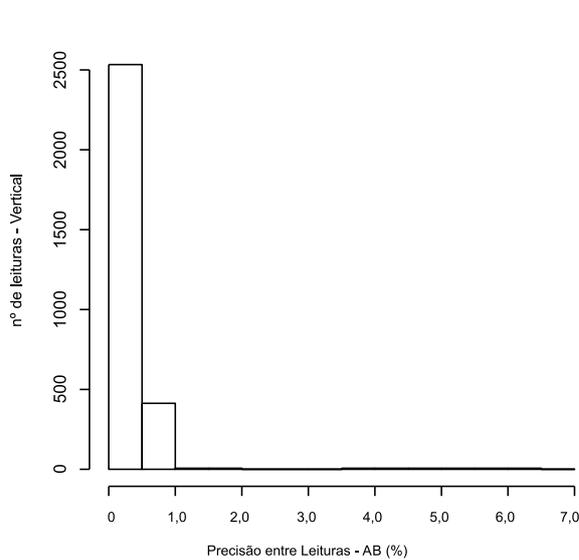
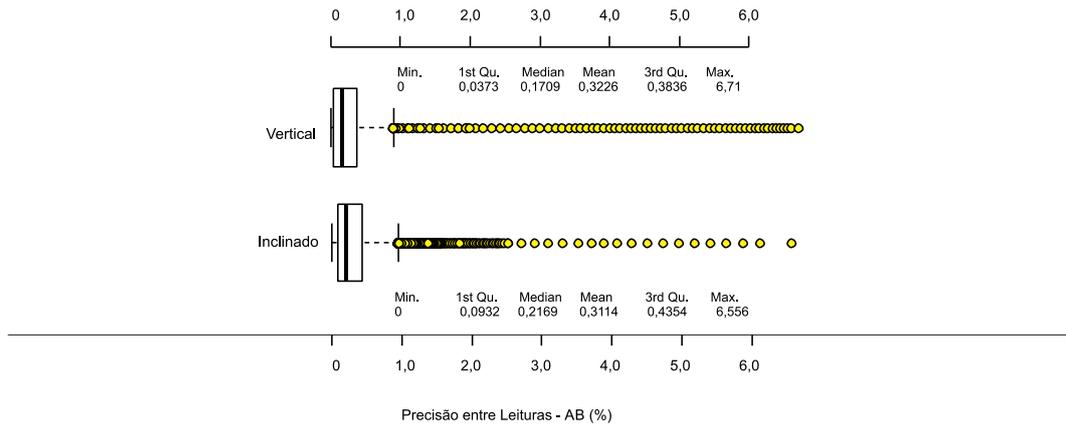


Gráfico 5.14 – Precisão entre a 1ª e 2ª corrida.

A precisão entre leituras em furos verticais e inclinados apresentou médias semelhantes, embora valores máximos ultrapassem 6%, os quais podem ser considerados como valores isolados, não inviabilizando as validações entre leituras (Gráfico 5.15).

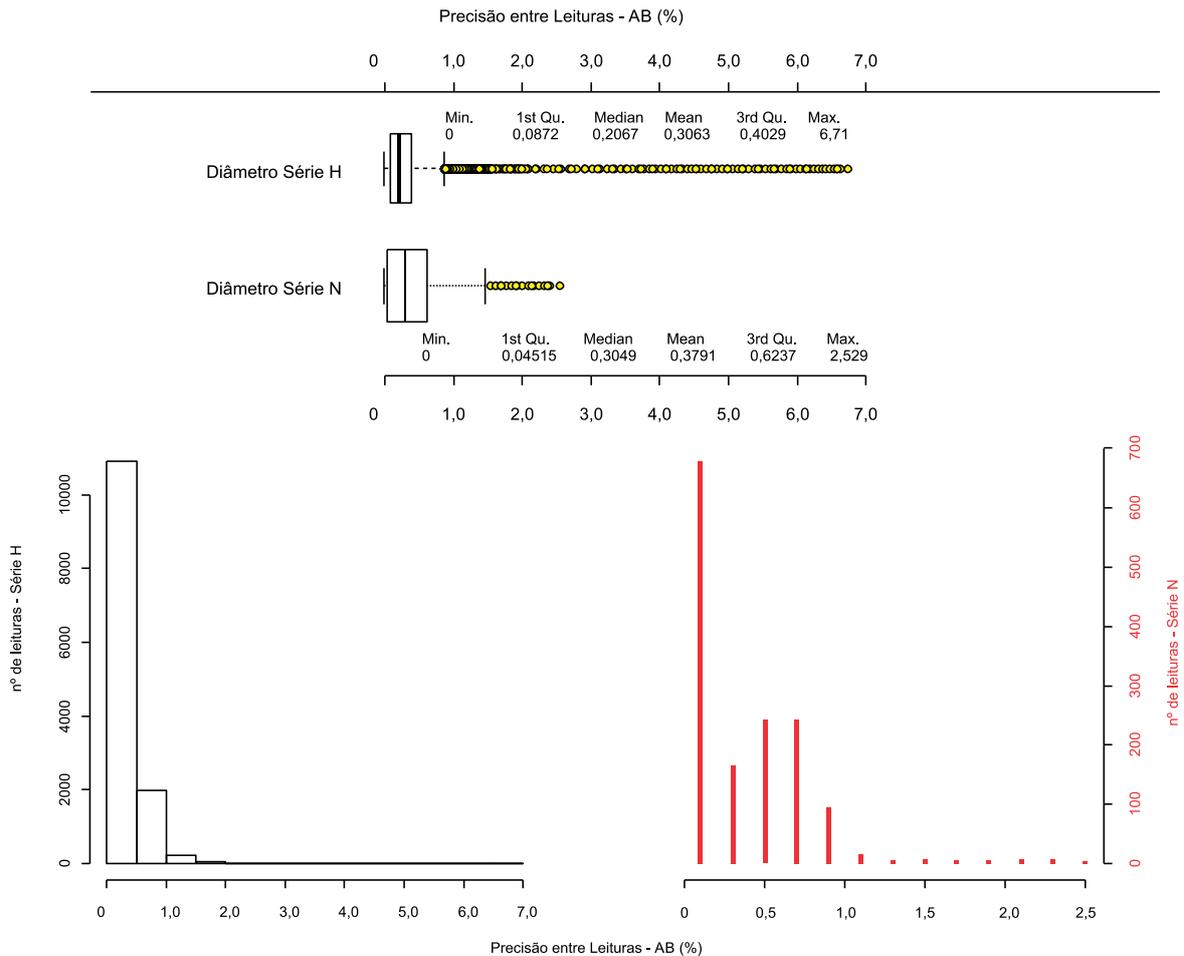


Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

[ORIENTAÇÃO] - [PRECISÃO]

Gráfico 5.15 – Precisão entre leituras por inclinação.

No Gráfico 5.16 fica evidente a menor precisão entre as leituras no diâmetro de série N em relação às leituras analisadas no diâmetro de série H. 50% das leituras no diâmetro N estão entre 0,04% e 0,6%, sendo que no diâmetro H essa variação esteve entre 0,08% e 0,4%.



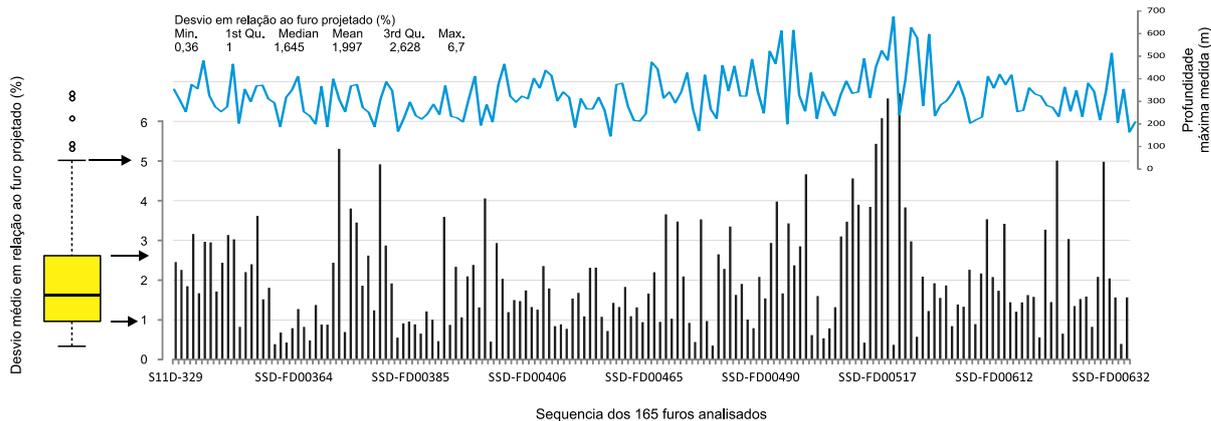
Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vêlle) 2015

[DIÂMETRO] - [PRECISÃO]

Gráfico 5.16 – Precisão entre leituras por diâmetro.

5.3.2 Desvio dos furos de sondagem com base em sua trajetória programada

O desvio médio das leituras analisadas foi calculado com base na divisão da distância entre o ponto real e o projetado em profundidade, sendo a projeção inicial do furo de sondagem em sua totalidade uma trajetória reta seguindo os ângulos de inclinação e direção estipulados em superfície. No Gráfico 5.17 foi calculada a média de desvio nos 165 furos de sondagem. Embora cinco furos tivessem desvio acima de 5%, 75% das leituras analisadas desviaram entre 0,3% a 2,6%.



[DIÂMETRO] - [PRECISÃO]

Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Gráfico 5.17 – Desvio médio por furo de sondagem.

O Gráfico 5.18 demonstra os valores máximos de desvios atingidos nos 165 furos de sondagem. 50% dos furos tiveram desvio entre 2% e 5%, 5 furos tiveram desvio máximo acima de 10%. No Gráfico 5.19 50% das leituras realizadas tiveram desvio entre 0,7% a 3,1% e a cada intervalo de 60 metros é acrescentada uma média de desvio na ordem de aproximadamente 0,8%.

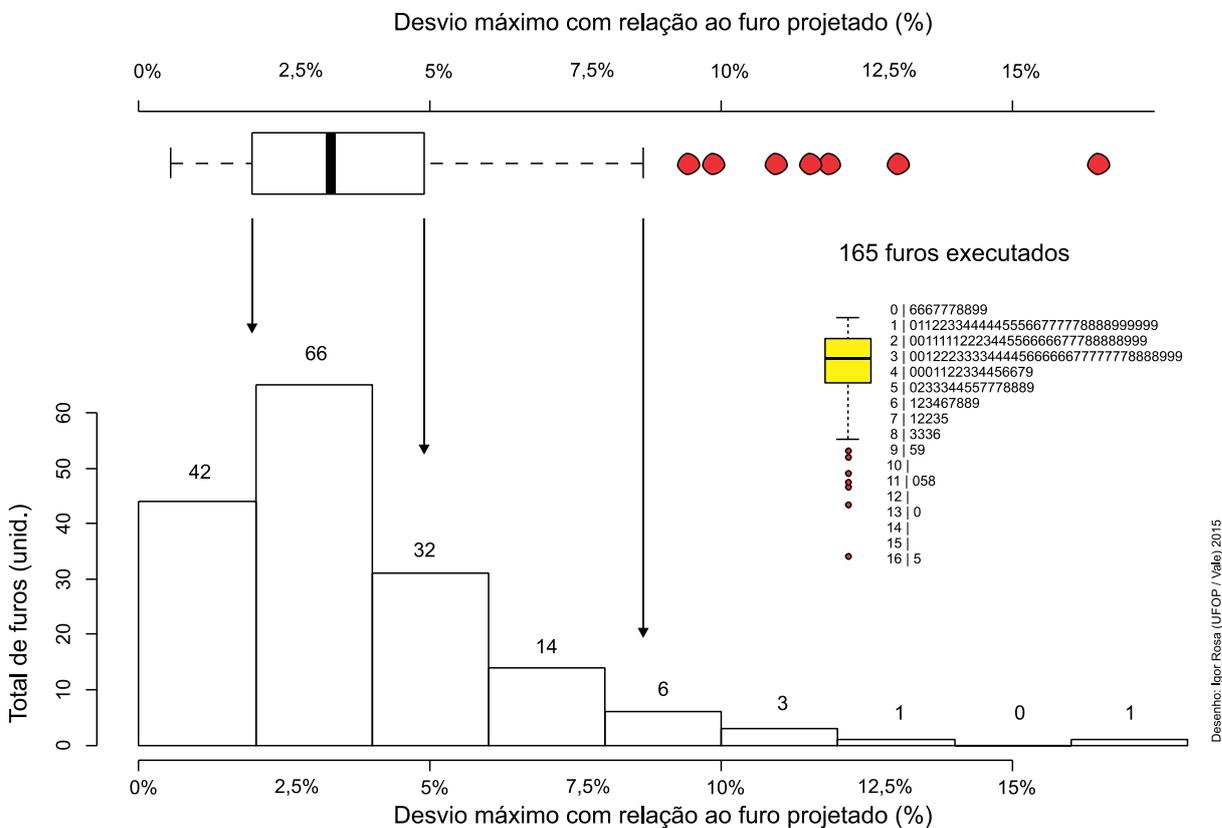
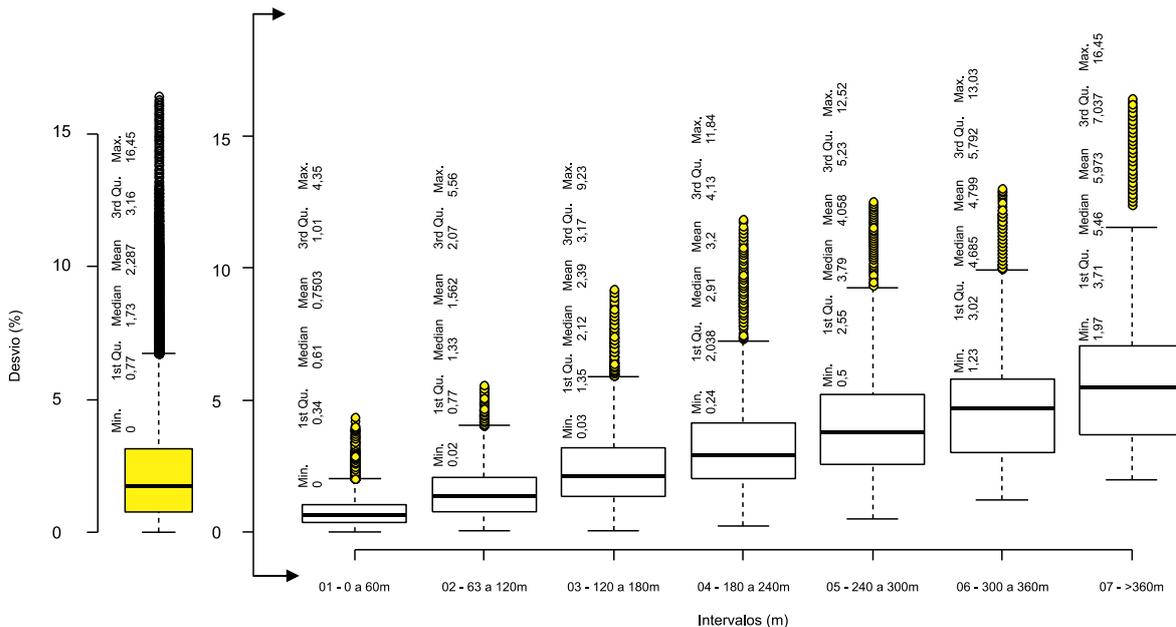


