



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



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

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA SONDAGEM
ROTOPERCUSSIVA NA JAZIDA DE FERRO DE SERRA SUL,
SERRA DOS CARAJÁS - PARÁ**

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

Mestrando: Roberto Franklin de Carvalho (Vale SA)

BELO HORIZONTE – MG
MAIO DE 2014



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



**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA SONDAGEM
ROTOPERCUSSIVA NA JAZIDA DE FERRO DE SERRA SUL,
SERRA DOS CARAJÁS - PARÁ**

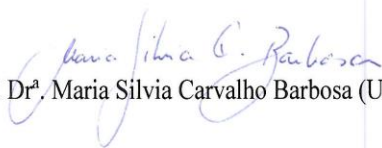
BELO HORIZONTE – MG
MARÇO DE 2014

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA SONDAGEM ROTOPERCUSSIVA NA JAZIDA DE FERRO DE SERRA SUL, SERRA DOS CARAJÁS - PARÁ

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 Geológico-Geotécnica em Maciços Rochosos*.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 15 de maio de 2014, pela Banca Examinadora composta pelos membros:


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


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


Prof. Dr. Marco Antonio Braga (VALE)

C331a Carvalho, Roberto Franklin de,
Análise da eficiência da sondagem rotopercussiva na Jazida de Ferro de
Serra Sul, Serra dos Carajás – Pará [manuscrito] / Roberto Franklin de Carvalho.
– 2014.

125f.: il., graf.; tabs.; mapas.

Orientador: Prof. Dr. José Agnelo Soares

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. NUGEO.

Área de concentração: Geotécnica de Maciços Rochosos.

1. Carajás, Serra do (PA) – Teses. 2. Ferro – Minas e mineração – Teses. I.
Soares, José Agnelo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III Título.

CDU: 622.3(811.5)

Catálogo: sisbin@sistin.ufop.br

“Um enunciado tem sentido se era verdadeiro, por definição, ou se é, a princípio, verificável por existência.”

MORITZ SCHLICK

DEDICATÓRIA

Dedico esta obra a minha amada família,
Rosilange, Renata e Rafael.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus.

A VALE S.A e a VALER (Universidade Corporativa - VALE) pela oportunidade que me foi confiada, através do desafio de desenvolver este trabalho.

Aos professores da Universidade Federal de Ouro Preto, que participaram e através do programa de mestrado em engenharia geotécnica ofertado pelo Núcleo de Geotecnia – NUGEO, a oportunidade de ser aluno desta valorosa e histórica instituição, pela estrutura do curso e dedicação do corpo docente.

Aos colegas de mestrado, pelo aprendizado e ótimos momentos vividos, sendo possível desenvolver a multidisciplinaridade entre grandes profissionais de diferentes áreas e empresas; pelas experiências profissionais e de vida de cada um compartilhada. Muitíssimo obrigado.

Aos colegas da VALE que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse desenvolvido, não poderia deixar de aqui registrar meus agradecimentos ao:

Igor Rosa e Dionísio Carlos.

A minha esposa Rosilange, pelo carinho durante o mestrado.

Aos meus filhos, Rafael e Renata pelo amor e dedicação dispensados.

Ao professor Dr. Agnelo Soares, pela orientação, amizade e ensinamentos, que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao geólogo e gerente da área Henry Galbiatti, pela visão de pesquisa.

Ao Geólogo Dr. Marco Antônio da Silva Braga, pela constante amizade e Incentivo em todos os projetos na Vale.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido na jazida de minério de ferro nos alvos denominados C e D em Serra Sul, Complexo Minerador de Carajás, Estado do Pará. Esses alvos fazem parte de um estudo que a empresa Vale S.A. vem desenvolvendo em suas minas e jazidas, visando comparar e definir vantagens e desvantagens dos métodos de perfuração de sondagem rotativa testemunhada com o de sondagem rotopercussiva. Portanto, este trabalho tem como objetivo principal o estudo da operacionalidade destes métodos de perfuração com determinação da taxa de penetração, custos do projeto de sondagem geológica, além da possibilidade de utilização do uso da perfilagem geofísica, que auxilia na obtenção de contatos geológicos, densidade e diâmetro do furo. É importante conhecer algumas diferenças nestas duas metodologias perfuração e optar pelo melhor tipo de investigação geológica através da sondagem, aproveitando o melhor da eficiência de cada uma delas ou adoção de sondagem híbrida. Ressalta-se que a profundidade de investigação é um fator preponderante que diferencia esses dois métodos de sondagem geológica.

Palavras Chaves: sondagem rotativa testemunhada, sondagem rotopercussiva, minério de ferro, taxa de penetração, Complexo Minerador de Carajás

ABSTRACT

This work was developed in the iron ore deposits termed as C and D in Serra Sul site, located at Carajás Mining Complex, Pará State, Brazil, as a part of the study conducted by Vale S.A. at its mines and quarries in order to compare and define advantages and disadvantages between the core drilling – DDH method, compared to probing drilling - DTH method. The main goal is the operational analysis of both methods, to determine the penetration rate in different types of rock at different depths, costs for project and applicability of (geophysical well logging) to improve the available information in order to reduce uncertainties in DTH drilling. It is important to know the main differences between these two methods and choose the best approach on borehole drilling, select the best aspect of each method or the combination of both (hybrid survey). It is worth mentioning that the investigation depth is a key factor that set these two methods apart.

Key- words: *borehole core drilling, down-the-hole drilling, iron ore, penetration rate, Carajás Mining Complex (CMC).*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Mapa da área de Serra Sul onde a sondagem foi realizada. | 4 |
| Figura 2.1 – Vista de uma praça de sondagem rotativa testemunhada..... | 6 |
| Figura 2.2 - Sonda Wileline –Mac Sonda..... | 8 |
| Figura 2.3 - Sonda Hidráulica_Tipo CS 14 | 8 |
| Figura 2.4 – Caixa com testemunho da sondagem rotativa testemunhada..... | 9 |
| Figura 2.5 - Hastes tipo HQ..... | 10 |
| Figura 2.6 - Coroa de diamantes. (<i>Coroa HQ-2 extra lateral S-2, Geosol</i>)..... | 11 |
| Figura 2.7 - Coroa de vídia. (<i>Coroa de Pastilha com degrau HQ-2, Geosol</i>) | 11 |
| Figura 2.8 - Esquema da sondagem rotopercussiva | 13 |
| Figura 2.9 - Vista de um equipamento e praça para sondagem RC..... | 14 |
| Figura 2.10 - Caixa com <i>Ships</i> da sondagem Rotopercussiva..... | 15 |
| Figura 2.11 - Os três tipos fundamentais de porosidade conforme diferentes materiais numa seção geológica (Teixeira, 2003)..... | 16 |
| Figura 2.12 - Visão aérea de um trecho do platô de Serra Sul. | 18 |
| Figura 2.13 - Exemplo de taxa de penetração (cm / min) do método RC. | 19 |
| Figura 2.14 - Equipamento e componente para Perfilagem Geofísica de Poço. | 25 |
| Figura 2.15 - Interações dos raios gama com o meio. | 27 |
| Figura 2.16 - Interações dos raios gama com o meio – efeito fotoelétrico..... | 28 |
| Figura 2.17 - Interações dos raios gama com o meio – efeito Compton. | 28 |
| Figura 2.18 - Interações dos raios gama com o meio – produção de pares. | 29 |
| Figura 2.19 - Função resposta usual da perfilagem geofísica gama-gama..... | 30 |
| Figura 2.20 - Relação volumétrica entre amostras DDH (RC) e RC | 40 |
| Figura 3.1 - Posicionamento Geotectônico da Província Mineral de Carajás (Cordani et al. 1979, Tassinari 1996). | 42 |
| Figura 3.2 - Mapa geológico do Cinturão Itacaiunas (DOCEGEO 1988)..... | 43 |
| Figura 3.3 - Mapa geológico do Greestone Rio Maria (DOCEGEO 1988). | 44 |
| Figura 3.4 - Coluna Estratigráfica de Carajás (Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007). | 46 |
| Figura 3.5 - Mapa geológico regional de Carajás mostrando entre outros o Cinturão Araguaia e o Supergrupo Itacaiunas (DOCEGEO 1988)...... | 47 |
| Figura 3.6 - Mapa de localização de Serra Sul. | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.7 - Subdivisão dos Corpos de ferro de Serra Sul, no detalhe em vermelho a localização dos corpos de hematita compacta. | 54 |
| Figura 3.8 - Geologia das minas de Serra Norte - Carajás (Fonte: GAJAN/DIFN)..... | 59 |
| Figura 3.9 - Jaspelito da Formação Carajás com típico meso- e microbandamento de óxido de ferro e jaspe (Rosiere 2005)..... | 60 |
| Figura 3.10 – Amostra de testemunho de hematita Friável na caixa..... | 63 |
| Figura 3.11 – Amostra de mão de hematita Compacta | 64 |
| Figura 3.12 – Amostra de testemunho de Sondagem de Jaspelito | 65 |
| Figura 3.13 – Amostra de testemunho de sondagem de Canga Estrutural..... | 66 |
| Figura 3.14 – Amostra de testemunho de sondagem de Canga Química..... | 67 |
| Figura 3.15 – Amostra de testemunho de sondagem de Máfica sa e decomposta | 67 |
| Figura 3.16 – malha de sondagem nos Corpos C e D do Alvo S11. | 69 |
| Figura 4.1 – Eficiência da sondagem rotopercussiva em relação à profundidade..... | 73 |
| Figura 4.2 – Avanço por profundidade sondagem rotativa testemunhada - Canga de Minério / Química (CM / CQ)..... | 74 |
| Figura 4.3 – Avanço por profundidades na sondagem rotopercussiva - Canga de Minério / Química (CM / CQ)..... | 74 |
| Figura 4.4 – Avanço por profundidade da sondagem rotativa testemunhada – Hematita Friável (HF) | 75 |
| Figura 4.5 – Avanço por profundidade na sondagem rotopercussiva – Hematita Friável (HF) | 76 |
| Figura 4.6 – Avanço por profundidade na sondagem rotativa testemunhada – Jaspelito (JP) . | 77 |
| Figura 4.7 – Avanço por profundidade sondagem rotopercussiva – Jaspelito (JP)..... | 77 |
| Figura 4.8 – Avanço por profundidade sondagem rotativa testemunhada – Máfica Decomposta (MD)..... | 79 |
| Figura 4.9 – Avanço por profundidade na sondagem rotopercussiva – Máfica Decomposta (MD)..... | 79 |
| Figura 4.10 – Avanço por litologia na sondagem rotativa testemunhada | 81 |
| Figura 4.11 – Avanço por litologia na sondagem rotopercussiva | 81 |
| Figura 4.12 – Massa recuperado por intervalo perfurado..... | 82 |
| Figura 4.13 – Massa recuperada do furo N4W-RC00004 com Perfilagem Geofísica. | 82 |
| Figura 4.14 – Massa recuperada por furos em diferentes profundidades..... | 83 |
| Figura 4.15 – massa recuperada em diferentes profundidades CM..... | 84 |
| Figura 4.16 – massa recuperada da CQ em diferentes profundidades..... | 84 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.17 – massa recuperada na Hematita Friável em diferentes profundidades | 85 |
| Figura 4.18 – massas recuperada de Jaspelito em diferentes profundidades..... | 86 |
| Figura 4.19 – Massa recuperada na Máfica Decomposta em diferentes profundidades | 86 |
| Figura 4.20 – Distribuição espacial dos furos de RC | 87 |
| Figura 4.21 – Relação de custo e eficiência entre a sondagem rotopercussiva / rotativa testemunhada. | 88 |
| Figura 5.1– Distribuição dos furos de sondagem rotopercussivo e rotativo testemunhado na mesma praça | 94 |
| Figura 5.2 - Ferramenta descendo no furo de sondagem, sofrendo atrito com a parede devido à inclinação < 80°..... | 95 |
| Figura 5.3 - Descida da sonda impedida devido às irregularidades da parede do furo. | 96 |
| Figura 5.4 – Após penetração, vista da broca da sondagem rotopercussiva | 96 |
| Figura 5.5 - Descida do cabo da sonda de perfilagem em contato a parede do furo. | 97 |
| Figura 5.6 – Vista de planta do espaço entre a parede do furo e o revestimento colocado em uma sondagem rotopercussiva..... | 98 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Volume de poros e tamanho de partículas em sedimento. (Teixeira, 2003)..... | 17 |
| Tabela 2.2 – Valores de C para alguns elementos mais comuns. | 32 |
| Tabela 3.1 – Campanhas de sondagem realizadas nos Corpos de Serra Sul..... | 68 |
| Tabela 4.1 – Furos de sonda realizadas nos Corpos de Serra Sul realizados no trabalho. | 72 |
| Tabela 4.2 – Relação de custo entre os métodos de sondagem Rotativa Testemunhada e Rotopercussiva | 88 |

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

CMC = Complexo Minerador de Carajás
CPRM = Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DOCEGEO = Rio Doce Geologia e Mineração S.A.
Ma = Milhões de Anos
BIF = Formação Ferrífera Bandada
Fe = Ferro
Cu = Cobre
Au = Ouro
Mn = Manganês
Eh = Potencial de Oxi-redução
pH =Potencial Hidrogeniônico
MD = Máfica decomposta
MSD = Máfica semi-decomposta
MS = Máfica Sã
ZC-MD = Zona de Cisalhamento
HM ou HF = Hematita Friável
HD ou HC = Hematita Compacta
JP = Jaspelito
CQ = Canga Química
CM = Canga de Minério
MBT = Minério de Baixo Teor
HSB = Hematita Semi-Branda
N-S = Norte/Sul
WNW-ESE = Norte/Noroeste – Este/Sudeste
E-W = Leste/Oeste
NE-SW = Sudeste/Noroeste
Máf = Máfica
Min. = Minério
DDH = Sondagem Rotativa Diamantada Testemunhada
DTH = Sondagem Rotopercussiva
RC = Circulação Reversa
SR = sondagem rotopercussiva
SRT = Sondagem rotativa testemunhada

LISTA DE ANEXO

Anexo 1 – Memorial topográfico

Anexo 2 – Triangulação dos Furos de Sondagem Rotopercussiva

Anexo 3 – Perfil de Sondagem Rotativa Diamantada Testemunhada

Anexo 4 – Perfil de Sondagem Rotopercussiva

Anexo 5 – Boletim de Campo da Sondagem Rotopercussiva

Anexo 6 – Boletim de Campo da Rotativa Diamantada Testemunhada

Anexo 7 – Parâmetros de Resistência dos Litotipos das Minas de Carajás

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 1 |
| 1.2 – OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO | 2 |
| 1.3 – METODOLOGIA DE TRABALHO | 2 |
| 1.4 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO | 4 |
| 1.5 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 4 |
| CAPÍTULO 2 | 6 |
| 2.1 - Sondagem Rotativa Testemunhada Diamantada..... | 6 |
| 2.2 - Sondagem Rotopercussiva | 12 |
| 2.2.1 - Coleta de Amostras | 14 |
| 2.3 - FATORES QUE INFLUENCIAM NO DESEMPENHO DA SONDAAGEM | 15 |
| 2.3.1 - Porosidade | 15 |
| 2.3.2 - Água natural contida na rocha..... | 17 |
| 2.3.3 - Condição Topográfica..... | 17 |
| 2.4 – FATORES QUE DIFICULTAM A OPERAÇÃO DOS MÉTODOS DE SONDAAGEM | 18 |
| 2.4.1 - Influência da água | 18 |
| 2.4.2 - Aumento da taxa de penetração | 19 |
| 2.4.3 - Fluido de perfuração | 20 |
| 2.4.4 - Pressões no sistema de circulação de fluido de perfuração..... | 20 |
| 2.4.5 - Perda de circulação | 20 |
| 2.4.6 - Aumento da vazão de retorno | 21 |
| 2.5 - PERFILAGEM GEOFÍSICA..... | 21 |
| 2.5.1 - Trabalhos de perfilagem geofísica gama-gama em minério de ferro..... | 23 |
| 2.5.2 Fundamentos de perfilagem geofísica gama-gama | 24 |
| 2.5.3 - Considerações teóricas sobre as partículas gama (γ) | 26 |
| 2.5.4 - Interação dos raios gama com o meio | 27 |
| 2.5.5 - Função resposta..... | 29 |
| 2.6 - FATORES QUE INFLUENCIAM OS DADOS DE PERFILAGEM GAMA-GAMA .. | 31 |
| 2.6.1 - Decaimento radioativo da fonte | 31 |
| 2.6.2 - Efeito Z/A..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 2.6.3 - Lama/reboco e rugosidade das paredes..... | 33 |
| 2.6.4 - Presença de água nas formações | 35 |
| 2.6.5 - Argilosidade | 36 |
| 2.6.6 - Velocidade de aquisição dos dados na perfilagem..... | 36 |
| 2.6.7 - Radiação natural de fundo..... | 36 |
| 2.7 - AQUISIÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS | 37 |
| 2.8 - ESTUDOS DE DENSIDADE..... | 38 |
| 2.8.1 Frasco de areia (FA) | 38 |
| 2.8.2 - Preenchimento de volume (PV) | 38 |
| 2.8.3 - Meio denso por deslocamento de volume (DV) | 38 |
| 2.9 - FATORES QUE AFETAM A DENSIDADE EM LABORATÓRIO | 39 |
| 2.9.1 – Densidade dos grãos minerais | 40 |
| CAPÍTULO 3 | 42 |
| 3.1 - POSICIONAMENTO GEOTECTÔNICO | 42 |
| 3.2 - ESTRATIGRAFIA | 43 |
| 3.3 - ARCABOUÇO TECTÔNICO | 46 |
| 3.4 - GEOCRONOLOGIA | 48 |
| 3.5 - ESTADO DA ARTE DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS DE CARAJÁS | 49 |
| 3.5.1 - A partir de Macambira e colaboradores. | 50 |
| 3.5.2 - A partir de Rosière & Lobato e colaboradores..... | 51 |
| 3.5.3 - A partir de Beatriz Vieira e colaboradores..... | 53 |
| 3.6 - DEPOSIÇÃO | 55 |
| 3.7 - ALTERAÇÃO HIDROTERMAL | 55 |
| 3.8 - DEFORMAÇÃO..... | 57 |
| 3.9 - ALTERAÇÃO SUPERGÊNICA | 58 |
| 3.10 - GEOLOGIA DOS PLATÔS DA SERRA NORTE DOS CARAJÁS | 58 |
| 3.11 - Principais litotipos presentes nos furos de sonda..... | 62 |
| 3.11.1 - Os principais tipos de materiais ricos em ferro da jazida de Serra Sul | 62 |
| 3.12 - HISTÓRICO DA PESQUISA..... | 68 |
| 3.12.1 - Campanhas de Sondagem e Amostragem | 68 |
| 3.12.2 - Campanha I | 69 |
| 3.12.3 - Campanha II..... | 69 |
| 3.12.4 - Campanha III..... | 70 |
| CAPÍTULO 4 | 71 |

| | |
|--|-----|
| 4.1 - AQUISIÇÕES E ANÁLISE DOS DADOS..... | 71 |
| 4.2 - CUSTOS | 87 |
| 4.3 – SEGURANÇA..... | 91 |
| CAPÍTULO 5 | 92 |
| 5.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 92 |
| 5.1.1 - Sondagem rotativa testemunhada..... | 92 |
| 5.1.2 - Sondagem rotopercussiva..... | 92 |
| 5.1.3 - Perfilagem geofísica..... | 92 |
| 5.2 - DIFICULDADES ENCONTRADAS NA AQUISIÇÃO DOS DADOS | 93 |
| 5.2.1 - Equipe técnica pouco preparada interfere na eficiência..... | 93 |
| 5.2.2 - Arrombamento de poço e variação na recuperação por intervalo..... | 93 |
| 5.2.3 - Inclinação | 94 |
| 5.2.4 - Entupimento da broca | 96 |
| 5.2.5 - Tempo de espera para a execução da perfilagem gama-gama | 97 |
| 5.2.6 - Os revestimentos de PVC e seus efeitos nos perfis de perfilagem gama-gama..... | 98 |
| CAPÍTULO 6 | 99 |
| 6.1 CONCLUSÕES..... | 99 |
| 6.2 RECOMENDAÇÕES..... | 100 |
| 6.2.1 - Para sondagem rotativa testemunhada: | 100 |
| 6.2.2 - Para sondagem rotopercussiva: | 101 |
| 6.2.3 - Para execução dos trabalhos de Geofísica: | 102 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A sondagem com recuperação de testemunhos de rocha é o método mais utilizado pela área de exploração nas jazidas de ferrosos para avaliação dos depósitos minerais, pois fornece material físico que pode ser levado a laboratório e analisado em diversas propriedades físicas Webber (2008). Este método e suas amostragens são bastante confiáveis, porém caro e na maioria das vezes, de execução lenta.