Gráfico 5.18 – Desvio máximo por furo de sondagem.

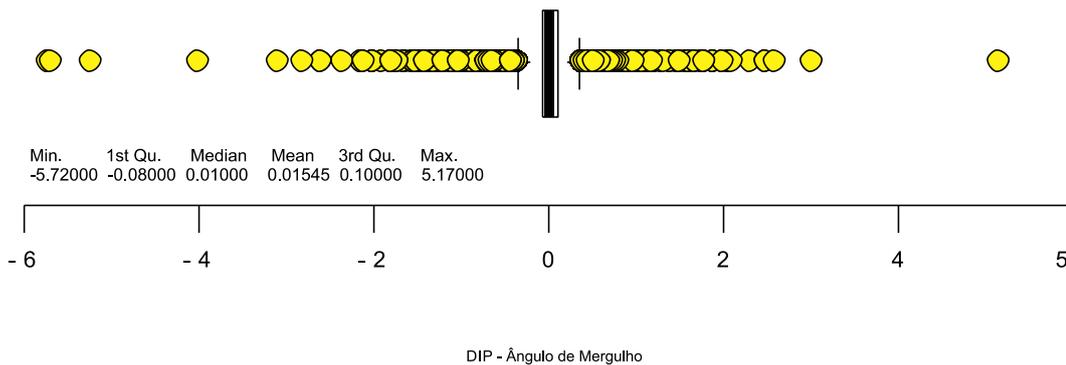


[INTERVALO] - [DESVIO]

Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Gráfico 5.19 – Desvio por intervalo de perfuração.

O Gráfico 5.20 demonstra a diferença entre leituras referente ao ângulo de mergulho. O cálculo foi baseado na diferença do valor do DIP medido em relação à leitura anterior, sendo desconsiderada a primeira leitura de cada furo.



[DESVIO] - [CALIPER]

Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

Gráfico 5.20 – Diferença do ângulo de mergulho entre leituras.

As médias de desvio entre as leituras nos furos verticais e inclinados são próximas: 2,5% em furos verticais e 2,2% em furos inclinados, uma diferença de 0,3% (Gráfico 5.21). Considero

que uma mudança de 0,3% para 0,32% não pode ser considerada “maior”!. Em relação ao diâmetro de perfuração a variação entre a média chega a ser mais que o dobro, 2,0% no diâmetro H e 4,75% no diâmetro N, no Gráfico 5.22.

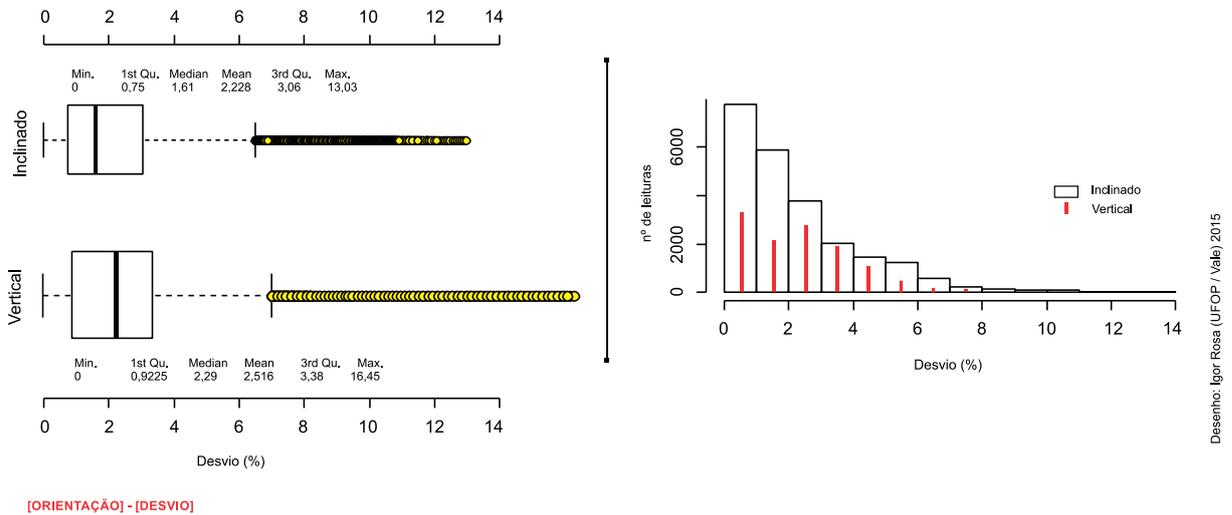


Gráfico 5.21 – Desvio por inclinação (furo vertical e inclinado).

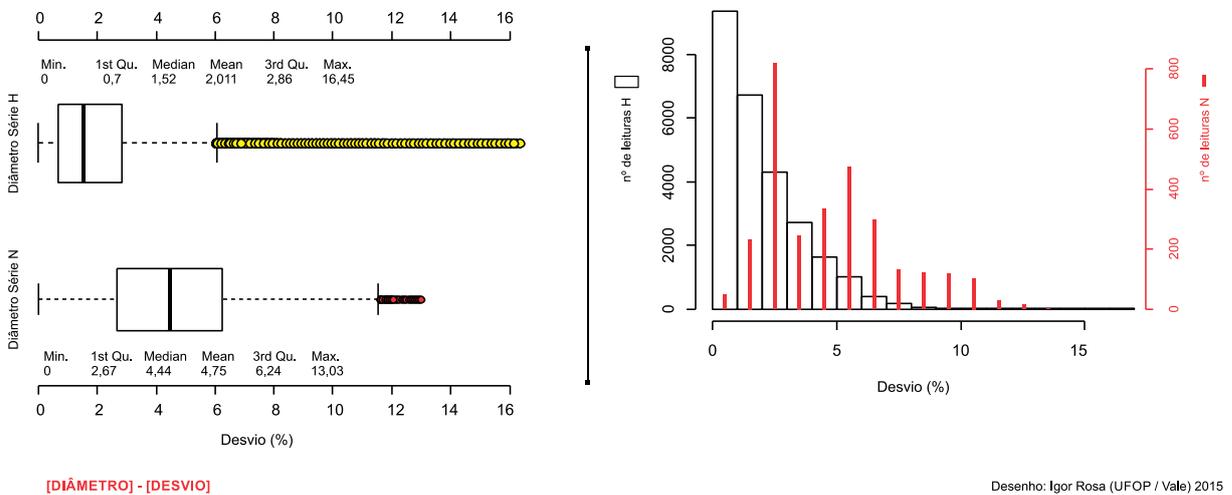


Gráfico 5.22 – Desvio por diâmetro.

No Gráfico 5.23 foram consideradas quatro faixas para os critérios de compacidade da rocha perfurada: compacto, friável, pulverulento e semicompacto. Esses critérios foram pontuados através da CLV (Classificação Litológica Visual) no processo de descrição geológica, sendo a média mais alta de desvio observada no material compacto.

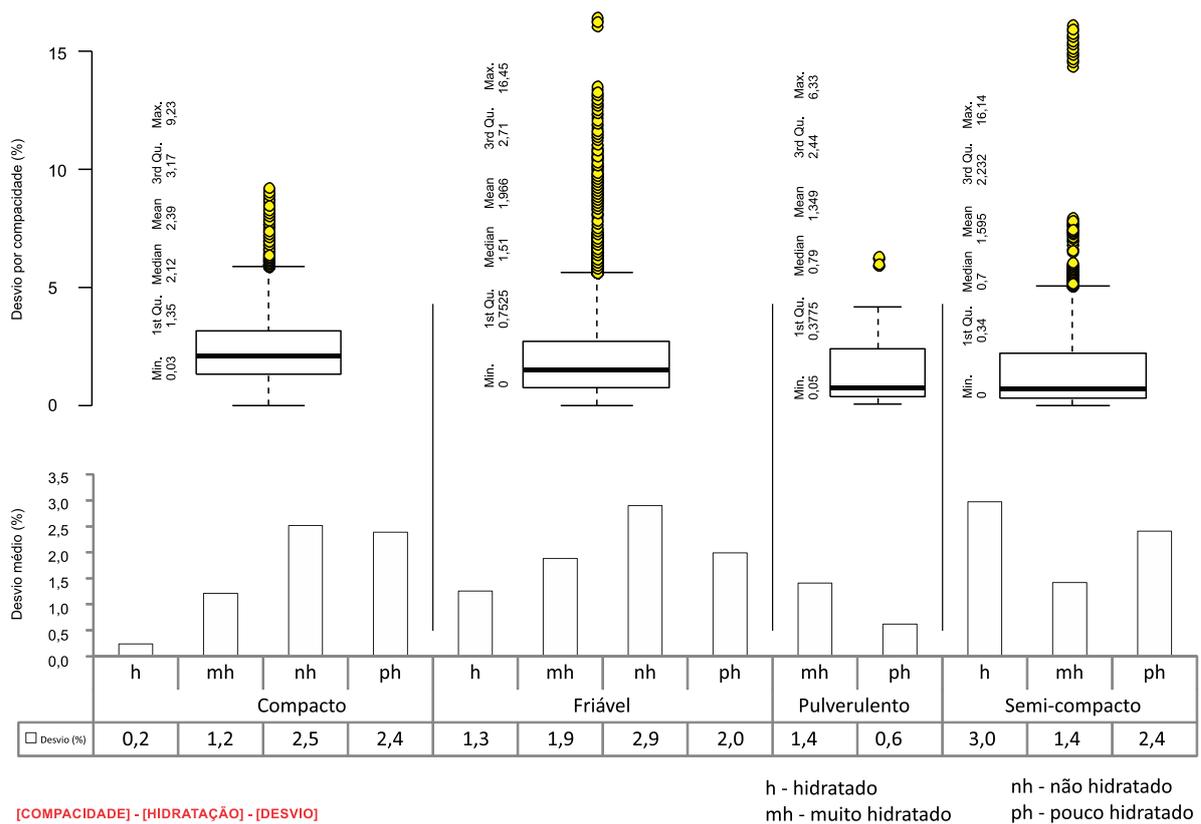


Gráfico 5.23 – Desvio por compactidade e hidratação da rocha.

A litologia que apresenta maior variação entre o primeiro e terceiro quartil foi a JP (Jaspilito), entretanto, essa litologia possui média menor que a MSD (Máfica Semidecomposta), conforme Gráfico 5.24. A litologia CA (Canga) foi classificada em apenas um intervalo de 0 a 60 metros, pois essa litologia estava presente apenas entre os primeiros 30 a 50 metros de profundidade.

As categorias Q1(Muito Pobre) e Q5(Excelente) no Gráfico 5.25, referente ao RQD, apesar de serem faixas em extremos opostos, demonstram similaridade no percentual de desvio médio e no intervalo do terceiro quartil, havendo também uma semelhança no aumento do percentual de desvio conforme aumenta a profundidade.

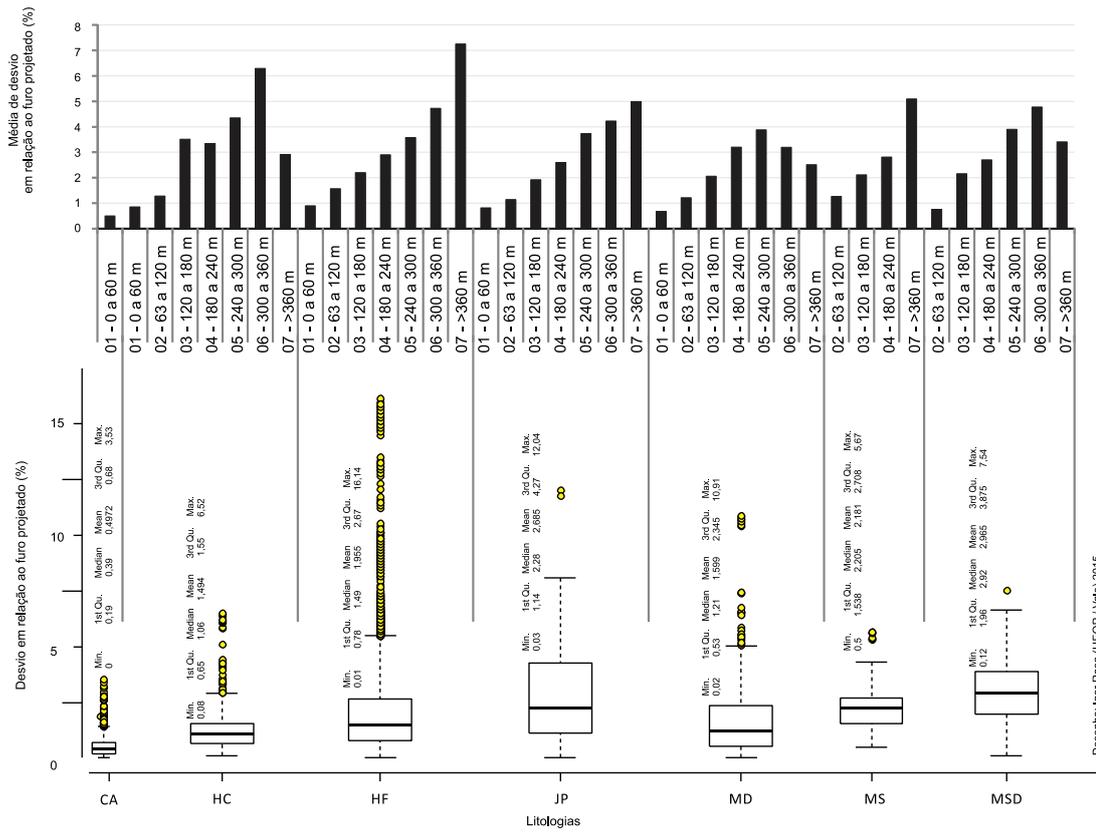


Gráfico 5.24 – Desvio por litologia e intervalo de perfuração.

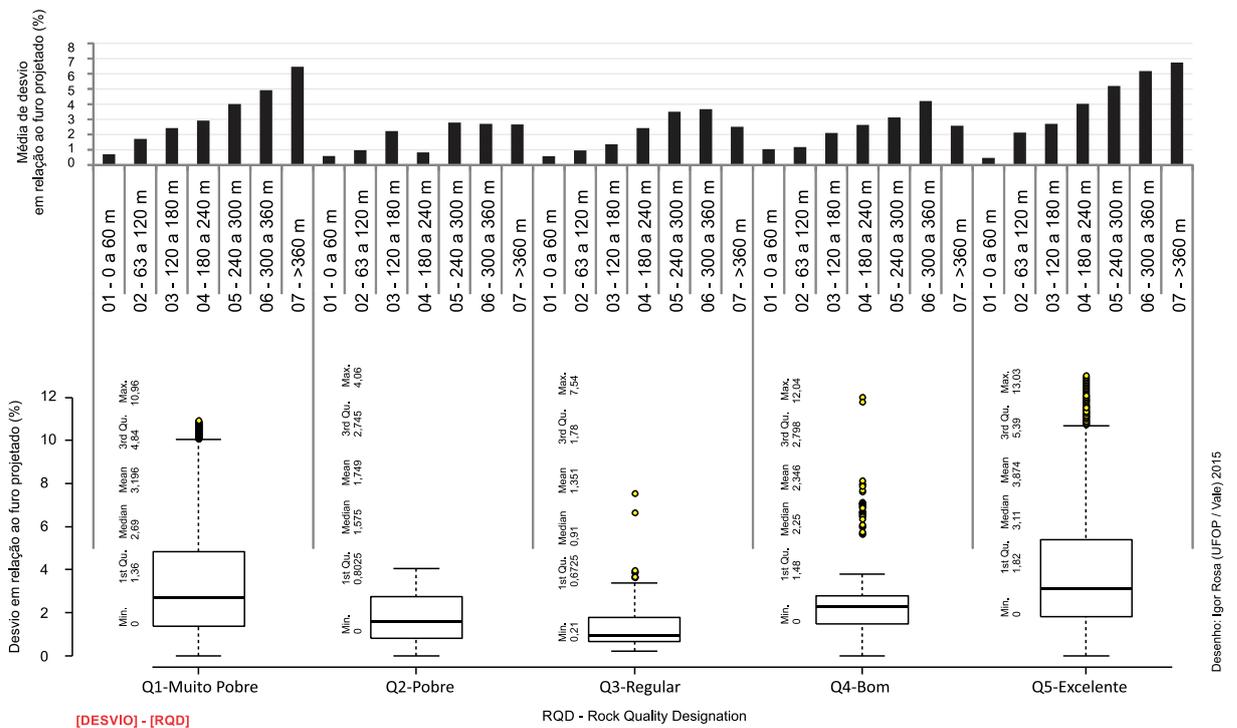


Gráfico 5.25 – Desvio por RQD e intervalo de perfuração.

No Gráfico 5.26 foram consideradas seis faixas de densidade entre 2g/cm³ a 5 g/cm³ variando a cada 0,5 g/cm³. A faixa 07 – [4.5, 5.0] apresenta o maior índice de desvio médio, entretanto a faixa 05- [3.5, 4.0[apresenta valores do terceiro quartil maior que as demais faixas.

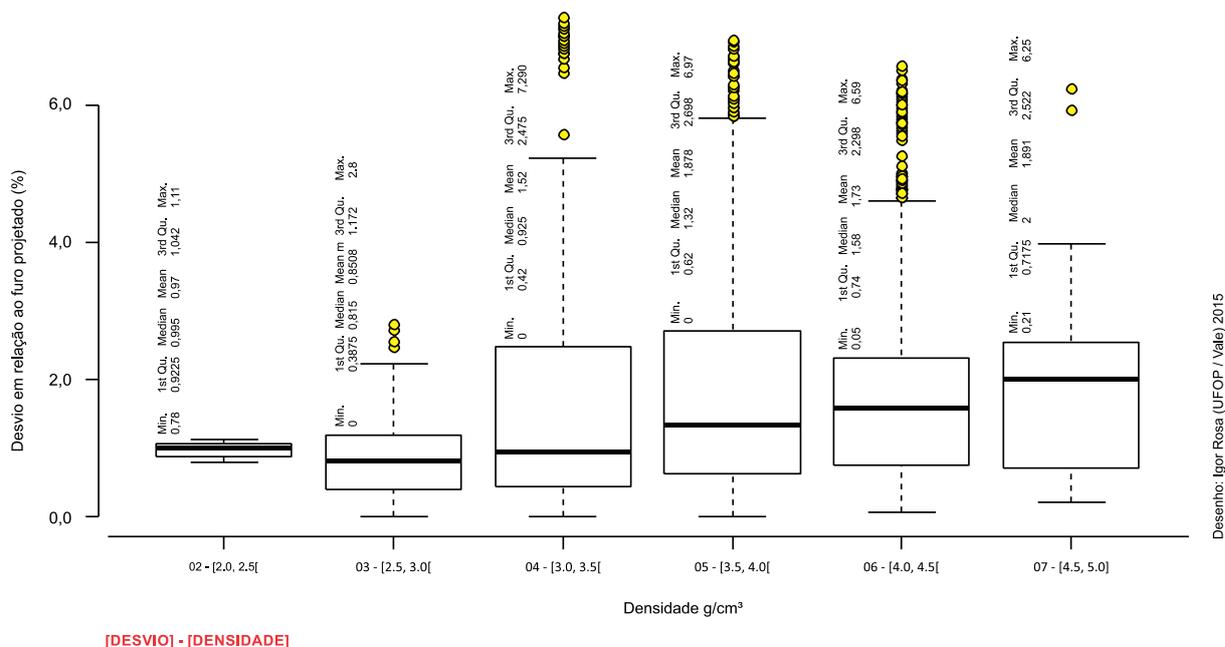


Gráfico 5.26 – Desvio por densidade (g/cm³).

Nem todos os 165 furos tiveram perfilagem geofísica na aquisição de dados de densidade e *caliper* para que pudessem ser correlacionados com as medidas de desvio. Das 29,609 leituras de media de desvio, 3.884 (13%) tiveram perfilagem geofísica de densidade e 516 (1,74%) tiveram leituras de *caliper* em furos sem revestimento.

No Gráfico 5.27 dezenove faixas, variando a cada 5 milímetros, foram classificadas para as leituras de *caliper* em furos sem revestimento, leituras feita em contato direto com as paredes do furo de sondagem. Destas, dezessete faixas sinalizaram expansão do diâmetro dos furos em relação ao diâmetro inicial de perfuração e duas faixas demonstraram fechamento dos furos ou expansão das paredes. Após a faixa A02, os desvios ficam abaixo de 1%, exceto na faixa A10 e nas faixas de expansão das paredes do furo F03 e F06. Esse índice de desvio acima de 1% pode ser relacionada à resistência da litologia durante a perfuração, a qual pode provocar

um direcionamento da haste de perfuração. Essa interpretação é sugerida pelo Gráfico 5.23, no qual a média de desvio no material compacto é de 2,39% e no pulverulento de 1,34%.

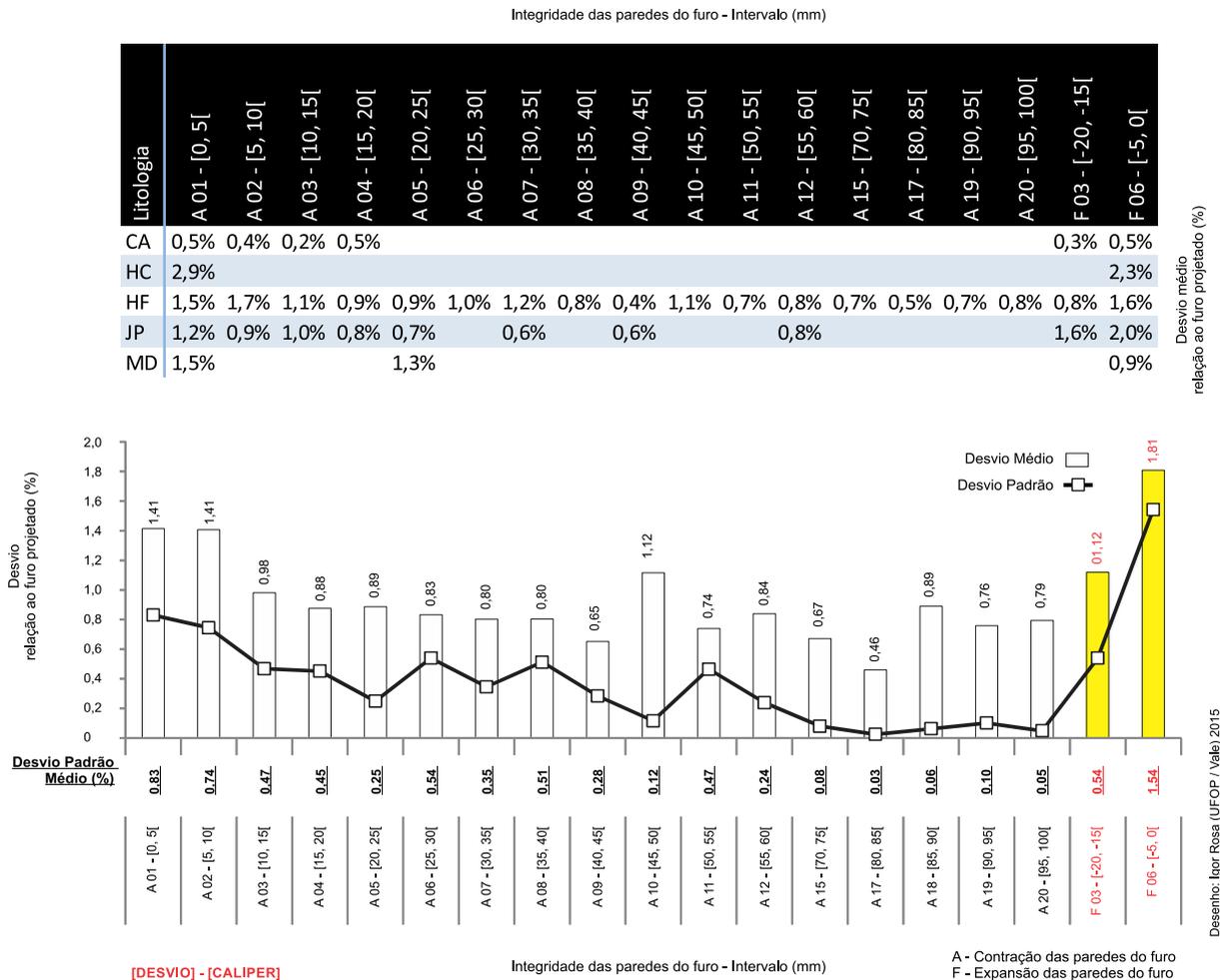


Gráfico 5.27 – Desvio médio em relação às medidas de Caliper (mm) e litologia.