A produtividade e eficiência de cada equipamento estão diretamente relacionadas a uma operação da sonda, baseada na experiência do operador e prejudicada pela falta de implantação de sensores para monitoramento dos parâmetros de perfuração, fato que ocorre mesmo em sondas mais modernas, deixando toda responsabilidade da perfuração na percepção operacional.

Atualmente, as empresas de todo mundo utilizam este método para avaliação de suas jazidas, mas a utilização da sondagem rotoperussiva vem ganhando espaço nos projetos, embora implique em restrição na coleta de informações geológicas detalhadas, como contato geológico, atitude de camadas, frequência de fraturamento. Os impactos de tais restrições podem ser minimizados com usos de métodos indiretos de aquisição de informações, como perfilagem geofísica gama-gama para medir (peso específico) *in situ* em furos de sondagem. Entretanto, por se tratar de jargão da indústria, será considerado o termo densidade neste trabalho.

1.2 – OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desta dissertação será correlacionar os dados e comparar o método de sondagem destrutiva por Circulação Reversa RC, com o método de sondagem Rotativa Testemunhada Diamantada - DDH no Alvo de Serra Sul, pertencente ao Complexo Minerador de Carajás, Estado do Pará.

Para definir as vantagens e desvantagens dos métodos de perfuração, foi verificada a aplicabilidade das metodologias e uma possível extrapolação para os próximos programas de sondagem, com ênfase aos seguintes parâmetros:

- taxa de penetração;
- eficiência dos dois métodos em faixas de profundidade;
- quantificação do volume de amostras geradas no tempo e eficiência da sondagem rotoperussiva em profundidades maiores que 150m;
- verificação, nas diferentes faixas de profundidades, da qualidade das amostras, e se há contaminação;
- determinação do custo dos dois métodos;
- verificação do desenvolvimento da metodologia de aplicação da ferramenta perfilagem de densidade nos depósitos de minério de ferro da Vale/SA, apresentando e discutindo os resultados dos testes e das medidas de perfilagem geofísica gama-gama (densidade);
- análise das condições que influenciam na qualidade dos dados de perfilagem geofísica gama-gama;

1.3 – METODOLOGIA DE TRABALHO

Neste trabalho foi acompanhada a perfuração de 31 furos de sondagem rotoperussiva, totalizando 4000m ao lado de furos já existentes de sondagem rotativa testemunhada em jazida de minério de ferro. Foram analisadas a taxa de penetração, o volume de amostras geradas no tempo, o custo e testou-se a aplicação de ferramentas de perfilagem geofísica, com o objetivo de estimar os tipos litológicos atravessados pela sondagem rotoperussiva.

Os dados obtidos na sondagem rotativa testemunhada diamantada e sondagem rotoperfussiva foram levantados dos boletins de sondagem e consolidados. Seus resultados foram comparados para a definição das vantagens e desvantagens de cada método:

A metodologia utilizada neste trabalho seguiu as seguintes etapas:

- levantamento de dados dos boletins de sondagem rotativa testemunhada;
- programação de furos de rotoperfussiva de forma que sejam gêmeos aos furos rotativos testemunhados, com afastamento máximo 5m na horizontal;
- realização de sondagem rotativa rotoperfussiva, com profundidade superior a 200m;
- utilização da ferramenta de perfilagem geofísica gama-gama em diferentes litologias nos furos de sondagem, para verificar a presença de contraste da propriedade física. (densidade),
- verificação de intervalos onde os registros são relativamente estáveis, anotando o valor de CPS (contagem por segundo) e requisitando medidas de densidade em laboratório nos testemunhos para a mesma profundidade de informação da perfilagem geofísica gama-gama, para fins de comparação;
- anotação do tempo total necessário para realizar todo o procedimento de perfilagem em campo.

1.4 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

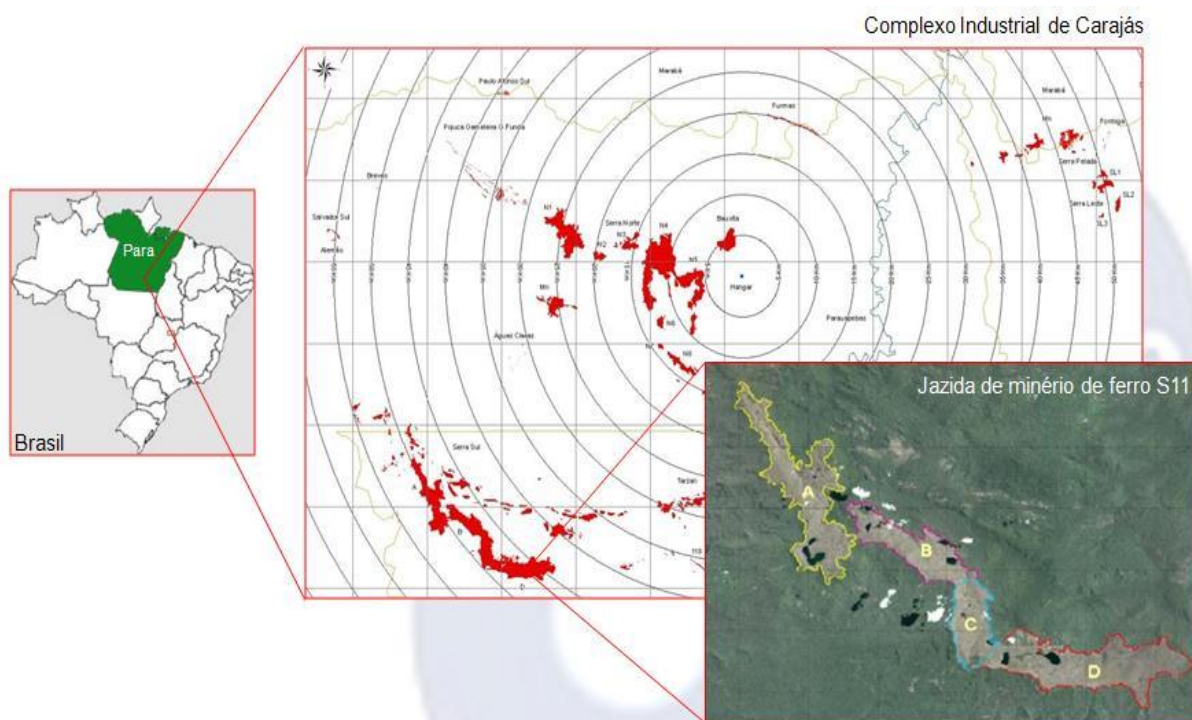


Figura 1.1 – Mapa da área de Serra Sul onde a sondagem foi realizada.

A jazida de minério de ferro de S11 está localizada no complexo industrial de Carajás ao sul do estado do Pará no município de Canaã dos Carajás. A jazida é subdividida nos corpos A, B, C e D conforme (Figura 1.1).

1.5 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

- Capítulo 1: Apresenta a proposta de trabalho, destacando as considerações iniciais do estudo, os objetivos previstos e a própria estrutura da dissertação;
- Capítulo 2: Descreve os métodos de sondagem realizados nas áreas de ferrosos da Vale/SA de longo e curto prazo, com fatores que influenciam no desempenho da sondagem diamantada e sondagem rotopercussiva. Encontra-se também os fundamentos teóricos da perfilagem geofísica gama-gama, além de descrição dos fatores que influenciam as medidas de densidade com base nos métodos diretos e na perfilagem geofísica gama-gama;

- Capítulo 3: Apresenta a descrição da geologia regional e geologia local da PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS, estratigrafia, descrição dos tipos de minério (hematitas e itabiritos) e coberturas nas jazidas de Serra Sul e Serra Norte:
- Capítulo 4: Traz a análise da consolidação dos dados de boletins de sondagem rotativa testemunhada e Rotopercussiva em Circulação Reversa, com determinação da taxa de penetração, massa recuperada e sua relação de peso ideal por métodos e litologias. Outro ponto, será o enfoque na utilização da ferramenta de perfilagem geofísica e suas principais utilizações, que neste trabalho foi mapear a integridade de contorno das paredes dos furos, definição dos contatos geológicos e da densidade
- Capítulo 5: Conclui-se o trabalho, reunindo as principais características de cada método, provenientes das análises e avaliações realizadas durante o desenvolvimento desta dissertação, incluindo algumas recomendações para pesquisas geológicas futuras e/ou complementares.

CAPÍTULO 2

2. MÉTODOS UTILIZADOS DE SONDAGEM EM MINÉRIO DE FERRO NA VALE

A Vale/SA utiliza dois métodos de sondagem nas avaliações dos recursos e reservas nos depósitos minerais de minério de ferro, que é a maior *commodity* da companhia.

2.1 Sondagem Rotativa Testemunhada Diamantada

Na sondagem diamantada o processo de perfuração é realizado em geral com auxílio de uma coroa de forma anelar, contendo inúmeros diamantes encravados, que girando a alta velocidade cortam o terreno segundo uma seção circular, separando um cilindro do material penetrado do resto da rocha (BOURGOYNE, *et al.*, 1986). Os furos podem ser verticais ou inclinados e com profundidade variando entre alguns metros até mais de mil metros (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Vista de uma praça de sondagem rotativa testemunhada

Na sondagem do tipo *wireline* utiliza-se barrilete de tubo retrátil que permite a retirada do tubo interno (portador do testemunho) por dentro da coluna de perfuração sem a necessidade de retirar a coluna de hastes. O barrilete *wireline* para amostragem contínua consiste de um tubo externo, cujo cabeçote é atarraxado a uma coluna de hastes especiais com diâmetro interno maior.

Este tubo externo é completado na sua extremidade inferior por um calibrador e em seguida por uma coroa de diamantes. Na parte interna encontra-se um tubo interno retrátil com uma mola de retenção de 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 (*over shot*).

O pegador é preso a um cabo de aço de “3/16” ou “1/4”, com o qual o tubo interno é retirado do fundo do furo por dentro da coluna de hastes. O cabo de aço é enrolado no tambor de um guincho especial, incorporado à sonda na superfície.

A máquina acionadora da coluna de perfuração consiste essencialmente em um motor a combustão ou elétrico, que imprime movimento de rotação a um cabeçote, este é solidário a um fuso de avanço que possui um mandril acoplador de haste da coluna.

As sondas são agrupadas em três tipos, segundo o seu modo de avanço: manual, mecânico (Figura 2.2) e hidráulico (Figura 2.3).



Figura 2.2 Sonda *Wileline* –Mac Sonda



Figura 2.3 Sonda Hidráulica - Tipo CS 14

O dimensionamento da sonda é dado em função das características do projeto, tais como: diâmetro, profundidade do furo e compacidade da rocha. A capacidade de furação destas

sondas em formação ferrífera dependendo do modelo pode atingir até 800 metros no diâmetro H. Com a redução do diâmetro do furo para N, essa profundidade pode ser ampliada podendo chegar a 1500m.

Na sondagem rotativa testemunhada são efetuadas testemunhagens constantes, recuperando-se cilindros da rocha atravessada, onde se identifica textura e como o volume de amostra coletada por metro perfurado é pequeno, faz-se composição de intervalos (Figura 2.4). No caso de Serra Sul o tamanho da amostra de 15m para diâmetro HQ e NQ, mesmo com a amostra composta, o material não é suficiente para ensaios de beneficiamento.



Figura 2.4 – Caixa com testemunho da sondagem rotativa testemunhada

A bomba é o equipamento destinado a succionar o fluido de circulação de um reservatório e introduzi-lo no furo através da coluna de perfuração. As bombas podem ser acionadas por comando hidráulico ou a diesel que são associados aos comandos da sonda.

A pressão do fluido de perfuração pode ser observada através do manômetro, este pode não ser instalado na sonda ou no estabilizador.

A coluna de perfuração é composta pelo 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.

As hastes (Figura 2.5) são instrumentos destinados a alongação do furo e pela transmissão à coroa dos movimentos rotativos e de avanço. Elas são tubos de aço sem costura e trefilados a frio. 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 comumente utilizado é de 3,05m.

Nas sondagens rotativas diamantada, um dos mais importantes componentes, sem dúvida é a coluna da haste de perfuração.



Figura 2.5 – Hastes tipo HQ

A coroa é o dispositivo conectado na extremidade inferior da coluna de perfuração e opera como instrumento cortante para fins de penetração em rocha ou em outros materiais.



Figura 2.6 - Coroa de diamantes. (Coroa HQ-2 extra lateral S-2, Geosol)



Figura 2.7 - Coroa de vídia. (Coroa de Pastilha com degrau HQ-2, Geosol)

As coroas diamantadas (Figura 2.6) 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 semi compactas a altamente duras. Enquanto que as do tipo vídia (Figura 2.7) são utilizadas em rochas friáveis e rochas mais moles.

O fluído introduzido no furo de sondagem através da coluna de perfuração tem a finalidade de auxiliar na operação de corte, arrefecer as peças cortantes, ascender os detritos de perfuração

e sustentar as paredes do furo quando não há tubo de revestimento. O fluído mais utilizado na sondagem rotativa é a lama bentonítica, que consiste numa mistura de água e bentonita.

A bentonita é uma argila da família das montmorilonitas encontrada em depósitos naturais. Suas propriedades podem variar muito de uma jazida para outra, sendo que na presença da água, as partículas de bentonita (forma lamelar) se hidratam e se expandem formando uma suspensão coloidal. No estado de máxima expansão essas partículas se movem livremente e, devido às cargas elétricas que possuem, vão formar uma estrutura tipo “castelo de cartas”. A bentonita pode ser sódica ou cálcica. Somente as bentonitas sódicas são adequadas para lamas de perfuração.

O fluído de perfuração quando corretamente utilizados exercem funções importantes como:

- na broca tem função de limpeza, lubrificação, esfriamento e manter a transmissão de potência hidráulica.
- para coluna de perfuração tem função de suportar parte do peso da coluna de perfuração, inibir corrosão, impedir trancamento e prisões.
- no furo tem função de controlar pressões de subsuperfície, transportar o recorte produzido na perfuração, estabilizar as paredes do furo, inibir as argilas hidratáveis e evitar expansão.

2.2 Sondagem Rotopercussiva

A Sondagem Rotopercussiva em Circulação Reversa obtém amostras das rochas perfuradas através do avanço de uma ferramenta cortante especial (*button bit* ou broca tricônica) quando as rochas forem macias ou friáveis. Caso a rocha seja dura e consistente, utiliza-se martelo pneumático com *bit* de botão.

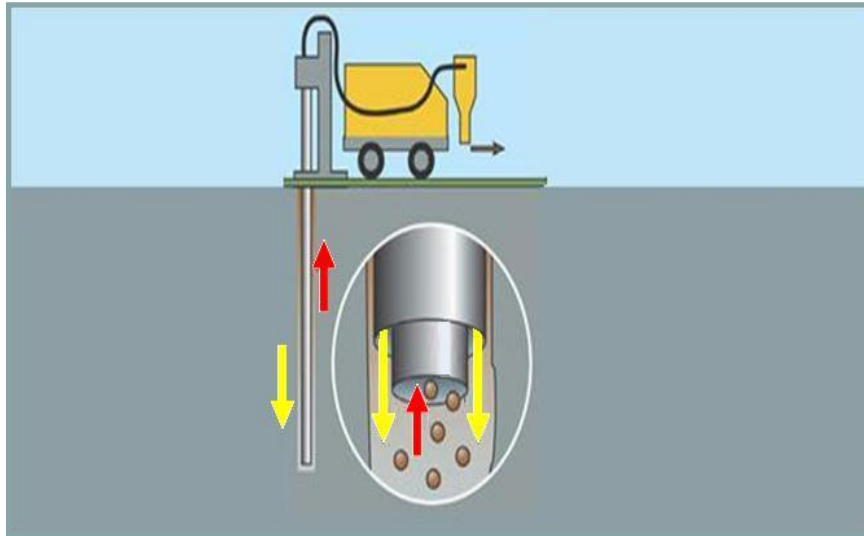


Figura 2.8 – Esquema da sondagem rotoperfuração

O uso de ar (Figura 2.8) comprimido como fluido circulante em hastes de paredes duplas é feito pela injeção no espaço anelar entre as hastes, retornando pela camisa interna e carregando até a superfície fragmentos de rocha (*cuttings*), onde os mesmos são recuperados em ciclone e as amostras obtidas, acondicionadas em sacos plásticos.