Na posição NE do Gráfico 5.28 fica evidente a grande quantidade de furos com níveis de desvio mais alto se comparado com outras posições. Esse alto nível de desvio pode estar relacionado a diversos fatores operacionais e geológicos, sendo que nessa área a ocorrência de água subterrânea e fendas se tornou mais presente nos furos de sondagem que em outras posições do Gráfico 5.28. Foram calculados os níveis médios de desvio com variação de 1% a 6,7% em relação ao furo projetado.



Gráfico 5.28 – Distribuição espacial dos desvios dos furos de sondagem.

O desvio calculado na Tabela 5.11 demonstra a variação das principais variáveis em relação a cada leitura percorrida, ou seja, o cálculo foi realizado a cada três metros e não com base na trajetória final do furo programado.

Tabela 5.11 – Desvio máximo a cada leitura de 3 m.

Máximo de Desvio (%)			INTERVALO							Média Geral	
DIÂMETRO	ORIENTAÇÃO	LITO	01 - 0 a 60 m	02 - 60 a 120 m	03 - 120 a 180 m	04 - 180 a 240 m	05 - 240 a 300 m	06 - 300 a 360 m	07 - > 360 m		
H	I	CA	4,88%							4,88%	
		HC	1,50%	0,87%	0,70%	0,56%	0,58%	0,82%	0,13%	0,74%	
		HF	4,36%	3,14%	2,45%	3,31%	1,65%	0,91%	0,41%	2,32%	
		JP	1,71%	1,92%	3,61%	3,09%	1,05%	0,39%	0,35%	1,73%	
		MD	2,44%	3,14%	2,97%	0,88%	0,70%	0,29%	0,35%	1,54%	
		MS		1,04%	0,74%	0,46%				0,75%	
		MSD		0,70%	2,44%	0,70%	1,56%	1,23%	0,48%	1,19%	
	I Total Média			2,98%	1,80%	2,15%	1,50%	1,11%	0,73%	0,34%	1,88%
	V	CA		0,94%							0,94%
		HC		0,64%							0,64%
		HF		1,00%	0,75%	1,10%	1,09%	0,79%	0,93%	0,58%	0,89%
		JP		0,78%	1,04%	0,98%	0,69%		1,07%		0,91%
		MD		0,71%	0,66%	0,79%	0,37%	1,06%			0,72%
		MSD						0,28%			0,28%
V Total Média			0,81%	0,82%	0,96%	0,72%	0,71%	1,00%	0,58%	0,73%	
H Total Média			1,90%	1,47%	1,75%	1,24%	0,96%	0,81%	0,38%	1,35%	
N	I	HC					0,60%			0,60%	
		HF			0,91%	0,61%	0,67%	0,82%	0,53%	0,71%	
		JP			1,07%	1,20%	0,87%	0,71%	0,70%	0,91%	
		MD			0,00%			0,88%	0,49%	0,46%	
		MS							0,48%	0,48%	
		MSD						0,52%	0,52%	0,52%	
		I Total Média				0,66%	0,91%	0,67%	0,80%	0,54%	0,61%
V	CA		0,36%							0,36%	
	HF			0,63%			0,76%			0,70%	
	JP		0,32%	0,59%			0,85%			0,59%	
V Total Média			0,34%	0,61%			0,81%			0,55%	
N Total Média			0,34%	0,61%	0,66%	0,91%	0,71%	0,80%	0,54%	0,59%	
Total Média Geral			1,64%	1,32%	1,48%	1,18%	0,85%	0,81%	0,46%	1,04%	

LEGENDA

CA - Canga; HC - Hematita compacta; HF - Hematita friável; JP - Jaspilito; MD - Maficá decomposta; MS - Maficá Sã; MSD - Maficá semidecomposta
H ou N - Série do diâmetro de perfuração
I - Furo Inclinado; V - Furo Vertical

Desenho: Igor Rosa (UFOP / Vale) 2015

O ponto máximo calculado se refere ao desvio local da variável indicada a cada 3 metros percorridos. Podemos entender os valores da Tabela 5.11 como um indicador aproximado dos desvios máximos atingidos por categoria. Embora algumas categorias não tenham tido valores registrados, como por exemplo: desvio máximo do JP no diâmetro H, com inclinação do furo vertical, entre as profundidades 240 metros a 300 metros, poderão ser utilizados valores

aproximados na mesma série da variável em questão, ou valores médios, conforme indicado no campo Média Geral da Tabela 5.11. Utilizando valores da Tabela 5.11 na obtenção do desvio máximo de um furo de sondagem inclinado com 333 m de profundidade, sendo 15 m de CA, 78 m de HF, 90 m de MS e 150 m de JP, nesta ordem, e seus primeiros 183 m realizados com diâmetro da série H e finalizado na série N, se obteria um desvio na ordem de 1,33% ou 4,43 m.

Exemplo:

$$\begin{aligned} dl (CA) &= (me \cdot dmi); (15 \text{ m} \cdot 0,048) = 0,732 \text{ m} \\ dl (HF) &= (me \cdot dmi); (78 \text{ m} \cdot 0,0314) = 2,44 \text{ m} \\ dl (MS) &= (me \cdot dmi); (90 \text{ m} \cdot 0,0074) = 0,66 \text{ m} \\ dl (JP) &= (me \cdot dmi); (150 \text{ m} \cdot 0,0039) = 0,585 \text{ m} \end{aligned}$$

$\Sigma dl = 4,43 \text{ m}$

- me – Metragem executada na litologia em questão;
- dmi – Desvio máximo indicado (conforme Tabela 5.11);
- dl – Desvio máximo por litologia;
- Σdl – Somatório de todos os desvios por litologia. Representa o desvio máximo do furo;

O cálculo está baseado no desvio acumulativo entre intervalos a cada 3 metros com base nos índice de desvio máximo conforme Tabela 5.11.

6. CONCLUSÕES

Apesar do conceito de levantamento de trajetória de furo de sondagem ser bastante simples, espacializar o furo de sondagem, através de medidas dos ângulos de direção e inclinação no decorrer de sua trajetória, é tão necessário e importante quanto o levantamento topográfico e, em certos casos, até a própria existência do furo. A incorreta localização ou posicionamento dos dados dos testemunhos de sondagem ou informações das paredes do furo não só podem gerar incertezas no projeto de pesquisa como acarretar custos diretos e indiretos e no pior cenário, inviabilizar a abertura de uma mina com potencial mineral viável.

Embora estivessem programadas medidas de desvio para toda a metragem executada referente aos 165 furos analisados, apenas em 92% da metragem executada foi possível realizar mediada de desvio, em grande parte devido a uma zona de instabilidade a partir de 323 metros de profundidade. Alguns fatores podem contribuir para que exista essa instabilidade, entre eles: fatores geológicos relacionados à litologia que propiciam o trancamento do ferramental de sondagem no interior do furo, fatores operacionais relacionados à capacidade e dimensionamento da sonda para as características do furo programado (equipamento com profundidade limitada de perfuração) e presença de água e fendas no interior do furo.

No CAPÍTULO 4 fica evidente a importância de se poder realizar medida de desvio em furos com DIP vertical em função da instalação do equipamento de sondagem na praça de operação. Em situações específicas onde a praça de operação não possibilite a instalação do equipamento de sondagem considerando seu posicionamento com DIP do furo inclinação, uma das possibilidades seria a execução de um furo com DIP vertical e o rotacionamento do equipamento de sondagem em um ângulo que possibilite sua instalação na praça de operação. Esse procedimento se torna possível com o auxílio de uma equipamento que realize medidas de desvio em furos com DIP vertical, equipamento denominado como R01 neste estudo.

A precisão entre as leituras A e B dos equipamentos de medida de desvio, apesar de demonstrar diferenças entre os três equipamentos analisados, todos estiveram média abaixo de 1%, sendo considerado índice aceitável no processo interno de validação da Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos. Os índices de precisão em relação à inclinação dos furos de sondagem se mostraram bastantes semelhantes em furos inclinado quando comparado com furos verticais, entretanto, a precisão entre diâmetros da série H demonstrou uma maior diferença, sendo 0,28%^[9] em relação as leituras da série N.

Dos furos analisados 75% tiveram desvio médio menor que 2,7% ou seja, em um furo com 300 metros em média desvia 7,86 metros ou 1,5°. Tomando como referência o bloco do modelo geológico projetado verticalmente, o furo executado permaneceria dentro das dimensões de 25 metros de largura por 25 metros de comprimento por 15 metros de altura, ou seja, sua posição espacial não afetaria diretamente no posicionamento previsto (Anexo XIV). Para que um furo pudesse ultrapassar as dimensões do último bloco projetado verticalmente, seria necessário que atingisse um desvio médio na ordem de 4,86% a uma metragem de 300 metros, se consideramos o desvio médio de 2,62% deveria ser executada uma metragem igual ou superior a 556,39 metros para que o furo de sondagem executado saísse do ultimo bloco do modelo geológico.

Litologias compactas tendem a desviar mais que as demais litologias, sendo o jaspilito rocha com maior índice de desvio quando comparado o terceiro quartil com as demais rochas.

Conclui-se que a média de desvios realizados nos furos de sondagem rotativa diamantada testemunhada na mina de ferro de S11D de responsabilidade da empresa Vale S.A., apresentaram resultados satisfatórios em nível de precisão e acurácia, havendo um ganho significativo no conhecimento das relações das principais variáveis operacionais e geológicas quanto ao desvio do furo de sondagem. No que se refere à precisão entre leituras fica evidente que: realizar as leituras no sentido ascendente, utilizar o contador de cabo para marcação entre leituras, calibrar e dimensionar o centralizador conforme operação, ausência de fluido de perfuração ou água subterrânea no interior do furo e obedecer ao tempo mínimo de estabilização entre leituras, conforme manual do fabricante, são procedimentos e variáveis que conduzem a melhores índices. No que se refere ao desvio dos furos de sondagem fica

^[9] Dados referentes ao terceiro quartil obtido no gráfico em questão.

evidente que fatores operacionais e geológicos contribuem na alteração de trajetória: furo inclinado, utilização do diâmetro série H, menor profundidade perfurada, corte perpendicular ao plano de mergulho da rocha perfurada e uniformidade do material perfurado, contribuem para menores índices de desvio.

6.1 Recomendações e sugestões para trabalhos futuros

- **Para o processo de pesquisa mineral:**

A consolidação, análise e validações dos dados de medida de desvio estudadas nesse trabalho foram baseadas no processo de sondagem rotativa diamantada testemunhada para minério de ferro na mina de S11D com profundidade média na ordem de 277 metros, sendo utilizadas as séries de diâmetro H e N. Se recomenda, para trabalhos futuros, levantamento igual ou similar utilizando outras variáveis tais como: sondagem roto-percussiva, série de diâmetros variados dentre as quais a série P, sondagem objetivando outros minérios como manganês ou cobre, metragem média superior a 554 metros, e avaliação do desvio em minas subterrâneas considerando ângulos de mergulho positivo.