A utilização de martelo pneumático de fundo com reversão de ar na fase do bit e/ou broca com insertos de tungstênio, proporciona uma amostragem contínua no momento da perfuração.

Os equipamentos para realização da sondagem foram do tipo *Foremost* (Figura 2.9) – Prospector W750 e compressor de ar *Sullair*, de 900 CFM@350 PSI (25,50m³/m KPA), *rack* para 100 metros de hastes duplas, com sistema de injeção de fluídos, ciclone para amostragem e locomovida por pneus especiais e de baixa pressão no solo.



Figura 2.9 – Vista de um equipamento e praça para sondagem RC

2.2.1 Coleta de Amostras

O processo de coleta de amostra na sondagem rotopercussiva em circulação reversa ocorre a cada metro perfurado e a limpeza do ciclone é realizada de três em três metros ou seja, a cada haste e segue as seguintes etapas:

- a limpeza é feita com uma espátula de ferro, manualmente e depois é fechado o ciclone para ser soprado com compressor;
- é colocado um saco na boca do ciclone com a finalidade de coletar todo material referente a 01(um) metro perfurado;
- neste saco vem impresso uma etiqueta contendo: nome da empresa, cliente, área, número de furo e profundidade da coleta;
- em cada saco são colocadas duas etiquetas de alumínio contendo o nome do cliente, área, número de furo e profundidade.
- cada amostra é pesada logo após o material referente aquele metro ser coletado;
- se o peso obtido for acima de 25 kg, este material é dividido em 2 (dois) sacos e se o for acima de 50 kg, este material é dividido em 3(três) sacos.

- depois, parte desta amostra é coletada com a mão para uma peneira e com uma colher é colocada na caixa de *chip*(amostra seca).



Figura 2.10 – Caixa com *Ships* da sondagem Rotopercussiva

- o que sobrou na peneira é molhado em um balde com água tirando a parte fina(argilosa) e deixando os fragmentos. Esta amostra é posteriormente coletada com a mesma colher para o *chip* (amostra úmida) (Figura 2.10).

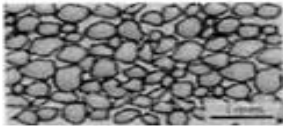
2.3 – FATORES QUE INFLUENCIAM NO DESEMPENHO DA SONDAAGEM

2.3.1 - Porosidade

A porosidade é uma propriedade física definida pela relação entre o volume de poros e o volume total de um material e existem dois tipos fundamentais de porosidade nos materiais terrestres: primária e secundária (Figura 2.11). A porosidade primária é gerada juntamente com a deposição do sedimento e formação da rocha, sendo caracterizada nas rochas sedimentares pelos espaços entre os *clastos* ou grãos. Ela pode ser dividida em intergranular,

representada pelo espaço existente entre os grãos das rochas e em intragranular, representada pela porosidade do mineral, sendo que nos materiais sedimentares, o tamanho e a forma das partículas, o grau de seleção e a presença de cimentação influenciam na porosidade.

(1)_ Porosidade intergranular



(2b)_ Porosidade de fraturas: de resfriamento



(2a)_ Porosidade de fraturas: tectônicas



(3)_ Porosidade de condutos: (cárstica)

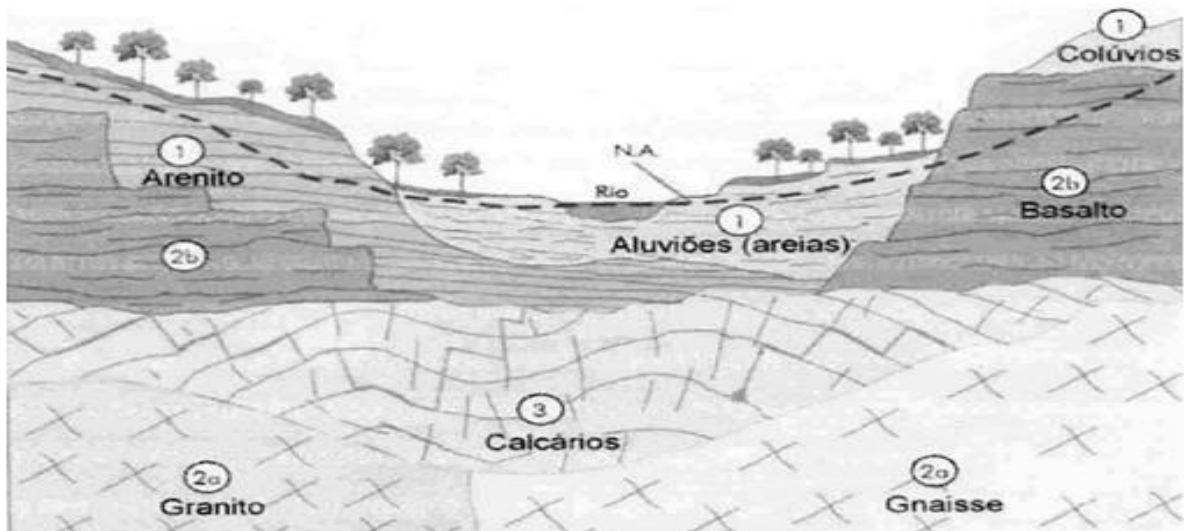


Figura 2.11– Os três tipos fundamentais de porosidade conforme diferentes materiais numa seção geológica (TEIXEIRA, 2003).

A 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). Um tipo especial de porosidade secundária se desenvolve em rochas solúveis como calcários e mármore, através da criação de vazios por dissolução, caracterizando a porosidade cárstica.

2.3.2 - Água natural contida na rocha

Teixeira (2003) cita que “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”. 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 Teixeira (2003) depende do tamanho dos poros e da conexão entre eles (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Volume de poros e tamanho de partículas em sedimento. (Teixeira, 2003).

| 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 |

Sendo assim, a água contida nas formações influencia os valores de densidade, causando alterações nestes valores 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.

De outro modo, 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.

2.3.3 - Condição Topográfica

O solo é a camada superior da crosta terrestre que apresenta propriedades diferentes com relação ao material rochoso subjacente, como resultado de interações climáticas nas reservas de minério de ferro, onde o solo formado é substituído pela canga. Este é um material

superficial, podendo ser constituído por blocos de tamanhos variados de formação ferrífera cimentados por matriz goethítica/limonítica. Topograficamente (Figura 2.12) a canga ocorre como capeamento da formação ferrífera “*in situ*”, podendo ser classificada em três tipos:

- laterítica é formada por processos de intemperismo químico de rochas ferruginosas, não sendo observados fragmentos cimentados a parcialmente cimentados.
- detritica é formada por quantidade variável de fragmentos detríticos, geralmente de formação ferrífera como hematitas cimentados por limonita e goethita.
- estruturada é um estágio avançado de alteração pela hidratação dos minerais de ferro e lixiviação da sílica e as estruturas da rocha são encontradas preservadas.



Figura 2.12 – Visão aérea de um trecho do platô de Serra Sul.

2.4 – FATORES QUE DIFICULTAM A OPERAÇÃO DOS MÉTODOS DE SONDAAGEM

2.4.1 - Influência da água

Nos dois tipos de sondagem (rotopercussiva e rotativa testemunhada) quando a água está presente em um maciço rochoso, a superfície das discontinuidades é solicitada com uma

pressão e a tensão normal é reduzida. Para condições de escoamento permanente a tensão normal é a tensão efetiva. Cabe lembrar que a presença d'água também intemperiza as paredes dos furos, podendo ainda reduzir a resistência destas. A presença da água complica extremamente o problema, pois percebe-se um fenômeno de acoplamento entre as pressões neutras e o fluxo da água no maciço, além de acréscimos de pressões de cisalhamento.

Nota-se que durante o período chuvoso bastante água é retida na superfície ocorrendo percolação para dentro do furo, além disso, o nível do lençol freático interfere. À medida que a ferramenta avança a pressão hidrostática aumenta, com isto aumenta o caimento ao longo dos furos que não revestidos.

2.4.2 - Aumento da taxa de penetração

Um aumento na taxa de penetração é um indicador secundário de influxo, mas, pois alterações na taxa de penetração podem ter outras causas, tais como variações do peso sobre a broca, da rotação, da vazão ou mudanças das formações e parâmetros de resistência dos litotipos cortadas pela broca (Anexo 7). Um aumento repentino da taxa de penetração pode ser explicado pela existência de um diferencial de pressão negativo, que atua na formação a qual está sendo perfurada (Figura 2.13).

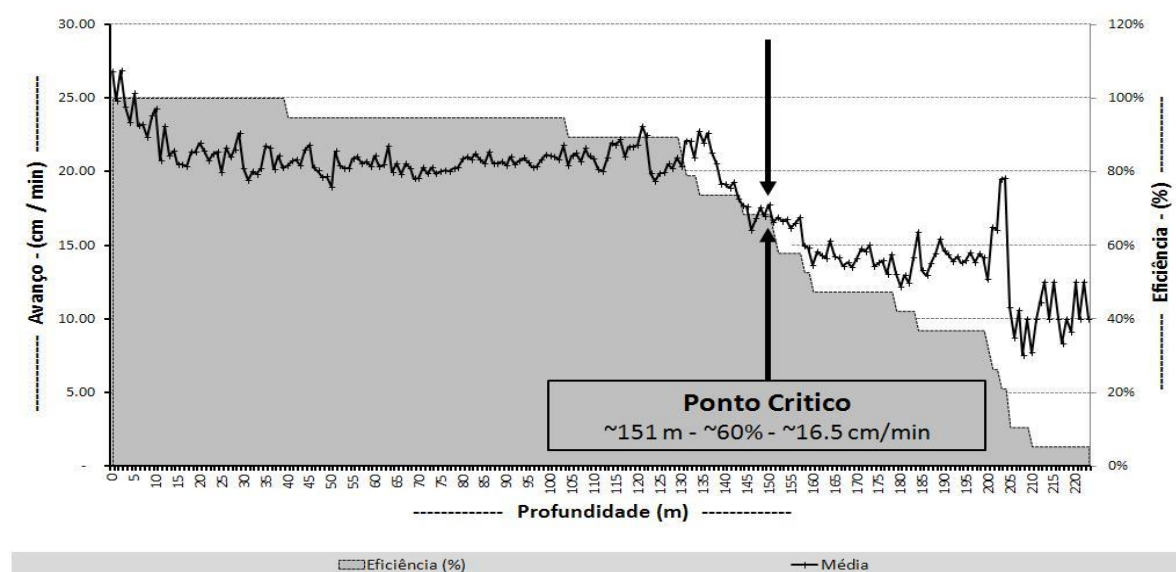


Figura 2.13– Exemplo de taxa de penetração (cm/min) do método RC.

Em alguns furos, principalmente na sondagem RC durante a perfuração de formações moles o aumento verificado na taxa de penetração pode ser bastante significativo e, neste caso, a equipe de perfuração deve estar atenta aos outros sinais pois, o risco de prisão do ferramental é muito elevado.

2.4.3 - Fluido de perfuração

Utilizar um fluido de perfuração preparado de forma única para todo o furo, independente da formação que está atravessando vai resultar na falta de estabilidade das paredes do furo na sondagem rotativa testemunhada e conseqüentes trancamentos. A penetração de fluidos (águas) em profundidade do interior das formações para dentro do furo faz com que o fluido fique pouco denso e perca sua função principal.

2.4.4 - Pressões no sistema de circulação de fluido de perfuração

Este fator acontece na sondagem rotativa testemunhada na sondagem rotopercussiva, sendo que neste ultimo método fluido de perfuração é o ar. Os dois métodos utilizam manômetros para acompanhar as pressões no interior do furo, porém a grande maioria dos sistemas utilizados não garante o controle total das pressões externas exercidas pela somatória de fatores como, perdas de carga nas partes do sistema, contrapressão na superfície gerada normalmente pelo e diferença entre as pressões hidrostáticas do fluido do interior da coluna e o do espaço anular.

2.4.5 - Perda de circulação

A perda de circulação do fluido de perfuração no furo, gera redução da pressão hidrostática. Esta pode ser Natural em formações fraturadas, cavernosas, com pressão anormalmente baixa

ou Induzida através da massa específica excessiva do fluido de perfuração. Caso a formação atravessada seja permeável, e a pressão se torne maior que a pressão hidrostática a sua frente, o fluido contido nessa formação invadirá o poço, gerando uma contaminação e possível descaracterização do fluido

2.4.6 - Aumento da vazão de retorno

A falta de controle da vazão de retorno na perfuração a sua verificação imediata. O aumento da vazão de retorno é um indicador positivo de que uma possível invasão está acontecendo no furo rotativo testemunhado.

2.5 - PERFILAGEM GEOFÍSICA

A perfilagem geofísica de um furo de sondagem é um método usado em pesquisa mineral e que consiste em obter o perfil de um furo de sondagem com o uso de diversos tipos de sensores que percorrem os furos medindo diversos parâmetros de interesse. Para a retirada dos parâmetros de interesse em uma pesquisa mineral, as sondas são movimentadas dentro do furo de sondagem, sendo registrado o parâmetro desejado, conferindo-se a integridade do furo e sua profundidade total. Para isto, a sonda é içada até a superfície a uma determinada velocidade efetuando o registro dos parâmetros referentes ao sensor usado Webber (2008). Sondagens geofísicas são constituídas por longas hastes de metal cujo comprimento pode variar de um até dezenas de metros. Uma sonda pode ser desenvolvida para o registro de apenas um ou mais parâmetros e/ou pode permitir a conexão de diversas sondas entre si para facilitar o registro de mais parâmetros simultaneamente em furos muito profundos. Desde a primeira perfilagem durante a década de 20, esse método foi sendo adaptado e aperfeiçoado para utilização em diversos tipos de aplicações na indústria mineral.

Os equipamentos se tornaram mais robustos permitindo a sua aplicação desde poços profundos de petróleo até simples furos de desmonte em bancada de mina. Durante muitos anos, o registro dos parâmetros era desenhado em bobinas de papel que corriam sob penas.

Atualmente, foram desenvolvidos *softwares* específicos para o registro, apresentação e processamento de dados de perfilagem geofísica (Robertson WinLogger® e Strater® da Golden Softwares).

O advento da perfilagem em furos em 1920 e seu subsequente desenvolvimento em uma tecnologia sofisticada revolucionaram a exploração de óleo e gás e a produção industrial. A habilidade de “olhar e medir” os tipos de formação, inclinação das formações, porosidade, densidade, tipo de fluidos e outros importantes fatores transformaram a perfuração e pesquisas para óleo e gás em uma ciência refinada (HART’S E&P, 2002).

O desenvolvimento da perfilagem de poços contempla três maiores áreas: perfilagem com métodos elétricos, perfilagem sônica ou acústica e perfilagem nuclear, esta última importante neste estudo.

A perfilagem utilizando radiação de origem nuclear teve início em 1940. As primeiras ferramentas de perfilagem nuclear mediam a radiação de gama natural emitida pelas formações de rocha atravessadas pelos furos de sondagem. Das três radiações nucleares identificadas – alfa, beta e gama – apenas a radiação gama pode ser utilizada em perfilagem de furos, já que apenas esta radiação possui poder de penetração suficiente para atravessar as formações de rocha e revestimentos metálicos presentes nos furos de sondagem (HART’S E&P, 2002; ALMEIDA *et al*, 2008).

A indústria de perfilagem moveu rapidamente sua atenção do monitoramento da radiação passiva para o bombardeamento nuclear ativo e sua medição nos furos. Na perfilagem de densidade da formação de rocha, introduzida em 1962, a parede do furo de sondagem é irradiada com fonte de raios gama e um contador gama grava a quantidade dos raios refletidos, sendo a comparação do número de raios gama retornados à fonte e aqueles espalhados no meio relacionados com a densidade da formação (HART’S E&P, 2002).

Neste trabalho, a perfilagem geofísica com raios gama irradiados na formação será discutida, com apresentação do método, caracterização técnica da ferramenta, as limitações e os erros que podem ocorrer e as aplicações do perfil gama-gama (densidade).

2.5.1 - Trabalhos de perfilagem geofísica gama-gama em minério de ferro

Os métodos de perfilagem geofísica encontram-se bem estabelecidos nas áreas de petróleo, gás, urânio, carvão e minerais, onde são amplamente utilizados em todo o mundo.

A perfilagem geofísica gama-gama, especificamente, está sendo utilizada, há alguns anos, em projetos de exploração e avaliação de diversos depósitos minerais, tais como nos depósitos de carvão (determinação do teor de cinzas), níquel, manganês, chumbo, zinco e no minério de ferro. Alguns trabalhos também foram realizados em estudos estratigráficos.

Em minério de ferro, porém, não existe uma literatura expressiva neste sentido. Dentre alguns trabalhos de sucesso com a ferramenta gama-gama podem-se citar Butt (2001), Butt e Fullagar (2001), Borsaru (2002).

O trabalho de Butt (2001) ilustra os resultados da perfilagem gama-gama em um depósito de Hamersley Iron, onde a perfilagem para densidade em furos de sondagem é rotineiramente executada em todos os furos novos, já que anotações e interpretações geológicas manuais das informações de densidade se mostraram extremamente lentas.

A maioria dos furos de sondagem em Hamersley Iron é executada por sondagem percussiva. Os geólogos do projeto consultam os perfis de densidade, juntamente com outros perfis geofísicos para refinar a interpretação dos contatos geológicos. A informação de densidade proveniente destes perfis geofísicos é utilizada nos cálculos de tonelagem, já que as estimativas de recursos eram realizadas, por exemplo, com base em dados históricos de densidade e medidas em testemunhos. Porém, estes métodos não geravam medidas consistentes de densidade “in situ”. Um dos problemas enfrentados no local é a relutância das empresas contratadas em corrigir os efeitos da rugosidade das paredes dos furos, já que os dados gerados quando o detector encontra-se longe da parede do mesmo causam uma subestimativa do valor de densidade. Sendo assim, os dados recebidos passam por um controle visual de qualidade onde zonas de extrema rugosidade são identificadas e retiradas dos cálculos de densidade, já que, conforme citado, utilizar estes dados sem eliminar estas zonas causaria uma sub-estimativa do valor de densidade para determinada formação.

O perfil *caliper* funciona como guia para ilustrar as condições da parede do furo, porém não se pode utilizar esta informação para efetuar as correções de densidade no perfil densidade. Isto se deve ao fato do perfil *caliper* fornecer informação somente de um lado do furo de sondagem e as cavidades presentes neste lado podem não ocorrer no lado oposto do furo, e vice-versa. Para aumentar a confiabilidade nos resultados de densidade e contornar o problema no trabalho de Butt (2001) a média do valor de *caliper* foi retirada para cada unidade estratigráfica interceptada e foi convencionado que os valores com desvio maior de 10% desta média não seriam aceitos para efeitos de cálculos de densidade final.

Tipicamente, os gráficos de dispersão mostram que apenas 5% dos dados de *caliper* estão fora destes limites. Para dar continuidade à avaliação de recursos e reservas, densidades médias foram criadas para as diferentes litologias dos diferentes depósitos de Hamersley e estes valores de densidade medidos por perfilagem foram comparados com dados históricos dos modelos de recursos e reservas. Os dados de perfilagem mostram uma diferença média de densidade de 14% para mais em relação aos dados históricos. Em um dos depósitos, os modelos antigos foram recalculados e os resultados mostram um aumento de 20Mt de minério, o que implica, obviamente, no planejamento de mina e no lucro.

2.5.2 Fundamentos de perfilagem geofísica gama-gama

As medidas de densidade de rocha em furos de sondagem pela técnica gama-gama foi introduzida no início da década de 60 por companhias de petróleo e de serviços de perfilagem. As primeiras sondas efetivas nas medidas quantitativas de densidade foram desenhadas com uma fonte colimada e um único detector colimado, sendo a maioria das ferramentas equipada com um mecanismo que prensava a fonte e o detector contra a parede do furo para minimizar o afastamento entre a parede do furo e a sonda. O objetivo de minimizar este afastamento era reduzir os erros causados pela presença de fluidos de perfuração entre a sonda e a parede da rocha. Conforme Nery (2003), o perfil de densidade registra continuamente as variações das massas específicas das rochas atravessadas por um poço e, após calibração, expressa suas medições em g/cm^3 . No caso de rochas porosas, a medição realizada pelo perfil (ρ_B) inclui tanto a densidade da matriz (ρ_m) que constitui a rocha, como a do fluido contido no espaço

poroso (ρ_f). A medição da densidade total (ρ_B) de uma rocha, com o perfil de densidade, é realizada através de um feixe monoenergético de raios gama que bombardeia as paredes do poço. Para que isso seja possível, a ferramenta dispõe de um patim metálico com uma fonte monoenergética radioativa direcional, geralmente de Césio 137, que é pressionada contra a parede do poço. As fontes mais comuns de raios gama são de Césio 137 e Cobalto 60. A fonte de Césio 137 decai para Bário 137 emitindo um raio gama de 662keV.

Dentre os detectores mais comuns encontra-se o cintilômetro de Na(Tl), amplamente utilizado na indústria mineral e aplicações industriais, pois tem a melhor energia de resolução e opera em temperatura ambiente (Borsaru, 2005). Conforme Webber (2008), estes detectores são constituídos por um cristal de iodeto de sódio (NaI) ativado por uma pequena quantidade de Tálcio, que quando ionizado pela radiação incidente, emite luz visível. Essa emissão de luz é proporcional a energia do raio gama ionizante e é detectada pelo segundo componente do cintilômetro, um tubo fotomultiplicador que está conectado ao cristal de NaI. Esse tubo fotomultiplicador produz um pulso elétrico cuja amplitude é proporcional à energia do raio gama incidente.

A ferramenta utilizada neste trabalho é uma sonda tipo SDD-DD6 (*Dual Density*), produzida pela Weatherford e constitui-se de uma fonte de Césio 137 de 7,4 GBq de atividade e 3 detectores de Na (TI) denominados LSD (*Long Space Density*), BRD (*Bed-Resolution Density*) e HRD (*High Resolution Density*). A sonda e as partes que compõem o equipamento encontram-se na Figura 2.14.



Figura 2.14 – Equipamento e componente para Perfilagem Geofísica de Poço.

Esta sonda utiliza detectores múltiplos que fornecem uma medida de densidade compensada acurada dentro de furos de sondagem.

A seguir serão apresentadas algumas considerações teóricas sobre as partículas gama (γ).

2.5.3 - Considerações teóricas sobre as partículas gama (γ)

Sabe-se que interações de dois tipos de radiação, raios gama (γ) e nêutrons, podem ser utilizadas para inferir propriedades na perfilagem de furos. Os raios gama são importantes neste estudo, pois a ferramenta utilizada nos levantamentos possui uma fonte de Césio 137 que emite este tipo de partícula para efetuar as medições e correlações das medições com a densidade de rocha nos furos de sondagem.

Conforme Hearst, et. al. (2000), o número de raios gama transmitidos no meio natural é função da densidade, da energia γ e do número atômico do meio. Conseqüentemente, o número de raios gama de diferentes energias detectados a uma certa distância de uma fonte artificial pode ser utilizado para inferir tais propriedades, caracterizando o método chamado de perfilagem gama-gama (γ - γ).

As partículas gama são emitidas quando um nuclídeo muda de um estado para outro com baixa energia. Depois que a partícula foi emitida, ela interage com o material que a circunda, perde energia e é, eventualmente, absorvida. Geralmente o número de partículas emitidas ou absorvidas em função de tempo ou posição, ou a energia de alguma destas partículas, pode ser utilizada para inferir propriedades do meio com o qual estas partículas estão interagindo.

A emissão do raio gama acontece através do decaimento radioativo de nuclídeos instáveis por um ou vários processos, onde também são emitidas as partículas α e β . O raio gama é um *quantum* de energia radiante, geralmente chamado de fóton. A emissão do raio gama ocorre tanto quando o núcleo absorve um dos elétrons na eletrosfera, quanto no momento que ele muda seu nível de energia de um estado excitado para um nível de energia mais baixo.

As partículas α e β não penetram muito os materiais, não atravessando muito as formações rochosas, fluidos de perfuração e revestimentos metálicos que podem existir em furos de sondagem. Sendo assim, somente as partículas gama (e nêutrons) podem ser utilizadas na perfilagem de poços.

2.5.4 - Interação dos raios gama com o meio

Quando os raios gama atravessam um material qualquer eles podem interagir com os seus elétrons orbitais de três modos distintos: no efeito fotoelétrico (a), no efeito Compton (b) e na produção de pares. (Hearst, et. al. 2000). A energia em que cada interação destas é dominante depende não somente da energia da radiação, mas também do número atômico (Z) do meio. Em materiais com número atômico alto o efeito fotoelétrico domina, sendo que em materiais onde o número atômico é baixo, como na maioria das rochas, o efeito Compton domina. A Figura 2. 15 ilustra estas relações.

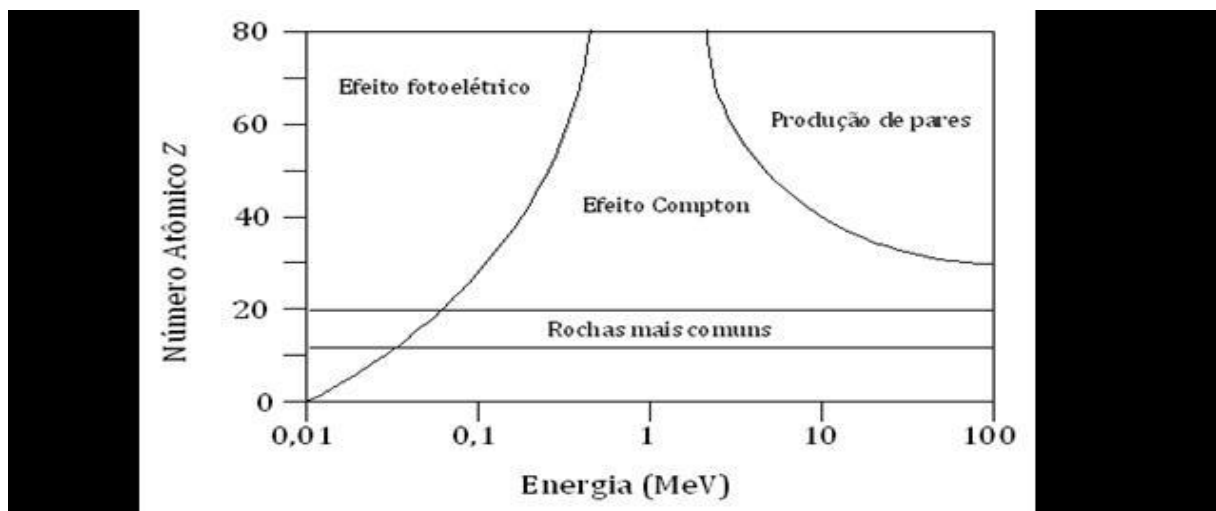


Figura 2.15 – Interações dos raios gama com o meio.

Conforme Webber (2008), o efeito fotoelétrico resulta da interação de um raio gama com um átomo do material (Figura 2.16). Neste processo, o raio gama incidente desaparece e transfere sua energia para um elétron. Se a energia do raio gama é grande o suficiente, o elétron é ejetado do átomo e começa a interagir com os materiais adjacentes. Normalmente, o elétron ejetado é substituído por outro de um nível energético mais interno acompanhado da emissão de um raio X com uma energia (geralmente inferior a 100keV) que é dependente do número atômico do material.

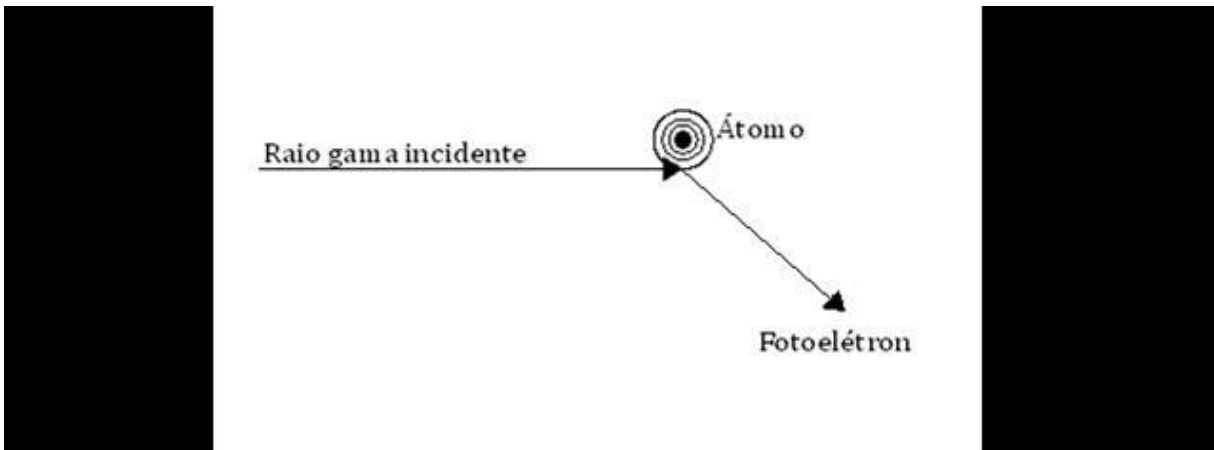


Figura 2.16 – Interações dos raios gama com o meio – efeito fotoelétrico.

No efeito *Compton*, o gama pode ser defletido pelo elétron, ao qual cede parte de sua energia cinética. Este é o meio preferencial de interação entre os raios gama (de níveis energético na ordem de 0,6 a 1,3MeV) e as rochas. Daí a preferência pela fonte de Césio 137 de 0,667MeV e de 33 anos de meia vida que foi utilizada neste trabalho. O efeito Compton envolve a interação de raios gama com elétrons individuais (Figura 2.17). A radiação gama é espalhada a partir de um elétron com energia de ligação desprezível quando comparada com a energia dos raios gama. Somente uma parte da energia dos raios gama é dada ao elétron e a energia gama resultante é espalhada e pode ser calculada através da lei de conservação de energia e momento. Para se ter uma apreciação do efeito do espalhamento Compton, em um material com átomos de massa A e número atômico Z , devemos nos ater ao coeficiente de absorção linear.

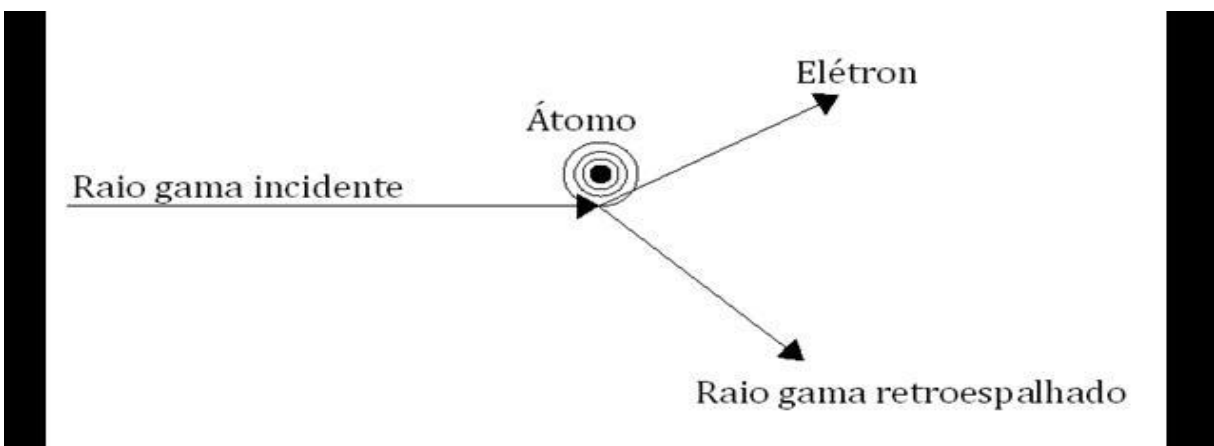


Figura 2.17 – Interações dos raios gama com o meio – efeito Compton.

Na produção de pares, o gama pode ser absorvido e um par elétron-pósitron é produzido em contrapartida; isto requer uma radiação gama de alto nível energético, na ordem de 1022 MeV (Figura 2.18).

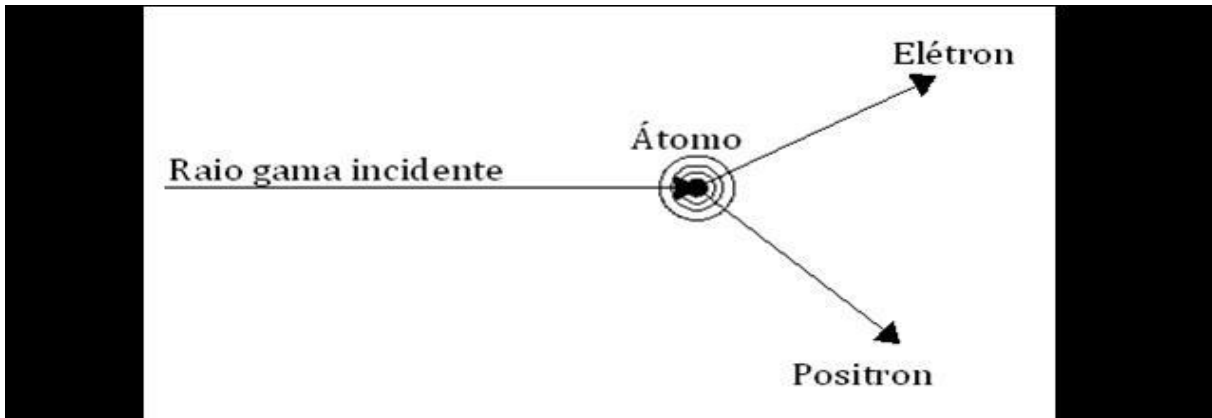


Figura 2.18 – Interações dos raios gama com o meio – produção de pares.

2.5.5 - Função resposta

Em perfilagem gama-gama, os raios gama emitidos pela fonte radioativa acoplada à sonda colidem com os elétrons da rocha e são retro-espalhados até o detector. À proporção que os raios gama sofrem sucessivos choques, estes se dispersam ou são absorvidos no meio natural, tendo sua intensidade diminuída. Esta diminuição de intensidade é então medida pelo detector, de acordo com a equação abaixo:

$$I_f = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x \cdot \rho_e} \quad (1)$$

Sendo, I_f a intensidade do feixe radioativo a ser registrada no detector, I_0 a Intensidade do feixe radioativo na fonte, μ é o coeficiente de absorção de massa do meio onde ocorre a interação, x a distância entre a fonte e o detector; e, ρ_e a densidade eletrônica do meio (número de elétrons/volume).

A mudança de intensidade do feixe original é função da mudança na densidade eletrônica das rochas. Quanto mais densa for a formação, menor a intensidade da radiação no detector e vice-versa. Como o efeito Compton é diretamente proporcional ao número de elétrons por

unidade de volume de matéria (portanto, ρ_e , densidade eletrônica) e como o número de elétrons por unidade de volume é proporcional a densidade (massa/volume) das formações, deduz-se que este perfil responde diretamente à densidade da formação e inversamente à sua porosidade.