Com o avanço e incorporação da perfilagem geofísica para minério de ferro em furos de sondagem, se faz necessária a avaliação da possível incorporação da medida de desvio junto ao processo de perfilagem geofísica, levando em consideração os custos e ganho operacional no processo como um todo.

- **Para a sondagem rotativa diamantada testemunhada:**

Grande parte da programação dos furos de sondagem em pesquisa para minério de ferro não utiliza os mesmos critérios de precisão e acurácia no detalhamento da trajetória quando comparada a uma sondagem para minério de cobre ou ouro, em função do mergulho do veio mineralizado e em geral se encontram em grandes profundidades. Já os pacotes de minério de ferro possuem uma extensão maior e se encontram mais próximos da superfície. Torna-se necessário desenvolver e utilizar técnicas de acompanhamento *online* no processo produtivo, incorporado ao equipamento de perfuração, para que as variáveis operacionais e geológicas possam ser analisadas e processadas em tempo real, sendo possível analisar e projetar com

agilidade e confiabilidade não só a trajetória do furo, como contribuir com um melhor desempenho operacional no processo de perfuração.

- **Para a medida de desvio de furos de sondagem:**

Comparando o método de transmissão de dados do equipamento de medida de desvio com o equipamento utilizado na perfilagem geofísica, se percebe uma grande diferença, pois o processo de transmissão de dados dos equipamentos de medida de desvio utilizado nesse estudo exige que os dados sejam descarregados após a retirada da ferramenta do interior do furo. Caso haja necessidade de repetir a medida de desvio o equipamento tem que ser calibrado junto ao computador em superfície, introduzido novamente no furo de sondagem, retirado do furo de sondagem, descarregado junto ao computador e analisadas as leituras. No processo de perfilagem geofísica, as leituras são transmitidas em tempo real para o controlador em superfície tornando o processo mais ágil. Desta forma se faz necessário um estudo no processo de transmissão de dados dos equipamentos de medida de desvio em tempo real onde o controlador não só acompanhe as informações como possa também corrigir dados gerados através da imprecisão operacional.

Apesar de o contador de cabo ser um equipamento que já exista a mais de cinco anos no mercado, as equipes que realizaram medida de desvio nos furos listados nesse trabalho começaram a utilizar há menos de um ano. Embora fique evidenciada maior precisão e agilidade com a utilização do contador de cabo, quando comparado com o processo de marcação manual, se faz necessário um estudo para utilização de técnicas mais precisas e avançadas.

Considerando a produção bibliográfica sobre a mina de Serra Sul, pouco se tem feito no que diz respeito a trajetória de furo de sondagem. Desta forma esse trabalho contribui para a divulgação e entendimento dos principais fatores e variáveis e abre espaço para novas observações e questionamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, N. D. 2013. **Nota de Aula - Disciplina Técnicas de Perfuração - GTA 770.** Belo Horizonte - MG : s.n., 2013.

ALMEIDA, T. 2011. *A perfilagem geofísica gama-gama em depósito de ferro do Quadrilátero Ferrífero - Uma ferramenta para medição de densidade de rochas.* s.l. : Dissertação de Mestrado, PPGEM / UFRS., 2011.

ARAÚJO, O. J. B., MAIA, R, G, M., JORGE, J. X. S., COSTA, J. B. S.1988. *A megaestruturação arqueana da Folha Serra Dos Carajás.* s.l. : Anais, 1988. pp. 324-338. Vol. Cong. Latinoamericano de Geologia, GEOLOGIA.

ARCGIS. 2006. *Using Arcgis Desktop - ArcGis® 9.* NEW YORK - NY USA : ESRI, 2006.

AZEVÊDO, C.; BARBOSSA, F.; SILVA, K.2009. *Manual de Descrição Geológica de Testemunho de Sondagem.* Carajás - PA : Vale S.A., 2009.

CARNEIRO, M. A. 2009. *FUNDAMENTOS DE GEOLOGIA.* SÃO PAULO : CENGAGE LEARNING, 2009. p. 67.

CARVALHO, R. F. 2013. *Análise da Eficiência da Sondagem Rotopercussiva na Jazida de Ferro de Serra Sul, Serra dos Carajás - Pará.* BELO HORIZONTE - MG : UFOP, Dissertação de Mestrado, 2013.

CHIOSSI, N. J. 1971. *Geologia Aplicada à Engenharia.* São Paulo : D.L.P, 1971. SONDAGEM.

DALL'AGNOL, R. 1982. *Estudo comparativo de alguns maciços graníticos pós-transamazônicos da Amazônia Oriental.* Salvador - BA : SBG, Anais, 1982. pp. 500-513. Vol. 36º Cong. Brasileiro de Geologia, SONDAGEM.

DEERE D.U., MILLER R.P. 1966. *Engineering classification and index properties for intact rock*. University of Illinois, Urbana, 1966. p. 299.

DOCEGEO. 1988. *Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás*. s.l. : SGB, 1988. pp. 10-54. Vol. 35° Cong. Brasileiro de Geologia, GEOLOGIA.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. 2010. *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. SÃO PAULO : EDITORA BLUCHER, 2010. p. 104.

HERRMANN, C. 1972. *Manual de Perfuração de Rochas*. Rio de Janeiro - RJ : Polígono, 1972. Vol. 2ª Edição.

HART'S_E&P. 2002. *Logging history rich with innovation*. 2002, EANDPNET, pp. 52-55.

HIRATA, W. K., RIGON, J. C., KADEKARU, K., CORDEIRO, A. A. C., MEIRELES, E. A. 1982. *Geologia Regional da Província Mineral de Carajás*. Belém - PA : Simp. de Geologia da Amazônia, 1982. Vols. Anais SBG-NO, GEOLOGIA. 100-110.

IBGE. 2015. **Noções Básicas de Cartográfica**. [Online] 2015. [Citado em: 22 de abril de 2015.] http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoos/introducao.html.

ICMBio. 2014. www.icmbio.gov.br. *ICMBio*. [Online] 2014. [Citado em: 25 de agosto de 2014.] <http://www.icmbio.gov.br/portal/biodiversidade/unidades-de-conservacao/biomas-brasileiros/amazonia/unidades-de-conservacao-amazonia/1927-flona-de-carajas.html>.

ISO3852. 2007. *Iron ores for blast furnace and direct reduction feedstocks - Determination of bulk density*. s.l. : ISO.ORG, 2007.

LINDENMAYER, Z. G., RONCHI, L. H., LAUX, J. H. 1998. *Geologia e Geoquímica da mineralização de CU-AU primária de mina de Au do Igarapé Bahia, Serra dos Carajás*. s.l. : Bras Geociência, 1998. pp. 257-268. GEOLOGIA.

MACAMBIRA, M. J. B., RAMOS, J. F. F., ASSIS, J. F. P., FIGUEIRAS, A. J. M. 1990. *Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca*. s.l. : Convênio SEPLAN/DOCEGEO/UFPA e DNPM/DOCEGEO/UFPA, 1990. p. 150. GEOLOGIA.

MATIAS, P. 2009. *Curso de Mineração Básica*. s.l. : VALER - EDUCAÇÃO VALE, 2009. Vol. 2ª EDIÇÃO.

PEREIRA, E.. 2013. *Nota de Aula - Engenharia de Lama - GTA 730*. BELO HORIZONTE - MG : s.n., 2013.

REICHARDT, K. 1987. *A Água em Sistemas Agrícolas*. SÃO PAULO - SP : EDITORA MANOEL LTD.A, 1987.

RODRIGUES, E.; LAFON, J. M.; SCHELLER, T. 1992. *Geocronologia Pb-Pb da Província Mineral de Carajás*. São Paulo - SP : Expandidos, Boletim de Resumos, 1992. pp. 183-184. Vol. Cong. de Geologia, GEOLOGIA.

SANDIVIK. 2013. *Anual Guide to Mineral Exploration*. 2013. Vols. 3, 03-13.

SANTOS, G. J. I. 2008. *Avaliação de Recursos de Minério de Ferro Jazida de Serra Sul-Alvo S11-Corpos C e D*. BELO HORIZONTE - MG : s.n., 2008.

SILVA, G. G.; LIMA, M. J. C.; ANDRADE, A. R. F.; ISSLER, R. S.; GUIMARÃES, G. 1974. *Levantamentos de recursos naturais, geologia, Folhas SB 22 Araguaina e Parte SC 22 Tocantins*. Rio de Janeiro - RJ : Projeto RADAMBRASIL, 1974. p. 143. GEOLOGIA.

SOARES, J.A. 2013. *Nota de Aula - Perfilagem de Poços - GTA 760*. BELO HORIZONTE - MG : UFOP, 2013.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. 2003. *Decifrando a Terra*. SÃO PAULO - SP : EDITORA NACIONAL, 2003. p. 195. Vol. 2º.

VALE. 2012. *Nossa História*. Minas Gerais - MG: s.n., 2012. Vol. 2 Capítulo.

VALE. 2014a. *Relatório de Sustentabilidade*. Rio de Janeiro - RJ : Vale S/A, 2014a.

VALE. 2014b. **Negócios**. [Online] 25 de Agosto de 2014b. [Citado em: 25 de 10 de 2014.]
<http://www.vale.com/brasil/pt/business/mining/paginas/default.aspx>.

WEBBER, T. 2008. *Estimativa de qualidade de carvão usando krigagem dos indicadores aplicados a dados obtidos por perfilagem geofísica*. Porto Alegre - RS : Dissertação de Mestrado, PPGEM - EE - UFRGS, 2008. p. 236.

Anexos

Anexo I. BOLETIM DE SONDAGEM^[10]

De		Até		AVANÇO	RECUPERAÇÃO		LITOLOGIA	DIAM.	MÉT.	COROA					Nº DA LUVA	
				Metros	%					Nº	Fab.	Serie	min.	cm/min.		
250,55								NR2	WL							
TOTAL										Horímetro Inicial: 13395		Horímetro Final: 13399				
REVESTIMENTO				ÁGUA				MATERIAIS FORNECIDOS				DMT				
Diâmetro	Metros			Nome				Qtd.	Distância:		Km					
NX	80,80			Dist. de Bombeamento: 3000 m					Observações							
Caminhão Pipa:				<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO												
ATIVIDADES		1ª Hora	2ª Hora	3ª Hora	4ª Hora	5ª Hora	6ª Hora	7ª Hora	8ª Hora	9ª Hora	10ª Hora	11ª Hora	12ª Hora			
101 Transportando pessoal		15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00							
102 Transportando sonda																
103 Instalando praça																
104 Desmontando praça																
105 DDS ou treinamento																
106 Batendo lama																
107 Inserindo ferramenta																
108 Injetando lama																
109 Perfurando																
110 Sacando ferramenta																
111 Retirando testemunho																
112 Pescando camisa																
113 Inserindo camisa																
114 Revestindo furo																
115 Trocando barrilete ou camisa																
116 Pescando ferramenta																
117 Cimentando furo																
118 Recortando furo																
119 Desatrancando furo																
120 Lavando furo																
121 Desviando furo																
122 Linha D'água																
123 Perfiliando o furo																
124 Instalando piezômetro																
125 Manutenção preventiva																
126 Manutenção corretiva																
127 Refeição																
128 Quebra do equipamento																
129 Falta de ferramental																
130 Falta de materiais																
131 Falta de pessoal																
132 Causas extremas																
133 Aguardando o cliente																
134 Detonação																
135 Acidente																
136 Falta d'água																
137 Lavando Sonda																
138 Orientando Testemunho																
139 Abastecendo Sonda																
Sondador		9217			Ajudante 1			8898			Ajudante 2					
Supervisor		5688			Pançiano de S. Silva			Cliente			Luci A. Silva 3002					
Emerison Batista																

Handwritten notes:
 - Left margin: "Pai. Isgen Geosol" and "Le Inocando Cabo Primário"
 - Right margin: "Le Aguardando Pescado e mordente"
 - Center: "DIGITADO" stamp dated 31/09/14 by [signature]

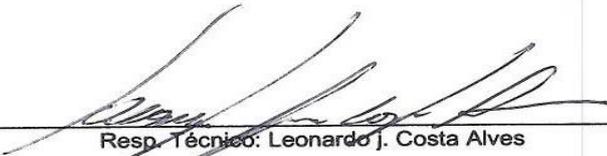
[10] Boletim de Sondagem confeccionado pela empresa Geosol Geologia e Sondagem S/A à serviço da Vale sobre o contrato SAP 5900022742/2014

Anexo II. IMPLANTAÇÃO DE MARCO TOPOGRÁFICO^[11] (Descritivo)

MEMORIAL DESCRITIVO IMPLANTAÇÃO MARCOS DE APOIO A PROSPCCÃO MINERAL ALVO S11D.

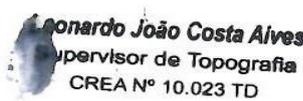
Área Pesquisada: S11D
Proprietário: VALE
Município: CANAÃ DOS CARAJAS
Estado: Pará
Executor: Divisão de Topografia e Geoinformação LTW- Geologia e Meio Ambiente LTDA.