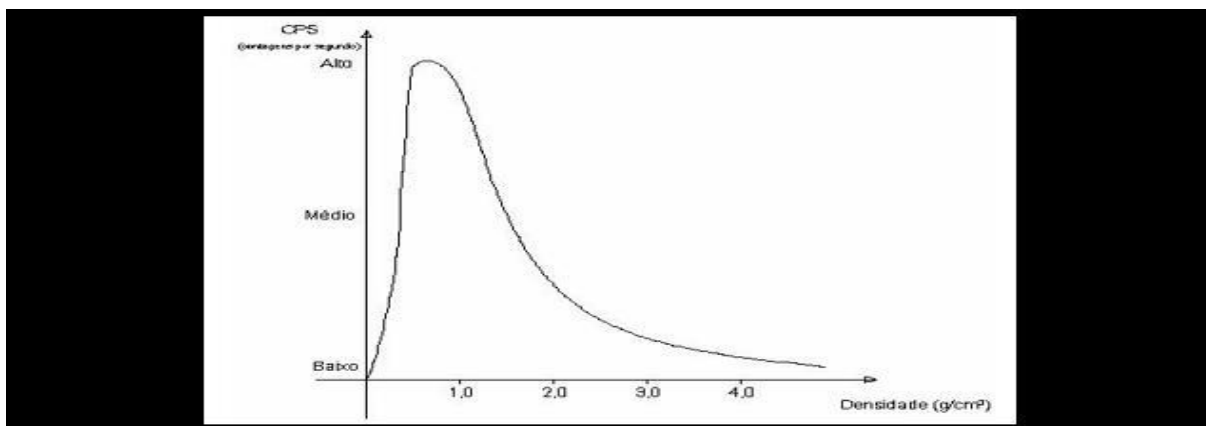


Figura 2.19- Função resposta usual da perfilagem geofísica gama-gama.

Quando os raios gama passam por materiais de baixa densidade, como o ar, pouco deles serão retro-espalhados até o detector e a contagem registrada será baixa. Em vácuo ideal, a contagem registrada deve ser zero, por não haver nenhuma colisão com partículas. Conforme a densidade do material aumenta, a contagem registrada também aumenta até um valor máximo, a partir do qual haverá redução da contagem retro-espalhada, já que existe grande quantidade de matéria entre a fonte e sensor impedindo que parte da radiação atinja o cintilômetro.

Para que este relacionamento seja a realidade dos fatos, algumas providências operacionais devem ser tomadas. A fonte radioativa deve ter energia suficientemente alta para favorecer o efeito Compton, energia suficientemente baixa para reduzir o efeito de produção de pares e o detector deve ser blindado para evitar o efeito fotoelétrico.

A função resposta é inerente ao tipo de sonda. Conhecendo-se os parâmetros da função (Figura 2.19), pode-se estimar as densidades dos materiais atravessados pela sonda. A melhor forma de definir a função resposta da sonda de densidade é em laboratório, utilizando-se corpos de prova com densidade conhecidas e variada, medindo-se a contagem de energia retro-espalhada em cada situação. Porém, existem alguns fatores externos à ferramenta que podem influenciar os valores gerados no perfil densidade, acarretando erros nas medidas para

a calibração e, conseqüentemente, nos valores de densidade utilizados para a composição final da função resposta do equipamento e nos valores de densidade estimados em problemas reais.

Alguns destes parâmetros serão descritos a seguir, com base em trabalhos anteriores neste tema. Porém, os mesmos não foram corrigidos neste trabalho, já que não se dispõe de um campo de calibração para a realização dos devidos testes e correções (este será o produto de um novo estudo que está sendo realizado em paralelo na Vale, com a construção de um campo de testes e calibração controlado). A função resposta aqui utilizada foi gerada com base nos valores de densidade das rochas perfiladas nos testes nos furos de sondagem.

2.6- FATORES QUE INFLUENCIAM OS DADOS DE PERFILAGEM GAMA-GAMA

2.6.1 - Decaimento radioativo da fonte

Conforme Webber (2008), o decaimento radioativo é propriedade do núcleo do átomo, no qual, a transição de um estado de energia para um inferior ocorre espontaneamente. Essa transição provoca um excesso de energia que é liberada pelo núcleo por meio de uma das radiações citadas anteriormente. O fato experimental básico associado com a radioatividade é a probabilidade de qualquer núcleo decair, em um intervalo de tempo dt ; isto é, ele é independente de influências externas, incluindo o decaimento de outros núcleos, temperatura e pressão. Todas as espécies de um mesmo nuclídeo possuem a mesma probabilidade de decaimento por unidade de tempo.

A probabilidade de um núcleo decair em um instante dt é $\lambda.t$, onde λ é conhecida por constante de decaimento do nuclídeo. Conforme Scott (1977), uma correção de intensidade da fonte deve ser feita se a intensidade da fonte de raios gama se modificar substancialmente entre o tempo da calibração da mesma e o tempo de aquisição dos dados em campo, ou caso a fonte original de raios gama seja trocada por outra com uma quantidade diferente do mesmo isótopo (caso a fonte seja trocada por outra com isótopo diferente, a calibração deve ser totalmente refeita).

Na execução da perfilagem geofísica gama-gama deste estudo não foi considerado o decaimento radioativo da fonte de Cs 137, pois o tempo de aquisição dos dados é insignificante para causar algum erro nas medidas, devido ao este decaimento.

2.6.2 - Efeito Z/A

O efeito Z/A é causado pela relação entre a soma dos números atômicos (Z) dos elementos constituintes do meio e a soma dos seus pesos atômicos (A). A mudança na composição química das rochas gera variações no resultado desta relação e, conseqüentemente, ocasiona mudanças na densidade das mesmas quando este fator for utilizado para correção dos dados brutos medidos pelo equipamento.

Conforme Nery (2003), a relação entre a densidade eletrônica do meio (ρ_e) e a densidade natural da rocha (ρ_B) é dada por:

$$\rho_e = 2 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right) \cdot \rho_B = C \cdot \rho_B$$

Na Tabela 2.2 são ilustrados diversos valores de C para alguns elementos mais comuns.

Tabela 2.2 – Valores de C para alguns elementos mais comuns.

| ELEMENTO | A | Z | C |
|----------|-------|----|--------|
| H | 1,01 | 1 | 1,9841 |
| C | 12 | 6 | 0 |
| O | 16 | 8 | 1 |
| Na | 22,99 | 11 | 1 |
| MG | 24,99 | 12 | 0,9868 |
| Al | 26,98 | 13 | 0,9637 |
| Si | 28,09 | 14 | 0,9968 |
| Si | 32,07 | 16 | 0,9978 |
| Cl | 35,46 | 17 | 0,9588 |
| K | 39,1 | 19 | 0,9719 |
| Ca | 40,08 | 20 | 0,998 |

Na realidade, nas litologias homogêneas (puras) portadoras de água (arenitos, calcários e dolomitos), o coeficiente “C” aproxima-se da unidade, fazendo com que os valores medidos nas aquisições de dados (ρ) seja aproximadamente igual a ρ_B . No entanto, outros materiais (saís, carvão ou mesmo gás) fazem com que os valores medidos ρ se afastem bastante de ρ_B , exigindo correções para uma maior aproximação entre aqueles dois valores.

Para eliminar ao máximo tais influências usa-se calibrar as ferramentas em litologias conhecidas, com água, para fins de correlação matemática, estudando as variações e as diferenças que acompanham estas medidas em diferentes litotipos.

2.6.3 - Lama/reboco e rugosidade das paredes

Os algoritmos de compensação para os efeitos de lama/reboco e da rugosidade das paredes de furos de sondagem foram desenvolvidos empiricamente e testados para sondas de densidade de pequeno diâmetro com dois detectores, no trabalho de Scott (1977). Conforme Nery (2003), com estas duas leituras em diferentes profundidades de investigação, acrescida da medida da espessura do reboco com a curva do *cáliper*, a ferramenta pode internamente realizar correções ou compensações e apresentar valores bem mais realistas de densidade do que as antigas ferramentas com uma fonte e um só detector. As técnicas para compensação dos erros em furos de sondagem datam do início dos anos 60. Conforme Nery (2003), os raios gama ao interagirem com os elétrons da lama/reboco logo após a saída da fonte, iniciam antecipadamente o seu processo de dispersão, diminuindo a intensidade do feixe, antes mesmo de penetrar nas camadas. Os estudos de Scott (1977), neste sentido, foram realizados em um campo de calibração no U.S Bureau of Mines, no Colorado, sendo composto por blocos de concreto com densidade conhecidas de 1,73, 2,33 e 3,00g/cm³, respectivamente e diâmetros de furos nestes blocos de 5,08, 7,62, 12,70 e 20,32cm. Estes valores foram corrigidos para $Z/A=0,5$, que é uma prática comum na calibração para os trabalhos com densidade. Estes blocos foram utilizados para correção das variações causadas pelo diâmetro do furo (rugosidade das paredes), na determinação dos efeitos causados pela variação do afastamento (espaço entre a ferramenta e parede do furo) e na simulação da espessura de lama nos furos preenchidos por ar ou por água. Anéis padronizados foram colocados na sonda para simular a rugosidade das paredes e luvas plásticas foram afixadas para simular a lama/reboco.

Para isso, seções de canos de PVC com densidade de $1,4\text{g/cm}^3$ com espessuras da parede de 0,25, 0,50, 0,76, 1,00 e 1,3cm foram instaladas nos furos e medidas foram tomadas com e sem água. No trabalho de Scott (1977) foram utilizados, ainda, blocos de alumínio, magnésio e “plexiglass”, com densidade corrigidas para Z/A de 2,62, 1,76 e $1,28\text{g/cm}^3$, respectivamente. Para as densidades baixas, interessantes em estudos de carvão, foi utilizado um tanque com água salgada com densidade corrigida para Z/A de $1,13\text{g/cm}^3$. Os resultados indicam que a acurácia das correções são afetadas pelo contraste de densidade dos materiais existentes no espaço entre o equipamento e a rocha, pelas variações de rugosidade das paredes e espessura de lama no intervalo entre a fonte e os detectores, pela colimação da fonte e detectores, pela sensibilidade dos detectores, por contagens de tempo nos equipamentos digitais, pela velocidade de subida na perfilagem e pela radiação gama natural de fundo.

As técnicas de correção indicaram que as ferramentas de densidade sempre devem trabalhar sendo prensadas contra a parede do furo, para minimizar o espaço existente entre a fonte e a rocha. Scott (1977) verificou que o detector mais próximo da fonte foi mais influenciado pela presença da rugosidade da parede e reboco de lama do que o detector mais distante da fonte. Conforme Nery (2003), o detector mais distante da fonte é mais afetado pelos elétrons das rochas. As rochas estão caracterizadas por sua ρ_B e ZB (média do número atômico). O reboco que se interpõe na trajetória fonte-rocha-detector introduz os parâmetros ρ_{mc} (densidade do reboco), Z_{mc} (número atômico do reboco) e t_{mc} (espessura do reboco). O problema maior reside no Z_{mc} , uma vez que grande parte dos fluidos de perfuração usa bário ($Z = 56$) que tem um alto coeficiente de absorção de massa, mesmo em níveis energéticos baixos. Desta forma, o reboco se comporta como um filtro para a intensidade do feixe radioativo da fonte do sistema e do meio natural. (Nery, 2003). Conforme Scott (1977), a diferença de resposta entre os dois detectores foi utilizada para compensar e minimizar os erros nas estimativas de densidade causadas pela lama e rugosidade. Esta compensação foi realizada com base nos gráficos de “espinha e costela” (*spine and ribs*) descritos por Wahl et al (1964), onde a contagem do detector mais próximo da fonte foi plotada em função da contagem do detector mais distante da fonte, para uma série de valores de densidade, afastamentos e espessura de lama/reboco. Nos gráficos de “espinha e costelas” a linha entre os pontos diagonais representa zero de afastamento e zero de espessura de lama de reboco, sendo chamada de espinha (*spine*). Esta linha é montada com base nos dados sem influência de reboco. As curvas entre os pontos representam os diferentes afastamentos e espessura de lama para densidades específicas, sendo chamadas costelas (*ribs*). Conforme Nery (2003), com a calibração em

diferentes pontos e com diferentes materiais que se interpõem entre a fonte e os detectores, cada detector mostra uma ação de crescimento/decaimento da leitura dependendo do material que está interposto, que é diferente de sua razão de crescimento/decaimento somente em função de ρ_B . Os resultados do trabalho de Scott (1977) evidenciam que, após uma análise estatística dos erros associados com todo o processo de compensação para o efeito da rugosidade da parede do furo, os erros variam de um valor mínimo de $0,05 \text{ g/cm}^3$ para rochas com densidades baixas e pequenos afastamentos para um valor máximo de $0,22 \text{ g/cm}^3$ para rochas com densidade alta e valores de afastamento maiores. Em se tratando de resultados para compensar o efeito da lama/reboco, as equações baseadas no gap são geralmente válidas para compensar a lama/reboco, exceto para medidas em rochas com densidade alta em furos secos. Felizmente, a lama/reboco raramente ocorre em rochas perfuradas com densidades maiores que $2,5 \text{ g/cm}^3$, então é necessária pouca correção para lama/reboco nesta faixa de densidade. Neste trabalho, não foram feitas correções de lama e rugosidade das paredes, devido a não ter-se um campo de calibração para a execução de tais correções. Estas correções são específicas para cada modelo de sonda de densidade.

2.6.4 - Presença de água nas formações

A presença de água nas formações, tanto na porosidade da rocha quanto parte integrante da composição mineralógica, pode acarretar diferenças nos valores de densidade, quando comparados aos valores médios em laboratório. A água é um elemento químico e estando presente na formação irá fornecer variações nos dados medidos pela perfilagem gama-gama, devido principalmente ao efeito Z/A. Deve-se estudar os efeitos da água em um campo de calibração ou sabendo-se a profundidade do nível de água dentro do furo. Para contornar o problema, a calibração para as curvas de densidade foram feitas diretamente dentro dos furos/rochas. Deve-se estudar mais detalhadamente os efeitos da água dentro do furo de sondagem, com medições do nível d'água nos furos.

2.6.5 - Argilosidade

Como também ocorre no perfil Sônico, a argila também afeta as leituras do perfil de densidade, porquanto mais leve ou menos densa por unidade de volume (dado o excesso de água), tenderá também a diminuir o valor de ρ_B Nery (2003). Tais efeitos são corrigidos através de métodos modernos de interpretação quantitativa, principalmente quando são registrados 2 ou 3 perfis de porosidade ao mesmo tempo.

2.6.6 - Velocidade de aquisição dos dados na perfilagem

Conforme Scott (1977), a acurácia das medidas de densidade em rochas com camadas pouco espessas ou em rochas com densidades variáveis depende da velocidade de perfilagem na aquisição dos dados. Nas aquisições feitas com um período de um segundo, uma velocidade de perfilagem menor que 1,5 m/segundo é necessária, a fim de evitar-se distorções em locais de camadas poucos espessas que são de interesse na aquisição. Para uma máxima acurácia pode-se tomar as medidas com a sonda estacionada no furo, em profundidades de interesse selecionadas. Os períodos de aquisição de 10 segundos ou mais podem ser utilizados nestes casos.

2.6.7 - Radiação natural de fundo

Segundo Scott (1977), a radiação de fundo proveniente de radioisótopos naturais ou artificiais pode causar enormes erros em valores de densidade advindos das medidas em perfilagem. Isto ocorre, muitas vezes, em área de exploração de urânio onde perfis de gama natural evidenciam zonas com altos valores de radiação de fundo. As técnicas de compensação da radiação de fundo devem ser utilizadas somente quando a contagem da radiação de fundo tiver uma contribuição de erro significativa nos procedimentos de compensação dos efeitos da rugosidade e lama/reboco. No minério de ferro, deve-se estudar mais detalhadamente se a radiação de fundo causa erros significativos nas medidas e estimativas de densidade. Nos dois alvos estudados, porém, a radiação natural de fundo é muito baixa e não interferiu nos resultados dos dados adquiridos nos furos de sondagem.

2.7 - AQUISIÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

A aquisição de dados da perfilagem geofísica pode ser dividida em fases distintas, que vai desde a escolha do furo a ser perfilado até a entrega do equipamento e da fonte radioativa ao local de armazenamento, após a realização da perfilagem.

Resumidamente, as etapas são:

- escolha do alvo e furo(s) a ser(em) perfilado(s);
- retirada da fonte radioativa da área de armazenamento;
- transporte de equipamentos e chegada ao local de trabalho;
- verificação das condições do furo de sondagem (profundidade, presença ou não de água, desmoronamentos, revestimento, lama de perfuração, etc.);
- verificação da área de trabalho, observando condições que poderiam dificultar a instalação dos equipamentos de perfilagem e determinação de um local para a operação com a fonte radioativa (presença de sondas, equipe de sondagem, iluminação no caso de uma perfilagem ao entardecer, etc.);
- instalação do equipamento de perfilagem, posicionamento do guincho e do tripé, conexões entre sonda, guincho, unidade de aquisição, computador e alimentação (bateria de 12 V, CC).
- inicialização do software (*WELL MANAGER*) para coleta de dados;
- testes da sonda com procedimentos padronizados;
- inserção da sonda no furo a ser perfilado, respeitando o plano de radioproteção e verificando o ponto inicial da perfilagem (referência de profundidade zero);
- aquisição de dados (executada do fundo do furo para a superfície);
- verificação do perfil e repetição da perfilagem conforme o caso;
- retirada da sonda do furo, respeitando o plano de radioproteção, com limpeza/lubrificação da mesma;
- desacoplamento e acondicionamento do equipamento de perfilagem em suas respectivas embalagens;
- devolução da fonte radioativa e demais equipamentos à área de estoque. Os procedimentos citados acima são executados sistematicamente nas coletas de dados.

2.8 - ESTUDOS DE DENSIDADE

Os primeiros estudos foram realizados sob coordenação do DIPM, pela empresa GEOLABOR no ano de 2006 e utilizaram amostras coletadas nas galerias, afloramentos e furos de sondagem. No ano de 2008 a GAMGF/DIPF realizou novos estudos na galeria 02 do Corpo D, e reavaliou as informações das campanhas anteriores. Para os furos de sonda foram consideradas as amostras com o comprimento de 15 a 25cm com o objetivo de padronizar e regularizar o tamanho de amostras.

2.8.1 Frasco de areia (FA)

O método consiste em cavar um orifício no piso com paredes regulares, retirar e pesar o material. Este orifício é posteriormente preenchido com areia selecionada de densidade conhecida, e a partir dos dados de volume e massa da areia selecionada a densidade do material é determinada. Este método é aplicado aos materiais mais friáveis.

2.8.2 - Preenchimento de volume (PV)

O método consiste em cavar um orifício no piso com paredes regulares, retirar e pesar o material. Este orifício é revestido com um plástico fino e preenchido com um volume de água conhecido. A partir dos dados de massa e volume a densidade do material é determinada. Este método é aplicado aos materiais mais friáveis.

2.8.3 - Meio denso por deslocamento de volume (DV)

A densidade é calculada a partir da relação entre o peso da amostra e o deslocamento de água provocado pelo mergulho da amostra em recipiente graduado. Este método foi utilizado para os litotipos compactos.

As densidades utilizadas no modelo de Serra Sul estão resumidas na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valores de densidade, por litotipo, utilizado no modelo de Serra Sul.

| Litologia | Lito | Amostras | Dens.Natural (g/cm ³) | <i>Dens. Seca</i> (g/cm ³) | Umidade (%) | Método Analítico* |
|--------------------------|-------|----------|--------------------------------------|---|----------------|----------------------|
| Hematita Compacta | HC | 29 | 3,81 | | | DV |
| Hematita Friável | HF | 56 | 2,98 | 4,59 | 2,93 | FA / PV |
| Hematita Manganesifera | HMN | *1 | 2,98 | | | |
| Canga Estrutural | CE | 168 | 3,30 | | | DV |
| Canga Química | CQ | 3 | 2,79 | | | DV |
| Dique Diabásio | DB | 14 | 2,24 | | | DV |
| Jaspelito | JP/JR | 1199 | 3,36 | | | DV |
| Máfica Sã | MS | 481 | 2,80 | | | DV |
| Máfica Decomposta | MD | 123 | 2,00 | | | DV |
| Formação Igarapé Cigarra | FIC | *2 | 2,80 | | | |
| Formação Parauapebas | FP | *2 | 2,80 | | | |
| Grupo Águas Claras | GAC | *3 | 2,30 | | | |
| Embasamento Cristalino | EC | *3 | 2,30 | | | |

DV – Deslocamento de Volume; FA – Frasco de Areia; PV – Preenchimento de Volume

*1 – Adotado o valor da Hematita Friável

*2 – Adotado o valor da Máfica

*3 – Valor Histórico

2.9 - FATORES QUE AFETAM A DENSIDADE EM LABORATÓRIO

Existem inúmeros fatores que influenciam os valores de densidade das rochas.

Segundo o *Australasian Joint Ore Reserves Committee* (Código JORC), a densidade é essencialmente controlada por 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.

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

Para a ISO 3852 (*Iron ores – Determination of bulk density*) o valor da densidade é influenciado pelo tipo geológico, total de ferro contido, distribuição granulométrica e a umidade do material.

Os resultados da pesquisa demonstram que as variações dos valores de densidade são dadas por muitos fatores, quais sejam: pela gênese, composição mineralógica, porosidade, percentual de água contida na rocha e condição topográfica.

2.9.1 – Densidade dos grãos minerais

A densidade dos grãos é uma propriedade física definida pela carga nuclear do átomo. Os átomos formam os minerais e a associação dos minerais forma as rochas, portanto, as rochas são agregados naturais formados de substâncias minerais ou mineralizadas, resultante de um processo geológico determinado.

Considerando os parâmetros químicos a formação ferrífera é classificada em hematita (alto teor de ferro) e itabirito (médio a baixo teor de ferro).

Para fins de comparação do suporte amostral entre os dois métodos de sondagem, foram feitos os cálculos de massa gerada entre a sondagem rotopercussiva por circulação reversa e a sondagem rotativa diamantada. Pelo cálculo de intervalos de 10 metros de comprimento, a massa de cada amostra RC é 3.7 vezes maior que a amostra de metade de um testemunho da sondagem diamantada (Figura 2.20).

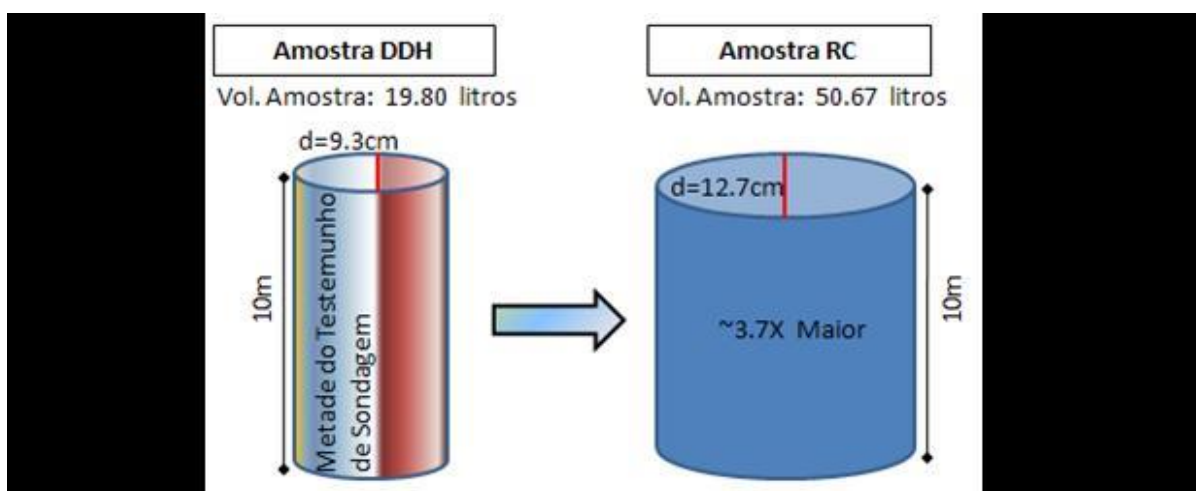


Figura 2.20 – Relação volumétrica entre amostras DDH (RC) e RC

O impacto da heterogeneidade do suporte amostral pode ser grande se a variância é tão importante a ponto de modificar a curva de tonelagem x teor do depósito. Em teoria o suporte amostral deve ser homogêneo, mas na prática é importante a avaliação do impacto real na qualidade da estimativa ao usar diferentes suportes amostrais.

GEOLOGIA DA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

Neste capítulo aborda-se a geologia regional para uma contextualização à área de estudo, procurando-se apresentar a estratigrafia das rochas presentes na Província Mineral de Carajás bem como seus domínios tectônicos, sua gênese e arcabouço estrutural. Localizam-se na porção sudeste do estado do Pará e representa a porção crustal mais antiga e melhor preservada do Cráton Amazônico, tendo grande significância em relação às demais províncias minerais do Planeta (CPRM, 2008).

3.1 - POSICIONAMENTO GEOTECTÔNICO

A Província Mineral de Carajás (PMC) está situada no extremo sudeste do estado do Pará e também do Cráton Amazônico (Figura 3.1). A região é inserida na Província Amazônica Central, sendo limitada a norte pela Sinéclise do Amazonas e a leste pelo Cinturão Araguaia.

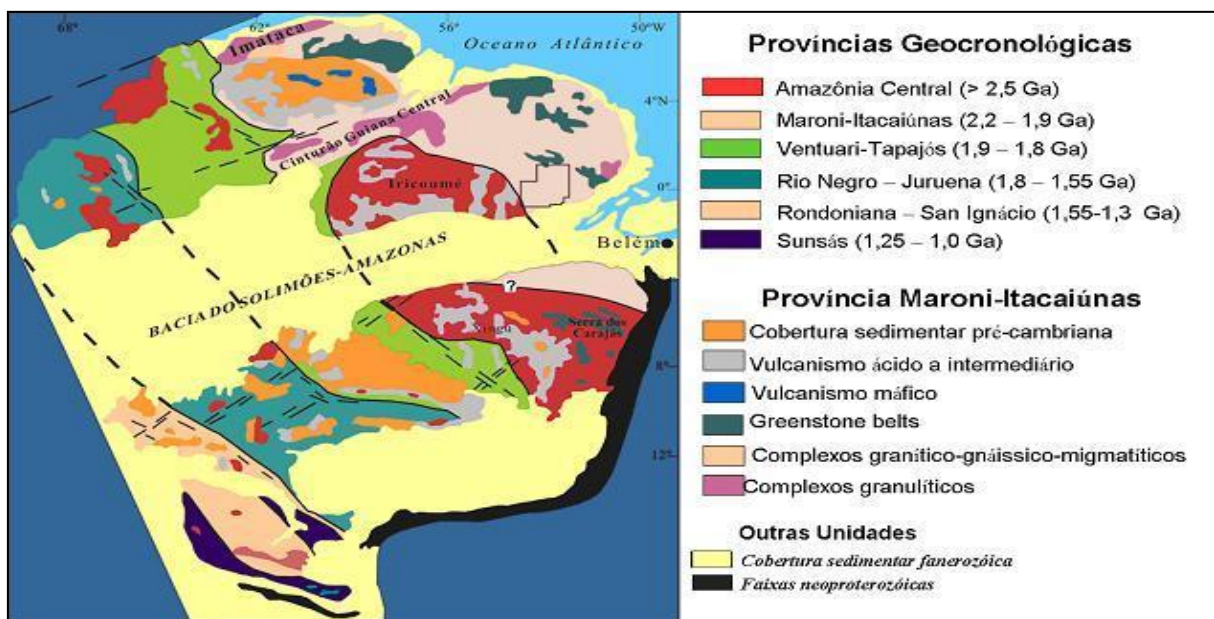


Figura 3.1 - Posicionamento Geotectônico da Província Mineral de Carajás (CORDANI *et al.*, 1979; TASSINARI, 1996).

3.2 - ESTRATIGRAFIA

Em linhas gerais, três grandes unidades litodêmicas, de idade Arqueana, afloram na região da serra dos Carajás: os complexos do embasamento (Xingu e Pium), as unidades do *granito-greenstone* Rio Maria compondo o Supergrupo Andorinhas de idade Mesoarqueana e as unidades metavulcanossedimentares e metassedimentares de idade Neoarqueana.

As rochas do embasamento formam as terras baixas de relevo suave com pequenas diferenças altimétricas. O Complexo Xingu (Figura 3.2) é constituído por gnaisses de composição variável de granito a tonalito, contendo anfibolitos intercalados e intrusões tonalíticas além de migmatitos. Pequenos núcleos de ortogranulitos formam o Complexo Pium. O metamorfismo destas rochas ocorreu por volta de 2,8Ga (MACHADO et al., 1991; RODRIGUES et al., 1992; PIMENTEL & MACHADO, 1994; PIDGEON et al. 2000).

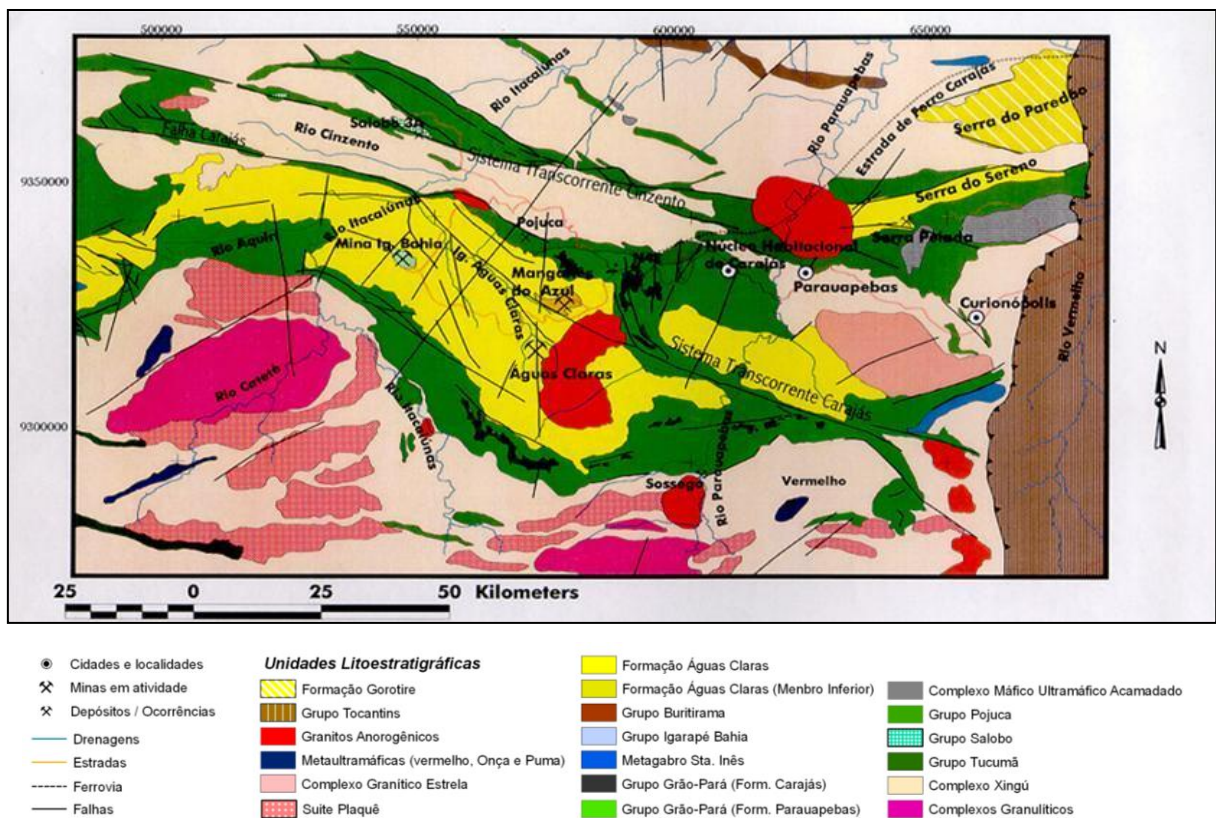


Figura 3.2 - Mapa geológico do Cinturão Itacaiunas (DOCEGEO, 1988).

O greenstone Rio Maria (Figuras 3.3 e 3.4), cujas unidades formam o Supergrupo Andorinhas, é constituído por rochas metamáficas e metaultramáficas, intercaladas com formações ferríferas, metavulcânicas félsicas, metassedimentos clásticos e químicos metamorfisadas em condições de fácies xisto verde a anfibolito. Conforme Santos *et al.* (2000) estas unidades são agrupadas nos seguintes grupos: Babaçu, Sapucaia, Lagoa Seca, Gradaús, Tucumã e São Félix do Xingu além dos granitóides TTG (Arco Verde, Caracol, Mogno e Cumaru) e granitóides cálcio-alcálicos (Guarantã, Rio Maria, Mata Surrão e Xinguara).

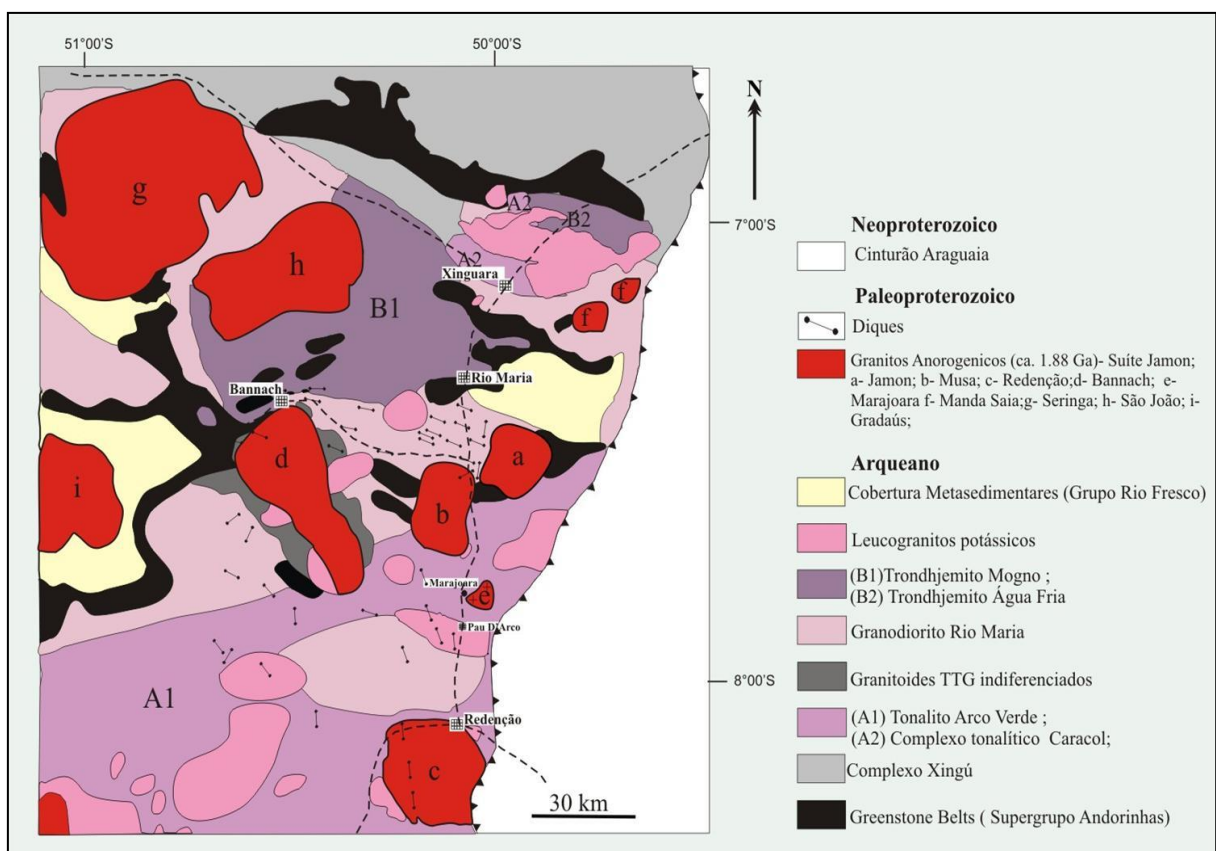


Figura 3.3 - Mapa geológico do *Greenstone* Rio Maria (DOCEGEO, 1988).

As seqüências metavulcanossedimentares e metassedimentares do Supergrupo Itacaiúnas estão representadas nos grupos Aquiri, Tapirapé, Rio Novo, Buritirama, Igarapé Pojuca, Grão Pará, Igarapé Salobo e são intrudidas por uma suíte de granitóides arqueanos e proterozóicos (DOCEGEO 1988, SANTOS *et al.* 2000). Essas unidades registram diferentes graus metamórficos desde fácies xisto verde a anfibolito e/ou fácies granulito (DOCEGEO, 1988; OLSZEWSKI *et al.*, 1989; MACHADO *et al.* 1991) cujos eventos metamórficos ocorreram

entre 2,68 e 2,57 Ga (E.G.MACHADO et al., 1991; SOUZA et al., 1996; TRENDALL et al., 1998). O vulcanismo do Grupo Grão Pará se deu por volta de 2,75 Ga (e.g. WIRTH et al., 1986; MACHADO et al., 1991; TRENDALL et al. 1998).