Inicia-se a descrição deste primeiro Marco implantado no vértice LJC-01, de coordenadas N 9.292.278,706m E 573.862,625m e Altitude de 903,677m situado próximo a torre de observação do plator S11D. Deste, segue com azimute 170°51'17" e distância de 327,270m até o segundo Marco implantado no vértice LJC-02, de coordenadas N 9.291.955,599m E 573.914,641m e Altitude de 895,259m situado no mesmo acesso que leva a torre de observação próximo da casa de bomba GeoSol. Deste, segue com azimute de 278°23'15" e distância de 1.768,59m, até o terceiro vértice implantado LJC-04, de coordenadas N 9.292.213,576m E 572.164,968m e Altitude de 781,529m situado embaixo da árvore de maior porte acima da baixada da cachoeira. Deste, segue com azimute de 61°11'53" e distância de 652,45m, até o quarto e último vértice implantado LJC-03, de coordenadas N 9.292.527,915m. e E 572.736,705m. e Altitude de 765,242m; situado no final do primeiro acesso a esquerda após ao heliporto. Por fim, fecha-se no ponto inicial da descrição deste perímetro. Todas as coordenadas aqui descritas estão geo-referenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro, a partir da estação ativa da RBMC de PD04_UTM, de coordenadas N 9.328.891,245 e E 593179,974, e encontram-se representadas no Sistema UTM, referenciadas ao Meridiano Central 51° WGr. Todos os azimutes e distâncias, áreas e perímetros foram calculados no plano de projeção Coordenadas UTM - Datum: SAD 1969, Zona 22 Sul Altitude referente ao Marégrafo Imbituba.


Resp. Técnico: Leonardo J. Costa Alves

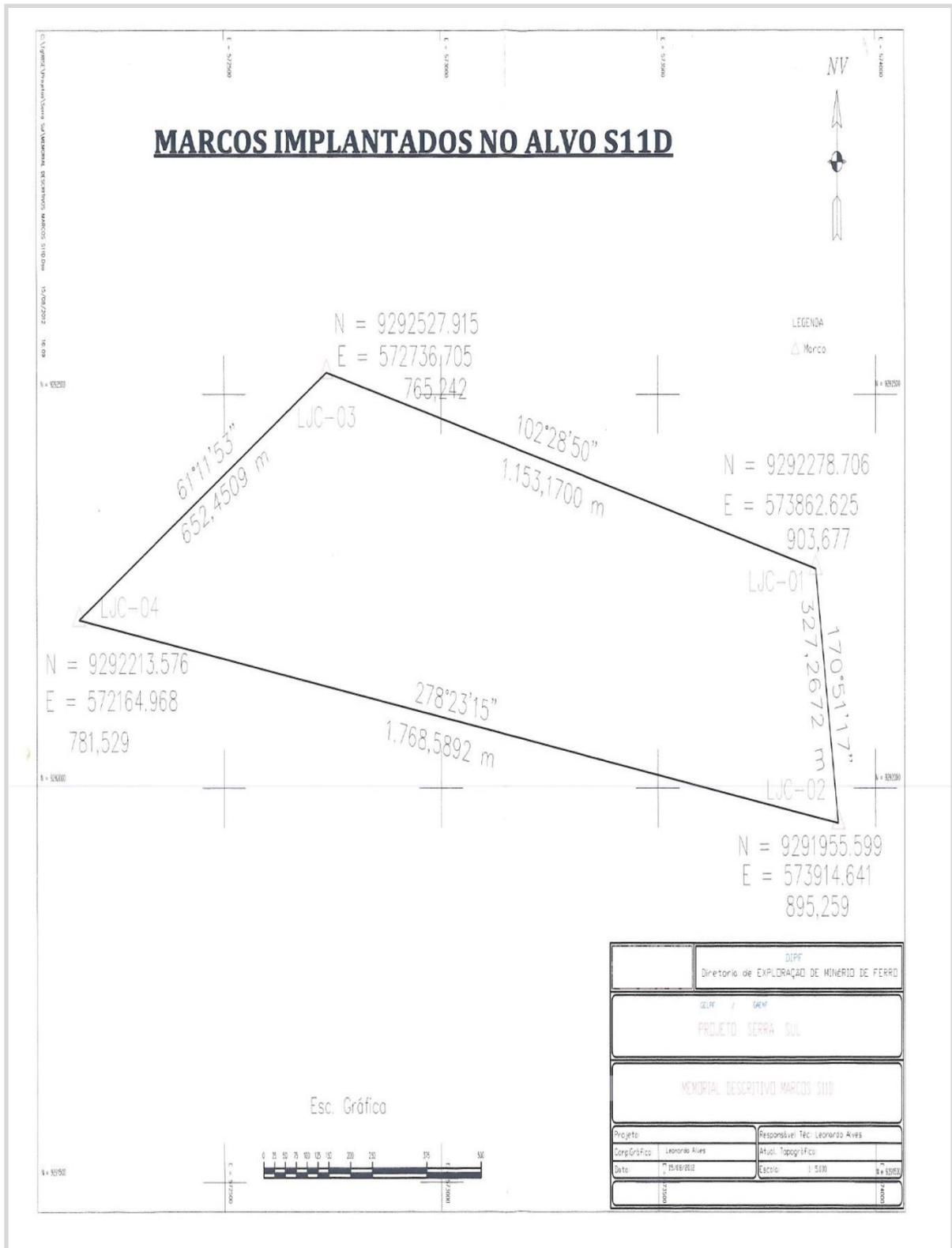
PROFISSAO: Supervisor de Agrimensura.

CREA -10023 TD/PA


Leonardo João Costa Alves
Supervisor de Topografia
CREA Nº 10.023 TD

^[11] Marcos Topográficos implantados pela empresa LTW Geologia e Meio Ambiente à serviço da Vale sobre o contrato SAP 5900005542/2011

Anexo III. IMPLANTAÇÃO DE MARCO TOPOGRÁFICO^[12] (Triangulação)



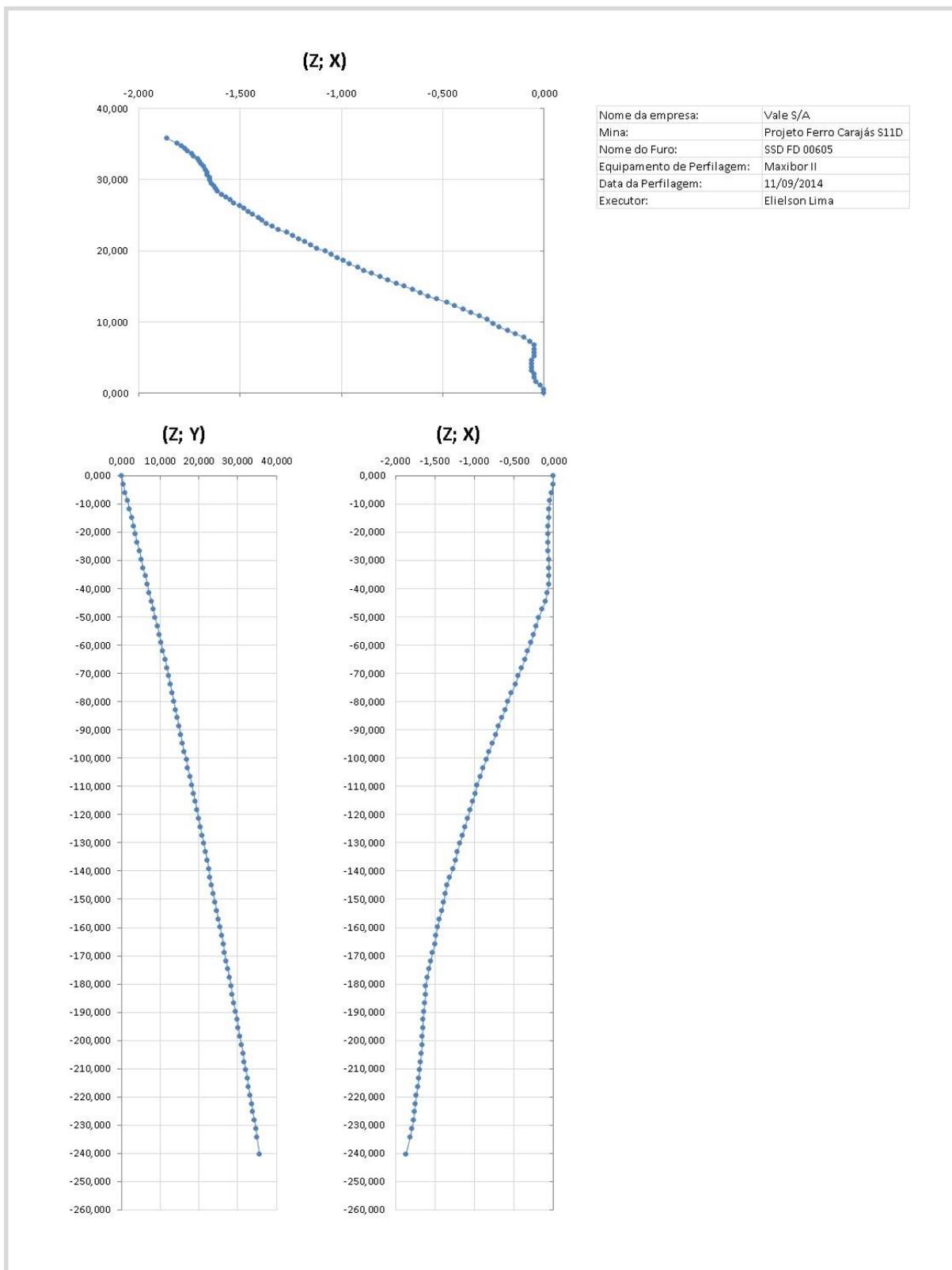
[12] Marcos Topográficos implantados pela empresa LTW Geologia e Meio Ambiente à serviço da Vale sobre o contrato SAP 5900005542/2011

Anexo IV. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO DE FURO DE SONDAGEM^[13]

 PROJETO S11D LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO PARA PESQUISA GEOLÓGICA MEMORIAL DESCRITIVO - LOCAÇÃO E CADASTRO DE FUIROS DE SONDAGEM			
Furo Programado:		00016FR-SSD	
Coordenadas UTM – Datum: SAD 1969, Zona 22 Sul Marégrafo Imituba			
X	Y	Altitude (Z)	
576560,893	SUPRIMIDO	728,478	
SEÇÃO	ESTAÇÃO	Azimute	Inclinação
NA	NA	165	80
Furo Locado:		00016FR-SSD	
Coordenadas UTM – Datum: SAD 1969, Zona 22 Sul Marégrafo Imituba			
X	Y	Altitude (Z)	
576560,893	SUPRIMIDO	728,478	
Furo Executado:		SSD-FD00605	
Coordenadas UTM – Datum: SAD 1969, Zona 22 Sul Marégrafo Imituba			
X	Y	Altitude (Z)	
576564,782	SUPRIMIDO	728,573	
SEÇÃO	ESTAÇÃO	Azimute	Inclinação
NA	NA	164°17'20"	77°17'28"
DADOS DO LEVANTAMENTO			
EQUIPAMENTO UTILIZADO			
Marca:	Estação Total Eletrônica TopCon		
Modelo:	GTS-102N		
Precisão:	01"		
PONTO DE AMARRAÇÃO			
Ponto de partida	LIC-01_LIC-02_LIC-03_LIC-04		
TOPÓGRAFO RESPONSÁVEL	Leonardo Alves		
Assinatura:	 Leonardo Alves CREA-10023 TDPA		Data: 31/08/14
Leonardo João Costa Alves Supervisor de Topografia CREA Nº 10.023 TD			

[13] Levantamento Topográficos de Furo de Sondagem realizado pela empresa LTW Geologia e Meio Ambiente à serviço da Vale sobre o contrato SAP 5900005542/2011

Anexo V. PERFILAGEM – MEDIDA DE DESVIO DE FURO DE SONDAGEM^[14]



[14] Perfilagem – Medida de Desvio realizada pela empresa Geosol Geologia e Sondagem S/A à serviço da Vale sobre o contrato SAP 5900022742/2014

Anexo VII. PERFIL CONSTRUTIVO DE PIEZÔMETRO^[16]



ORDEM DE SERVIÇO DE INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETRO
SONDAGEM GEOTÉCNICA E HIDROGEOLOGICA

MINA: SSD RAMAL: 2788
 FISCAL: LIRA-2736
 DATA: 12/09/2014

COORDENADAS N: SUPRIMIDO INCLINAÇÃO: 80°
 E: 576564,782 AZIMUTE: 165°
 Ct: 729,617

PROFUNDIDADE PROGRAMADA: 500,00 TEMPO ESTIMADO: 25 Dias
 SONDA: CS14-507 Nº FURO: SSD-FD00605
 SONDADOR: GEOVANE LIZIANA LESSANDRO

OBS: De 160,00m a 148,00m fíltos. Com 149,00mts de tubo liso pois tem 1,00m de tubo acima da boca do furo, pre-filtro de 160,00m até 5,00m, de 5,00m, até 0,0 selo de cimento na boca do furo, de 160,50 até o fundo do furo terra.