A nomenclatura da seqüência sedimentar clástica que compõe as porções superiores do Supergrupo Itacaiúnas ou Grupo Grão Pará ainda não é clara. Várias designações têm sido propostas para o seu enquadramento estratigráfico: Formações Igarapé Cigarra e Igarapé Boa Sorte de Macambira et al. (1990) são unidades da porção superior do Grupo Grão Pará ou Formação Águas Claras de Araújo & Maia (1991) ou Grupos Igarapé Bahia e Rio Fresco de Macambira et al. (1990) propõem uma unidade clástica mais nova de idade paleoproterozóica denominada Formação Igarapé Azul.

Na concepção de Nogueira et al. (1994, 2000) a Formação Águas Claras representa o topo do Supergrupo Itacaiúnas cuja idade situa-se entre 2,68 e 2,64 (E.G.DIAS et. al.. 1996; TRENDALL et al. 1998). Na (Figura 3.4) estão sumarizadas as diferentes propostas de empilhamento para a região e a propostas destes autores. O grupo Grão-Pará é composto por três unidades, a saber: Formação Parauapebas, Carajás e Igarapé Cigarra (Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007).

A Formação Parauapebas representa uma unidade metavulcânica bimodal de afiliação ainda carente de detalhamento petrológico e geoquímico, devido as controvérsias encontradas na literatura. Os afloramentos mais estudados desta unidade foram as rochas do topo onde predominam metavulcânicas félsicas com idades variando entre 2.759 +/-2 Ma e 2.743+/-11 Ma [U-Pb, zircão] (LINDENMAYER, 1998 ; MELLITO e TASSINARI, 1998).

Estes dados sugerem uma sincronicidade entre a Formação Parauapebas e o Grupo Salobo-Pojuca além de Complexos Máficos Ultramáficos Intrusivos, tipo Luanga [2.763 +/-6Ma], o que ainda não se compreende bem. Como unidade intermediária do Grupo Grão Pará está a Formação Carajás, composta por formações ferríferas bandadas e corpos de hematititos e magnetititos de idade mínima 2.740 +/-8Ma; determinada por U-Pb em zircão encontrado em um *sill* máfico encaixado na formação ferrífera. A unidade de topo do Grupo Grão Pará é a Formação

Igarapé Cigarra, composta por rochas básicas, metagrauvas, tufos, filitos e quartzitos.

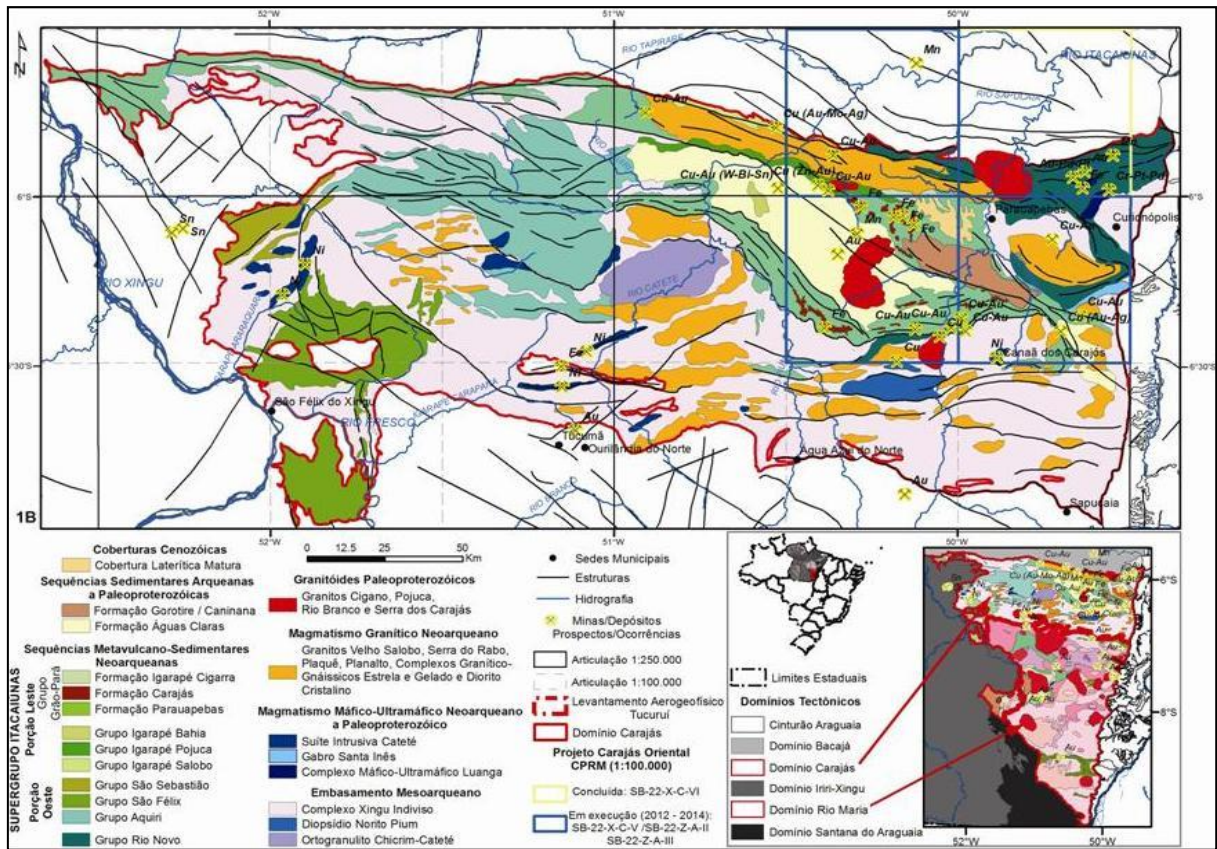


Figura 3.4 - Cartografia Geológica (Modificado de VASQUEZ et al. (2008)).

3.3 - ARCABOUÇO TECTÔNICO

O arranjo tectônico regional da Província Mineral de Carajás (Figura 3.5) é caracterizado pela presença de dois cinturões de cisalhamento interposto pelo bloco Araguacema (SANTOS et al. 2000) cujos limites são marcados por faixas de terrenos granito-greenstone Rio Maria, cujas unidades compõem o Supergrupo Andorinhas Huhn et al. (1988). O Supergrupo Itacaíunas Araújo et al. (1988), situado a norte, possui orientação geral EW e é formado por um conjunto de escamas de cavalgamentos oblíquos com vergência tectônica dirigida para SW e para NE respectivamente a norte e a sul da serra dos Carajás (Faraco et al., 2004; Santos et al. 2000). Adicionalmente, este sistema pode sofrer reativações com cinemáticas opostas das originais em resposta aos esforços compressoriais do cinturão Araguaia ou até mesmo nuclear descontinuidades com tais direções.

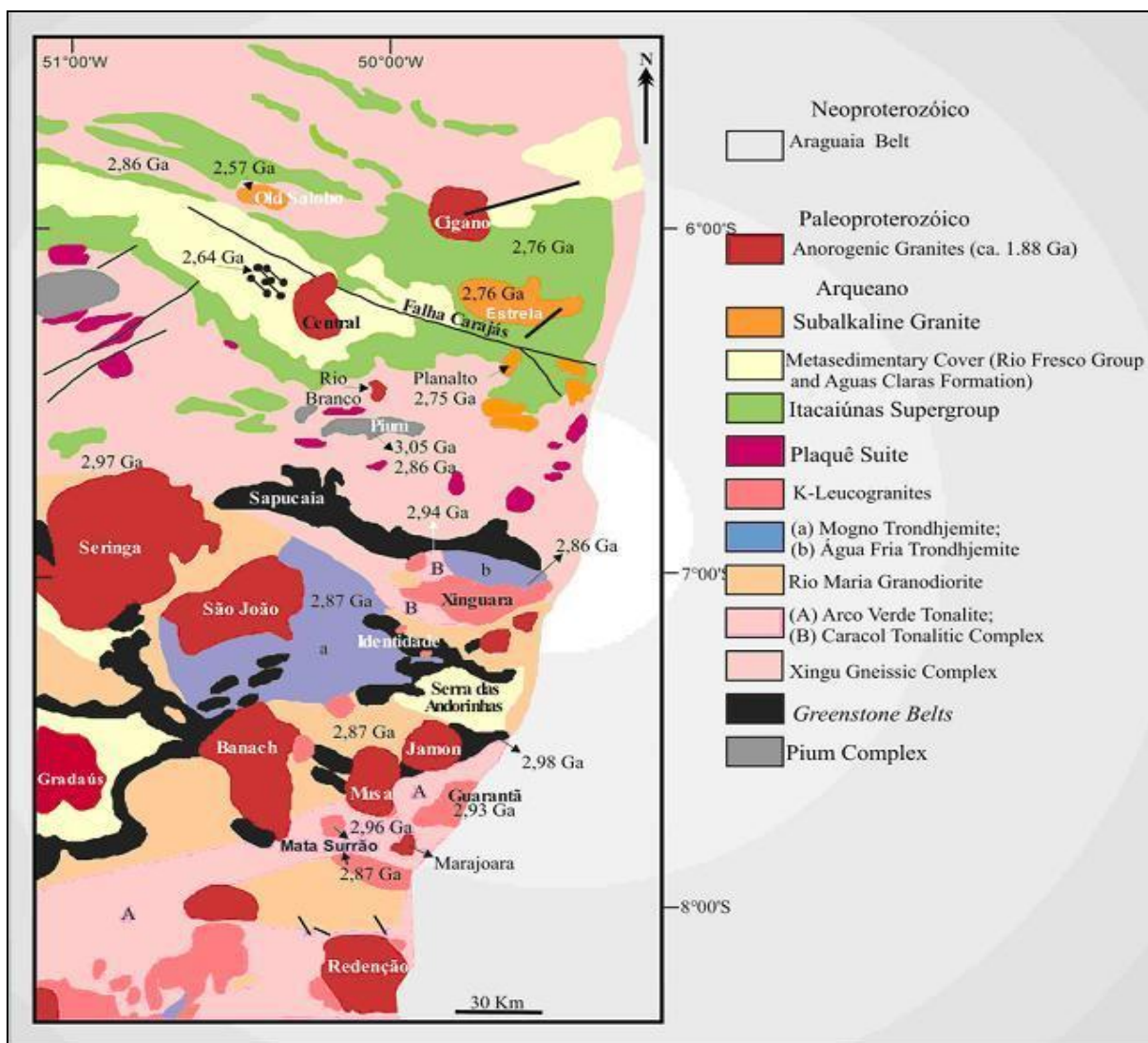


Figura 3.5 – Mapa geológico regional de Carajás mostrando entre outros o Cinturão Araguaia e o Supergrupo Itacaiunas (DOCEGEO, 1988).

A bacia Carajás, onde se teria depositado os sedimentos do Grupo Grão Pará e formado em regime transtrativo dextral, sofreu inversão por meio do Sistema Transcorrente Carajás que culminou na formação do Sinclinório de Carajás na visão de Meireles et al. (1984).

Uma nova interpretação para a estruturação das rochas da região da serra dos Carajás é apresentada por Pinheiro & Holdsworth (2000). Na visão destes autores, as rochas da região seriam agrupadas em dois conjuntos litotectônicos denominados de Assembléia do Embasamento e Assembléia de Cobertura. O primeiro englobaria as rochas dos complexos Xingu e Pium, do Grupo Igarapé Salobo e granitóides da Suíte Plaquê. Esta unidade tectonoestratigráfica estaria deformada e metamorfisada em condições de fácies anfibolito a

granulito em regime transpressivo sinistral formando o cinturão de cavalgamentos e transcorrências Itacaiúnas. A suíte de rochas da Assembléia de Cobertura inclui as unidades de rochas dos grupos Igarapé Pojuca, Grão Pará, Granito Estrela, formações Águas Claras, Gorotire e Serra Grande. A deformação dessa cobertura ocorrida em condições de fácies xisto verde e em regime transpressivo sinistral se dá principalmente da reativação das estruturas mais antigas do Cinturão Itacaiúnas que na cobertura se expressam pelas falhas de Carajás e do Cinzento.

3.4 - GEOCRONOLOGIA

A região dos Carajás possui vasta gama de idades geocronológicas obtidas seja em estudos acadêmicos ou no âmbito da VALE nas datações das mineralizações. Como o assunto torna-se vasto e extenso para descrição resumiremos nesta tese os dados do horizonte de trabalho em questão o Grupo Grão Pará.

A idade máxima para o Grupo Grão Pará (Figura 107). foi obtida nas rochas da Formação Parauapebas; base da referida unidade. (WIRTH et al. 1986) forneceram idades U-Pb de 2.758 +/- 78Ma em zircões dos metariolitos; (GIBBS et al. 1986) fornecem idades Rb-Sr de 2.687 +/- 54Ma nos metabasaltos e (MACHADO et al. 1991) mostram idades U-Pb de 2.759 +/- 2Ma de zircões em metariodacitos e metariolitos.

A idade mínima do Grupo Grão Pará foi estabelecida com base na datação de rochas intrusivas que cortam as rochas sedimentares do topo desta unidade. Neste ponto cabe um comentário pertinente sobre o que é a Formação Águas Claras; nas discussões da equipe da VALE tratam-se desta unidade apenas os metassedimentos que repousam disordadamente sobre as rochas do Grupo Grão Pará. Para tal existe na literatura uma confusão entre a Formação Igarapé Cigarra e o Grupo Águas Claras. Segundo Dias et. al. (1996) um metagabro que corta arenitos da Formação Águas Claras tem idade Pb-Pb (método da evaporação de zircão) 2.645 +/- 12Ma.

Em Trendall et al. (1998) é fornecida a idade de zircões detríticos desses arenitos com idade 2.681 +/- 5Ma. A partir destes dados e considerando o período de cristalização dos basaltos e diques gabróicos toda a evolução do Grupo Grão Pará ocorre em um período de 90Ma. Especialmente para o BIF Carajás, como para qualquer rocha sedimentar química, é difícil obter-se idades geocronológicas; usa-se para tal idades de rochas ígneas associadas. A partir de Macambira et al. (1996) são fornecidas idades de Pb-Pb (método da evaporação de zircão) para um quartzo traquito concordante com os BIF's de 2.757 +/- 16Ma. Na mesma amostra Trendall et al. (1998) obtiveram a idade de 2.743 +/- 11Ma pelo método U-Pb. Este autor também analisou zircões de um *sill* dolerítico que forneceu idade de 2.740 +/- 8Ma, sendo interpretada como idade mínima para o BIF. Analisando os dados da literatura a idade de deposição dos *BIF's* fica limitada a um período de 10Ma entre 2.750 e 2.740. Com os dados de literatura e trabalhos realizados no *Greenstone* de Abitibi, Canadá, e em fumarolas ativas do Mar do Japão calcula-se que cerca de 10 Ma seriam suficientes para depositar aproximadamente 200m de formação ferrífera, o que ficaria no limite da espessura encontrada nos trabalhos de sondagem.

3.5 - ESTADO DA ARTE DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS DE CARAJÁS

No decorrer das pesquisas em Carajás vários trabalhos foram realizados na busca do entendimento da gênese de minério de ferro. Não cabem aqui longas discussões acerca do assunto, que no âmbito mundial possui milhares de trabalhos escritos. Para efeito de simplificar e melhor expor o conhecimento atual do minério de ferro de Carajás serão colocadas as idéias desenvolvidas pela equipe da UFMG, coordenada pelos professores Carlos Alberto Rosière e Lydia Lobato; dos trabalhos realizados pela equipe da UFPA, liderada pelo professor Joel Macambira e pelos colegas do corpo técnico da CVRD Maria Beatriz Vieira, Linda Fujikawa e Osvaldo Amado Belo. (Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007). Relatório interno.

3.5.1 - A partir de Macambira e colaboradores.

Joel Macambira expõe na realidade conclusões à cerca da evolução da “Bacia Grão Pará” sob a ótica das análises petrográficas e químicas das formações ferríferas e rochas correlatas do Grupo Grão Pará.

O ambiente tectônico em que se instalou a bacia deve ser um set crustal continental baseado nas observações do vulcanismo tholeítico da Formação Parauapebas que apresenta, geoquimicamente, contaminações de material oriundo de crosta continental. O Grupo Grão Pará foi depositado sobre rochas siálicas. Segundo Macambira não existem rochas afiliadas à crosta oceânica na região. O autor sugere que a bacia foi deformada por movimentos divergentes e desenvolveu-se num ambiente intraplaca devido ao formato alongado e a natureza do preenchimento por extenso período de vulcanismo. Como não há o desenvolvimento de rochas da crosta oceânica o autor sugere que este *rift* intracontinental foi abortado assemelhando-o a situação recorrente atual do Mar Vermelho. Macambira comenta que a famosa Falha Carajás sofreu várias reativações e sugere que a mesma representa uma geosutura a partir da qual a abertura do rift teria se iniciado, com os derrames de rochas basálticas contendo várias etapas de extravasamento atingindo de 4 a 6 km de espessura. As rochas do topo na Formação Parauapebas, segundo o autor, desenvolveram-se em ambiente aquoso, devido à presença de hialoclastitos e texturas de resfriamento brusco.

A deposição da formação ferrífera é atribuída ao deslocamento de uma pluma quente enriquecida em ferro que se desloca em direção à plataforma continental onde em contato com águas mais rasas e oxigenadas propiciou a deposição do ferro. O teor de sílica é admitido como elevado e tem deposição contínua enquanto o ferro é intermitente dependendo da saturação em O₂ e da presença de microorganismos responsáveis pelos esferulitos encontrados nas *bif's* e do kerogênio encontrado nos siltitos manganésíferos. O autor sugere que as formações ferríferas se depositaram longe da costa em águas calmas devido à ausência de seqüências clásticas associadas, delicado bandamento preservado e numerosas estruturas primárias preservadas atestando a presença de fluxo laminar, além da natureza hidroplástica do material depositado.

O autor confere um decréscimo de ferro em direção ao topo e aumento do teor de sílica assumindo que as formações ferríferas gradam de horizontes muito ricos em ferro para *chert* bandados. Macambira atesta que o período de deposição da formação ferrífera ocorreu sob quiescência tectônica e vulcânica retornando a atividade vulcânica após a deposição registrada nas lavas basálticas da Formação Igarapé Cigarra. Após este derrame inicia-se um processo de regressão marinha com a sedimentação de rochas pelíticas e carbonatos manganésíferos.