Amostragem - recuperar ? SIM NÃO
 Intervalo de _____ mts a _____ mts

CHECAGEM DE SEGURANÇA
 Distância segura dos taludes ? SIM NÃO
 Necessita leira de proteção ? SIM NÃO
 Já construída
 Acesso em boas condições ? SIM NÃO

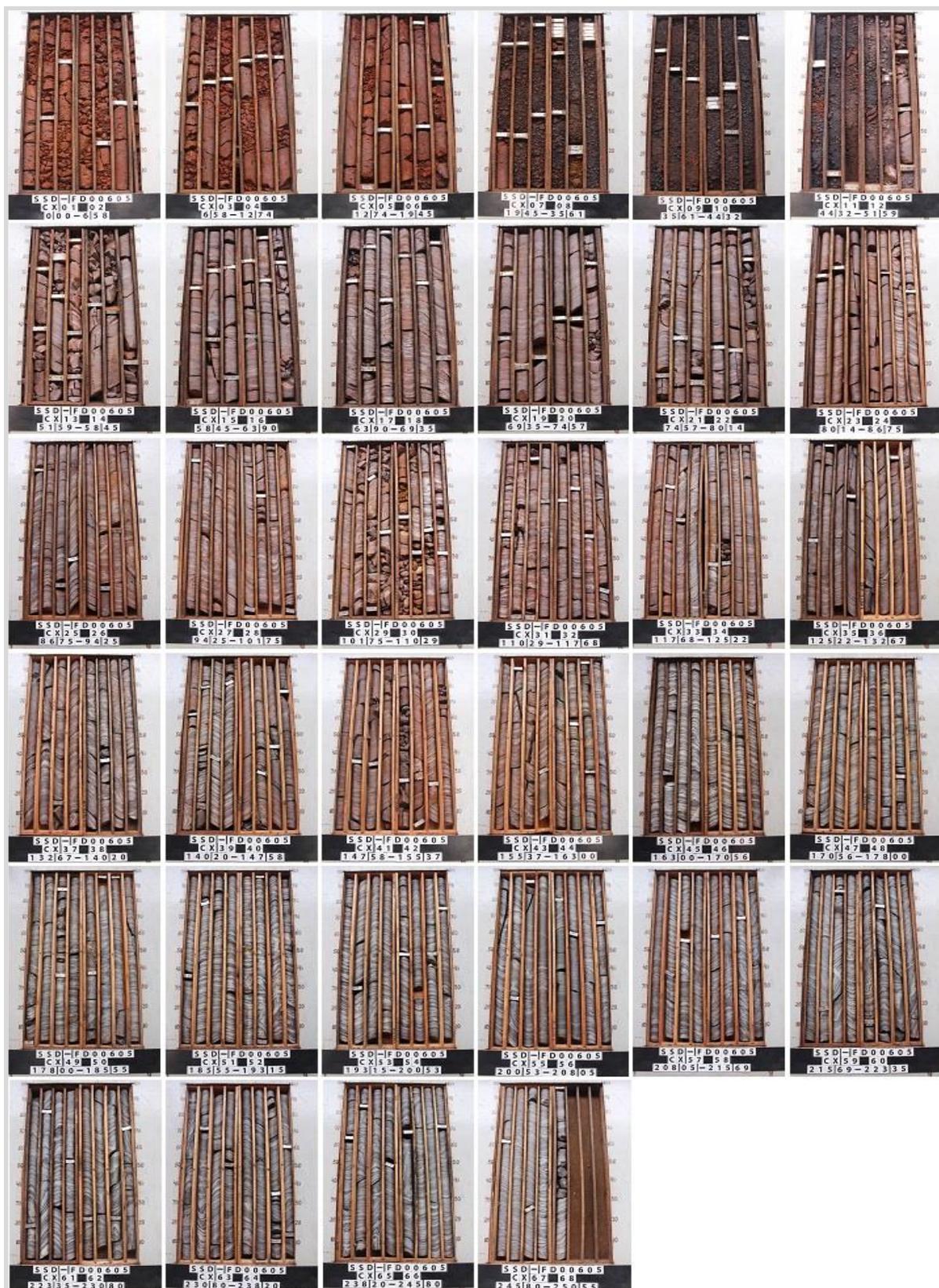
De acordo - GEOSOL: Sanderson Chaves S. Lira Matricula: 6142
 De acordo - VALE: Fabio M. Horta Matricula: 03850277

PERFIL CONSTRUTIVO DE PIEZÔMETRO

DADOS PROGRAMADOS				DADOS EXECUTADOS				DADOS COMPLEMENTARES				LEGENDA PIEZÔMETRO			
ÁREA=	SSD	N=	SUPRIMIDO	FURO=	SSD-FD00605	N=	SUPRIMIDO	SONDA=	CS14-507	CANO LISO		LEGENDA LITOLÓGICA	CQ VERDE BRILHANTE		
FURO=	0018FR-SSD	E=	576560,893	PROF=	250,25	E=	576564,782	SONDADOR=	GEOVANE LIZIANA LESSANDRO	FILTRO				CQ VERDE BRILHANTE	
PROF=	500,00	C=	728,478	Cpz (A) =	NR	CT_PZ=	729,617	INÍCIO=	8/8/2014 1ª	SELO DE BENTONITA					CQ VERDE BRILHANTE
DIP=	80	AZ=	165°	Cpz (B) =	NR	CÓDIGO Pz:		TÉRMINO=	12/9/2014 1ª	MATERIAL TERRA/AREIA					
										PRE-FILTRO		CQ VERDE BRILHANTE			
DATA	DE	ATE	AVANÇO	LITO	REC.	%	OBSERVAÇÃO	PERFIL	PERFIL DO Pz	CQ VERDE BRILHANTE HQ MARROM MSO AMARELO ESCURO MS TURQUESA MS BÁSICA AZUL PETROLEO HF ROSA HC VERMELHO JP AZUL SR OU DEST. AMARELO CLARO AT AZUL PÁLIDO ARG BRANCO IT AZUL ESCURO OL AMARELO BR TURQUEZA CLARO					
6/8/14	0,00	19,00	19,00	CQ											
7/8/14	19,00	27,60	8,60	HF											
8/8/14	27,60	28,30	0,70	HC											
8/8/14	28,30	30,20	1,90	SR											
8/8/14	30,20	30,80	0,60	HC											
8/8/14	30,80	31,30	0,50	HF											
8/8/14	31,30	33,30	2,00	HF											
8/8/14	33,30	35,40	2,10	SR											
8/8/14	35,40	39,40	4,00	HF											
8/8/14	39,40	40,50	1,10	SR											
8/8/14	40,50	42,00	1,50	HF											
8/8/14	42,00	42,50	0,50	SR											
8/8/14	42,50	45,00	2,50	HF											
8/8/14	45,00	45,70	0,70	SR											
8/8/14	45,70	50,50	4,80	HF											
8/8/14	50,50	52,00	1,50	JP											
11/8/14	52,00	53,65	1,65	JP											
11/8/14	53,65	54,25	0,60	SR											
11/8/14	54,25	59,65	5,40	JP											
12/8/14	59,65	64,50	4,85	JP											
13/8/14	64,50	69,65	5,15	JP											
14/8/14	69,65	80,00	10,35	JP											
15/8/14	80,00	80,80	0,80	JP											
18/8/14	80,80	86,35	5,55	JP											
19/8/14	86,35	104,35	18,00	JP											
20/8/14	104,35	119,35	15,00	JP											
21/8/14	119,35	141,90	22,55	JP											
22/8/14	141,90	160,70	18,80	JP											
25/8/14	160,70	162,00	1,30	JP											
29/8/14	162,00	193,35	31,35	JP											
8/9/14	193,35	203,30	9,95	JP											
8/9/14	203,30	205,05	1,75	JP											
8/9/14	205,05	207,75	2,70	JP											
8/9/14	207,75	241,55	33,80	JP											
9/9/14	241,55	250,55	9,00	JP											
	250,55		250,55												
	0,00		0,00	FIM											
	0,00		0,00												
	0,00		0,00												
	0,00		0,00												

[16] Perfil Construtivo de Piezômetro confeccionado pela empresa LTW Geologia e Meio Ambiente à serviço da Vale sobre o contrato SAP 5900005542/2011 e equipe Vale de Hidrogeologia sobre coordenação do Geólogo Fabio Horta.

Anexo IX. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE FURO DE SONDAGEM^[18]



^[18] Registro Fotográfico realizado pela empresa LTW Geologia e Meio Ambiente à serviço da Vale sobre o contrato SAP 590005542/2011

Anexo X. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DE FURO DE SONDAGEM^[19]

		Descrição Geológica de Testemunhos		Projeto: SSD Furo: SSD-FD00605	
Geólogo Descritor: Fernando Pinheiro Salgado Prez		Sist. Coordenadas: UTM-22S		Prof. Final: 250,55	
Data Descrição: 23/10/2014		Coordenada X: 578.564,78		Metr. Avançada: 250,55	
Empr. Descritora: Vale		Coordenada Y: SUPRIMIDO		Metr. Recuperada: 231,10	
Nº de Caixas: 68,00		Cota Z: 728,57		Rec. Total (%): 92,24	
DIP: -77,29		Azimute: 164,29		Metr. Perfilada: 243,00	
De (m)	Até (m)	Comp.	Lito	Descrição	
0,00	19,80	19,80	Canga de Minério	Material compacto, muito hidratado, de cor cinza amarronzado escuro, com estrutura irregular. Composto por: Hematita, magnetita, goethita e argilominerais. pouco magnético, contato inferior gradacional. Observações: Canga de Minério compacto com cavidades que ora está preenchida por goethita ora está vazia. Localmente a rocha encontra-se muito fragmentada.	
19,80	28,45	8,65	Hematito Friável	Material friável, muito hidratado, de cor preto acinzentado escuro. Composto por: Hematita, magnetita, goethita e limonita. muito magnético, contato inferior não observado. Observações: Hematito friável com limonita/goethita localmente	
28,45	30,35	1,90	Sem recuperação		
30,35	33,45	3,10	Hematito Friável	Material friável, muito hidratado, de cor preto acinzentado escuro. Composto por: Hematita, magnetita, goethita e limonita. muito magnético, contato inferior não observado. Observações: Hematito friável com limonita/goethita localmente. Não houve recuperação nos intervalos de 30,95 a 31,45m	
33,45	35,55	2,10	Sem recuperação		
De (m)	Até (m)	Comp.	Lito	Descrição	
35,55	50,65	15,10	Hematito Friável	Material friável, muito hidratado, de cor preto acinzentado escuro. Composto por: Hematita, magnetita, limonita e goethita. muito magnético, contato inferior brusco. Observações: Hematito friável com limonita/goethita. Não houve recuperação nos intervalos de 39,55 a 40,65m, 42,15 a 42,65m e de 45,15 a 45,85m	
50,65	250,55	199,90	Jaspilito Compacto	Material compacto, muito hidratado, de cor cinza esbranquiçado escuro, com estrutura bandada. Composto por: Hematita, magnetita e quartzo. Grau de fraturamento baixo, muito magnético, contato inferior não observado. Observações: Jaspilito compacto com muitas micro-dobras e micro-falhas. Possui diques centimétricos de basalto com sulfetos associado. Observa-se também veios de quartzo. Próximo aos veios de quartzo e aos diques, a rocha encontra-se brechada.	

^[19] Descrição Geológica de Furo de Sondagem extraída do software GDMS – *Geological Data Management Systems* / 2014

Anexo XI. DESCRIÇÃO E CLASSIF. GEOMECÂNICA DE FURO DE SONDAGEM^[20]

De		Até		Rank	Classe	Grau Fraturamento	Grau Consistência	Grau Alteração	Alteração Parede	Abertura Parede	Espaçamento	Rugosidade	Descontinuidade	Preench.	Classe RQD
0,00	19,80					Não se aplica ou não observado	Dura	Altamente Alterada					Não se aplica ou não observado		0,00
19,80	28,45					Não se aplica ou não observado	Média Macia	Altamente Alterada					Não se aplica ou não observado		0,00
28,45	30,35														0,00
30,35	33,45					Não se aplica ou não observado	Média Macia	Altamente Alterada					Não se aplica ou não observado		0,00
33,45	35,55														0,00
35,55	50,85					Não se aplica ou não observado	Média Macia	Altamente Alterada					Não se aplica ou não observado		0,00
50,85	250,55	32,00	II			Extremament e Dura	Fresca	Pouco Alterada	Pequena	Pequeno	Levemente rugosa	Fratura	Hidróxidos		1,00

^[20] Descrição e Classificação Geomecânica de Furo de Sondagem extraída do software GDMS – *Geological Data Management Systems* / 2014.

Anexo XII. PLANO DE AMOSTRAGEM DE FURO DE SONDAGEM^[21]

HOLE_NUMBER	depth_from	depth_to	SAMPLE_NUMBER	analytical_flow_name	Al2O3_per_LAB	CaO_per_LAB	Fe_per_LAB	MgO_per_LAB	Mn_per_LAB	P_per_LAB	PPC_per_LAB	SiO2_per_LAB	TiO2_per_LAB
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001	CJLP2008	1,4	0,006	64,67	0,069	0,033	0,202	4,81	0,71	0,223
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001-01	CJLP2008	1,33	0,006	64,89	0,067	0,032	0,202	4,75	0,7	0,212
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001-02	CJLP2008	1,22	0,006	64,68	0,074	0,03	0,18	4,28	0,7	0,191
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001-03	CJLP2008	1,62	0,006	64,74	0,065	0,037	0,21	5,13	0,71	0,228
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001-04	CJLP2008	2,54	0,006	61,37	0,066	0,048	0,258	6,97	0,84	0,418
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001-05	CJLP2008	3,2	0,006	60,22	0,07	0,053	0,304	7,74	1,19	0,645
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002-01	CJLP2008	1,19	0,006	65,31	0,047	0,004	0,159	3,64	0,7	0,11
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002	CJLP2008	1,17	0,006	65,41	0,045	0,004	0,153	3,61	0,7	0,112
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002-02	CJLP2008	0,98	0,006	66,02	0,041	0,004	0,121	3,1	0,66	0,095
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002-03	CJLP2008	1,01	0,006	66	0,046	0,004	0,135	3,28	0,67	0,101
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002-04	CJLP2008	1,64	0,006	64,26	0,041	0,004	0,211	5,04	0,66	0,173
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002-05	CJLP2008	2,17	0,006	62,53	0,044	0,01	0,27	6,23	0,71	0,266
SSD-FD00605	19,8	28,45	SSD-FD00605-003	SNGL	0,56	0,006	66,89	0,04	0,153	0,022	2,15	0,93	0,023
SSD-FD00605	28,45	30,35	SSD-FD00605-004NR	NR-NS									
SSD-FD00605	30,35	33,45	SSD-FD00605-005	SNGL	5,72	0,006	60,94	0,047	0,034	0,095	5,42	0,68	0,227
SSD-FD00605	33,45	35,55	SSD-FD00605-006NR	NR-NS									
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007	CJLP2008	0,99	0,01	67,2	0,078	0,025	0,018	1,66	1,08	0,038
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007-01	CJLP2008									
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007-02	CJLP2008	2,52	0,006	65,44	0,088	0,004	0,016	2,5	0,88	0,044
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007-03	CJLP2008	0,71	0,012	68,27	0,069	0,014	0,011	1,19	0,87	0,024
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007-04	CJLP2008	0,76	0,008	67,3	0,065	0,066	0,021	1,75	1,13	0,031
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007-05	CJLP2008	1,2	0,007	65,84	0,109	0,004	0,028	2,06	1,45	0,066
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008	CJLP2008									
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008-01	CJLP2008	13,8	0,006	47,41	0,188	0,004	0,008	7,04	9,55	0,306
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008-02	CJLP2008	3,67	0,006	59,6	0,075	0,004	0,008	2,56	7,57	0,082
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008-03	CJLP2008	0,94	0,008	67,55	0,042	0,004	0,008	1,31	1,85	0,032
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008-04	CJLP2008	0,69	0,006	66,87	0,027	0,004	0,009	1,39	2,34	0,027
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008-05	CJLP2008	0,94	0,006	63,7	0,042	0,004	0,01	1,49	6,63	0,043
SSD-FD00605	50,65	60,35	SSD-FD00605-009										
SSD-FD00605	60,35	70,4	SSD-FD00605-010										
SSD-FD00605	70,4	80,8	SSD-FD00605-011										
SSD-FD00605	80,8	250,55	SSD-FD00605-012NS										

[21] Plano de Amostragem de Furo de Sondagem extraída do software GDMS – *Geological Data Management Systems* / 2014.

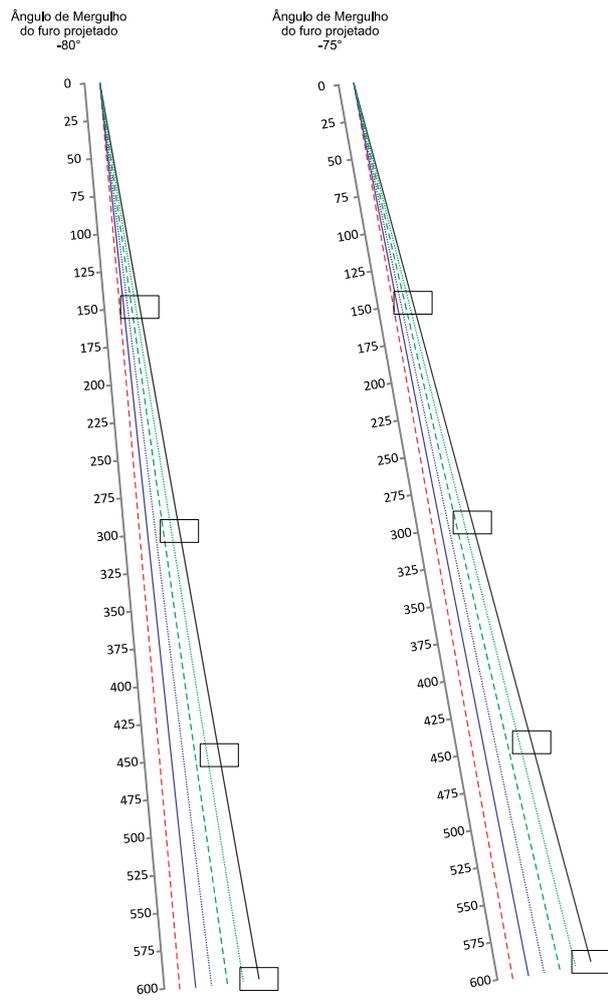
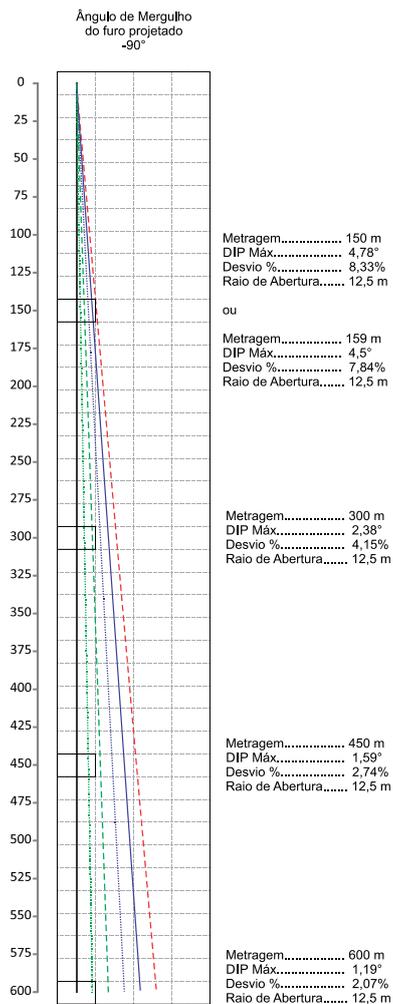
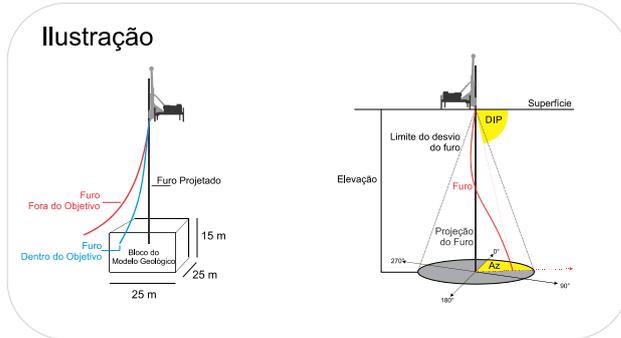
Anexo XIII. RESUMO ANÁLISE QUÍMICA^[22]

HOLE_NUMBER	depth_from	depth_to	SAMPLE_NUMBER	analytical_flow_name	Al2O3_per_LAB	CaO_per_LAB	Fe_per_LAB	MgO_per_LAB	Mn_per_LAB	P_per_LAB	PPC_per_LAB	SiO2_per_LAB	TiO2_per_LAB
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001	CJLP2008	1,4	0,006	64,67	0,069	0,033	0,202	4,81	0,71	0,223
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001-01	CJLP2008	1,33	0,006	64,89	0,067	0,032	0,202	4,75	0,7	0,212
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001-02	CJLP2008	1,22	0,006	64,68	0,074	0,03	0,18	4,28	0,7	0,191
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001-03	CJLP2008	1,62	0,006	64,74	0,065	0,037	0,21	5,13	0,71	0,228
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001-04	CJLP2008	2,54	0,006	61,37	0,066	0,048	0,258	6,97	0,84	0,418
SSD-FD00605	0	10,5	SSD-FD00605-001-05	CJLP2008	3,2	0,006	60,22	0,07	0,053	0,304	7,74	1,19	0,645
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002-01	CJLP2008	1,19	0,006	65,31	0,047	0,004	0,159	3,64	0,7	0,11
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002	CJLP2008	1,17	0,006	65,41	0,045	0,004	0,153	3,61	0,7	0,112
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002-02	CJLP2008	0,98	0,006	66,02	0,041	0,004	0,121	3,1	0,66	0,095
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002-03	CJLP2008	1,01	0,006	66	0,046	0,004	0,135	3,28	0,67	0,101
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002-04	CJLP2008	1,64	0,006	64,26	0,041	0,004	0,211	5,04	0,66	0,173
SSD-FD00605	10,5	19,8	SSD-FD00605-002-05	CJLP2008	2,17	0,006	62,53	0,044	0,01	0,27	6,23	0,71	0,266
SSD-FD00605	19,8	28,45	SSD-FD00605-003	SNGL	0,56	0,006	66,89	0,04	0,153	0,022	2,15	0,93	0,023
SSD-FD00605	28,45	30,35	SSD-FD00605-004NR	NR-NS									
SSD-FD00605	30,35	33,45	SSD-FD00605-005	SNGL	5,72	0,006	60,94	0,047	0,034	0,095	5,42	0,68	0,227
SSD-FD00605	33,45	35,55	SSD-FD00605-006NR	NR-NS									
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007	CJLP2008	0,99	0,01	67,2	0,078	0,025	0,018	1,66	1,08	0,038
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007-01	CJLP2008									
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007-02	CJLP2008	2,52	0,006	65,44	0,088	0,004	0,016	2,5	0,88	0,044
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007-03	CJLP2008	0,71	0,012	68,27	0,069	0,014	0,011	1,19	0,87	0,024
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007-04	CJLP2008	0,76	0,008	67,3	0,065	0,066	0,021	1,75	1,13	0,031
SSD-FD00605	35,55	45,85	SSD-FD00605-007-05	CJLP2008	1,2	0,007	65,84	0,109	0,004	0,028	2,06	1,45	0,066
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008	CJLP2008									
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008-01	CJLP2008	13,8	0,006	47,41	0,188	0,004	0,008	7,04	9,55	0,306
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008-02	CJLP2008	3,67	0,006	59,6	0,075	0,004	0,008	2,56	7,57	0,082
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008-03	CJLP2008	0,94	0,008	67,55	0,042	0,004	0,008	1,31	1,85	0,032
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008-04	CJLP2008	0,69	0,006	66,87	0,027	0,004	0,009	1,39	2,34	0,027
SSD-FD00605	45,85	50,65	SSD-FD00605-008-05	CJLP2008	0,94	0,006	63,7	0,042	0,004	0,01	1,49	6,63	0,043
SSD-FD00605	50,65	60,35	SSD-FD00605-009										
SSD-FD00605	60,35	70,4	SSD-FD00605-010										
SSD-FD00605	70,4	80,8	SSD-FD00605-011										
SSD-FD00605	80,8	250,55	SSD-FD00605-012NS										

[22] Análise Química de Furo de Sondagem extraída do software GDMS – *Geological Data Management Systems* / 2014 (adaptado).

Anexo XIV. ESCALA DE DESVIO

Escala de Desvio de Furo de Sondagem em Relação ao Bloco do Modelo Geológico



Desenho: Igor Rosa (UFOP / Valt) 2015

Obs.: Considerando 4,5° o ângulo de curvatura da haste de perfuração, furos com metragem até 150 m, inclinados ou verticais permaneceriam dentro do último bloco do modelo geológico projetado.