Após a retirada do mar seqüências fluviais, representadas por arenitos, depositaram-se nas partes mais baixas da bacia gerando um espesso pacote sobre Carajás. Macambira afirma que desde 2,64Ga (idades das intrusivas gabróicas) até o alojamento do Granito Central (1,88Ga) toda a região permaneceu estável.

3.5.2 - A partir de Rosière & Lobato e colaboradores.

Estes autores desenvolveram fino trato petrográfico e químico de amostras principalmente das Minas da Serra Norte e algumas no contexto regional. Em recente trabalho publicado de convênio com a ADIMB os autores sumarizaram todas as etapas e resultados obtidos na forma de um capítulo inserido em publicação sobre a Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia, (Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007).

O resumo deste trabalho se baseia nas conclusões sobre o modelo de mineralização para o ferro de Carajás dos autores, abaixo citadas na mesma seqüência do apresentado no SIMEXMIN na cidade de Ouro Preto em Maio de 2006:

- – as formações ferríferas do Grupo Grão Pará ocorrem de forma descontínua e parte destas rochas são jaspilitos que predominam na Serra Norte;
- – os autores sugerem que as diversas litologias semelhantes foram depositadas em bacias vizinhas e de evolução diacrônica;
- – o ambiente deposicional é uma bacia do tipo retro arco, os dados são insuficientes para classificar as formações ferríferas sob o caráter dicotômico dos tipos Algoma e Lago Superior;

- – a estruturação das bacias era provavelmente NS e o seu encurtamento por colisão oblíqua gerou dobras de eixo EW;
- – a deformação foi em grande parte por cisalhamento puro, provocando zonas de cisalhamento orientadas aproximadamente segundo os plano axiais das dobras;
- – essas zonas de cisalhamento fragmentaram parcialmente as estruturas dobradas, promovendo translação e rotação de blocos desenvolvendo diversas famílias de fraturas;
- – as mineralizações de ferro se desenvolveram no Paleoproterozóico sobre rochas exumadas da seqüência metavulcanossedimentar arqueana;
- – a deformação experimentada por essas rochas no Arqueano foi de caráter dúctil-rúptil a rúptil. Foliações localizadas foram associadas a processos de *softening* em consequência da passagem de fluidos hidrotermais gerando zonas de cisalhamento e a zonas de contato com granitóides sintectônicos;
- – durante a deformação foram geradas estruturas do tipo *dome and keel* na interação entre essas rochas, os altos estruturais e os granitóides sintectônicos;
- – a estruturação resultante desse evento aumentou a permeabilidade destas rochas facilitando o fluxo do fluido mineralizante em ferro;
- – a associação mineral das rochas indica metamorfismo de fácies xisto verde e corrobora a presença de texturas originais nas rochas;
- – o fluxo principal do fluido mineralizante se deu nos contatos originais entre jaspilito e rocha máfica, contudo a mineralização foi mais intensa nos jaspilitos que nas máficas;
- – o fluido hidrotermal foi quente, em temperatura que excedia as rochas hospedeiras; a temperatura máxima estimada por inclusões fluidas é de 2000C°;
- – em estágio hidrotermal inicial há desenvolvimento de clorita nas máficas e formações ferríferas e talco nas máficas;
- – a assinatura alcalina do fluido advém da presença de albita hidrotermal, zircão e titanita uranífera;
- – também em estágio hidrotermal inicial há o desenvolvimento de Mg-magnetita. Esta transformação de hematita para magnetita registra um estágio de oxiredução do fluido;
- – a textura hidrotermal em pente é identificada em vários minerais, a saber: quartzo, martita, hematita, goetita, talco, albita e carbonato;
- – prolongada interação fluido-rocha e reações minerais associadas podem ter provocado a busca do equilíbrio térmico e resfriamento do sistema fluido:rocha;

- – se o fluido infiltrante era de fato redutor a reação hidrotermal inicial de hematita para magnetita conduziu o fluido já evoluído para transformações a condições mais oxidantes. A característica oxidante também é inferida pela mineralização em hematitas nas máficas;
- – com a magnetita completamente destruída e surgimento de novas gerações de hematita um fluido redutor é hipoteticamente necessário para tal processo. Fato este atestado nas brechas onde a remoção de CO₂ produz dolomitas e conduz ao aumento de pH do fluido;
- – o equilíbrio térmico progressivo do sistema fluido-rocha favoreceu a precipitação de calcedônia e quartzo em zonas de dilatação;
- – as transformações geoquímicas associadas com as transformações mineralógicas citadas no trabalho permitiram aos autores afirmar que as mineralizações de ferro resultaram não apenas da lixiviação de SiO₂ dos jaspilitos mas com o aumento por aporte hidrotermal de ferro;
- – assim os minérios de alto teor hematita mole e hematita dura representam estágios avançados da interação fluido-rocha;

3.5.3 - A partir de Beatriz Vieira e colaboradores.

A partir desta avaliação petrográfica preliminar realizada no corpo D (Figura 3.7) situado na porção extremo sul do depósito de Serra Sul (Figura 3.6) pode-se distinguir três litotipos geradores de minério:

- formação ferrífera bandada silicática-carbonática
- formação ferrífera quartzosa
- formação ferrífera magnetítica

Estes três tipos são o resultado dos processos geológicos que atuaram ao longo da evolução do depósito, desde a sua deposição até os processos de enriquecimento supergênico. Cada um dos processos imprimiu características específicas que condicionam os diferentes tipos de minérios, gerando sub-tipos com características mineralógicas, químicas e granulométricas bastante distintas.

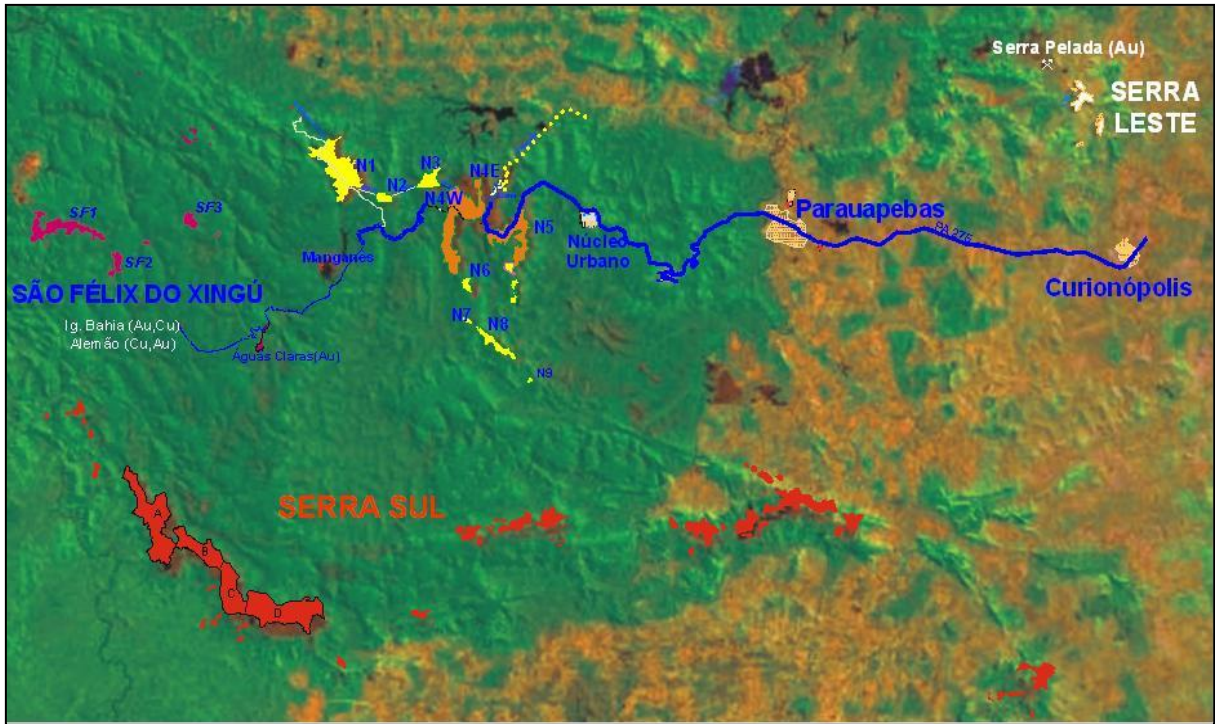


Figura 3.6 - Mapa de localização de Serra Sul.

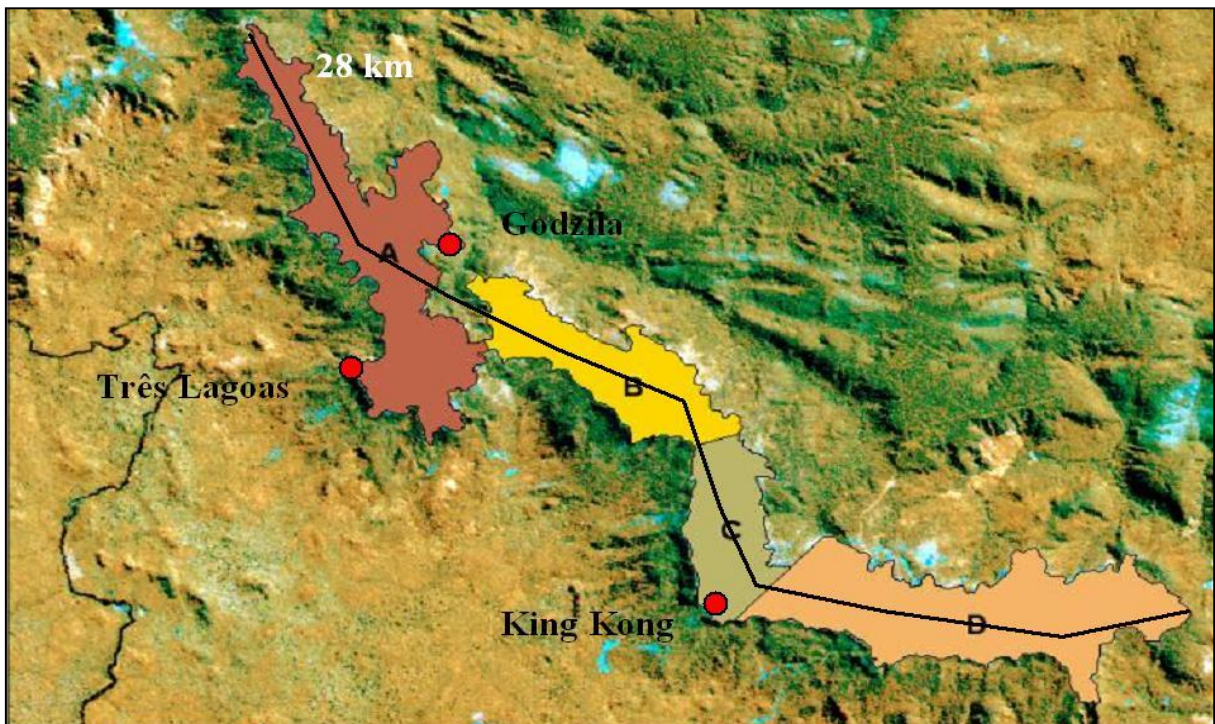


Figura 3.7 - Subdivisão dos Corpos de ferro de Serra Sul, no detalhe em vermelho a localização dos corpos de hematita compacta.

As características herdadas de cada processo geológico em Serra Sul são: deposição, alteração hidrotermal, deformação e alteração supergênica.

3.6 - DEPOSIÇÃO

Apesar do depósito de Serra Sul (Figura 3.7) ter sido afetado por processos posteriores que modificaram significativamente as características originais da formação ferrífera, ainda são encontrados restos de jaspelito com características similares ao jaspelito do depósito de N4 (Figura 3.6).

Considera-se que o bandamento observado na maior parte das amostras estudadas corresponda ao acamamento (S_0). Esta estruturação parcialmente foi em grande parte nas porções afetadas pelos processos hidrotermais posteriores, devido ao caráter mimético deste processo, evidenciado em diversas das amostras estudadas.

É difícil afirmar se houve variação significativa do Fe durante a deposição, uma vez que o pacote foi afetado por um processo de enriquecimento posterior. Entretanto, considera-se a hipótese de que o “jaspelito intermediário” represente um nível menos ferruginoso da formação ferrífera.

Considerando-se uma natureza vulcano-exalativa para a formação ferrífera, não se descarta também a possibilidade da formação ferrífera ter sido afetada por processos de alteração sin-deposicionais, que não foram detectados neste estudo (Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007).

3.7 - ALTERAÇÃO HIDROTERMAL

As características mineralógicas e texturais encontradas na formação ferrífera de Serra Sul revelam ter sido submetida a um intenso processo de alteração hidrotermal (Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007). Este processo modificou significativamente a mineralogia e química da formação ferrífera, gerando minerais de ferro tais como siderita (carbonato), silicatos, óxidos (principalmente magnetita, e em

menor proporção, hematita lamelar e granular), além de introduzir elementos atípicos como K (fixado em minerais como celadonita, tetra-ferrí-annita, riebeckita e aegerina), S (na forma de sulfetos) e outros metais associados (Cu, Pb, Zn, etc).

Exceto a magnetita, que se desenvolve mimeticamente em cordões predominantemente ao longo do bandamento, todos os outros minerais citados acima apresentam o mesmo posicionamento sin a tardi-tectônico, sendo esta uma das principais evidências de que teriam sido gerados no mesmo evento, concomitante a esforços compressoriais.

Além da formação de novos minerais este processo promove a segregação do Fe e da Si e resulta na recristalização do chert/jaspe em quartzo “granoblástico” de granulação fina a média. A consequência imediata é a modificação das qualidades de liberação do Fe e da Si contidos originalmente na forma de jaspe. Este processo caracterizaria a transformação do jaspelito para proto-itabirito.

O processo hidrotermal causa também uma profunda modificação na morfologia e tamanho de cristal dos óxidos de Fe, sendo que toda a hematita microcristalina originada do jaspe e dos níveis mais ricos da formação ferrífera foi completamente substituída por magnetita. Em determinadas porções a magnetita está em processo avançado de oxidação para hematita lobular, possivelmente no mesmo evento devido a variações do fluido, seja na temperatura de resfriamento ou fugacidade de oxigênio devido ao tamponamento do fluido pela formação ferrífera.

O posicionamento, associação e características das amostras analisadas sugerem a existência de halos de alteração, com características distintas quanto ao tipo e intensidade da alteração.

A paragênese que corresponde a condições de menor temperatura (siderita-minessotaíta-magnetita) parece ser a mais distal, e nela de modo geral o bandamento está mais preservado, sugerindo uma alteração pervasiva. Neste domínio ainda é comum encontrar restos de jaspelito. Esta paragênese está presente em pequena proporção no jaspelito intermediário sugerindo que este também foi afetado pelo processo hidrotermal. Neste caso considera-se a hipótese de que a característica originalmente mais silicosa deste nível teria inibido o desenvolvimento amplo dos minerais de alteração, tendo ocorrido principalmente a

recristalização do chert em quartzo. É possível também que neste domínio distal os processos de enriquecimento por hidrotermalismo seja discreto e localizado.

Neste estágio observa-se um intenso processo de magnetitização, que pode resultar num enriquecimento da formação ferrífera original. Este processo pode ocorrer segundo o bandamento, pela remobilização da sílica. Foram encontradas evidências de que este processo de alteração hidrotermal gera um enriquecimento da formação ferrífera silicosa. Existem evidências que sugerem que este processo tenha ocorrido de pelo menos duas formas distintas: mimeticamente ao bandamento com remobilização parcial da sílica, ou por substituição gerando vênulas de quartzo em cristais médios, que tendem a ficar como SiO₂ residual no minério, ou por substituição gerando “brechas” devido ao isolamento de restitos da rocha alterada em meio a uma matriz essencialmente magnetítica. A magnetita nesta paragênese não apresenta oxidação, possivelmente com maior intensidade de fluidos, sugerindo um provável tamponamento da rocha pelo fluido.

As características deste processo sugerem que a formação ferrífera foi afetada por fluidos hidrotermais, provavelmente de filiação magmática similar aos responsáveis pelas mineralizações de Cu encontrados na província mineral de Carajás (Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007).

3.8 - DEFORMAÇÃO

Além do processo de deformação associado ao evento hidrotermal descrito acima, os trabalhos de campo têm identificado falhas de natureza dúctil-rúptil a rúptil transversas ao sentido da Serra Sul (Figura 3.7), possivelmente relacionadas a movimentações tectônicas de soergimento da bacia (Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007).

Apesar de não terem sido estudadas amostras desta zona, e mesmo tendo influência mais localizada, estas estruturas devem ser consideradas como potenciais modificadoras da característica do minério, pois propiciam o acesso de águas meteóricas nos níveis mais profundos, favorecendo o enriquecimento do minério. Nestas zonas devem-se esperar

minérios com maior grau de hidratação e estágio avançado de desintegração física, e conseqüentemente subtipos de minérios localizados e com posicionamento anômalo.

3.9 - ALTERAÇÃO SUPERGÊNICA

Além dos condicionantes naturais para o desenvolvimento do processo supergênico, destaca-se no depósito de Serra Sul (Figura 3.7) a maior vulnerabilidade de oxidação devido à presença de minerais como siderita e minnesotaíta, gerados no processo de alteração hidrotermal. Os estudos petrográficos revelam que a decomposição destes minerais resulta em diferentes tipos de goethita, cuja distribuição e expressão no depósito é fortemente condicionada a distribuição do litotipo original. Além de resultar em minérios com percentual mais elevada de perda ao fogo pela presença de goethita, geram subtipos de minérios com distribuição granulométrica bastante característica (Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007).

Conforme mencionado anteriormente, cada processo exerce influência direta dos processos geológicos, nas características do minério e, apesar de ocorrerem em domínios de abrangência e intensidade distintos, podem naturalmente se sobrepor, gerando tipos de características distintas.

3.10 - GEOLOGIA DOS PLATÔS DA SERRA NORTE DOS CARAJÁS

Foram definidos no Relatório de Pesquisa de 1972 – Distrito Ferrífero – Serra dos Carajás nove corpos de minério de ferro correspondendo cada um a um platô, denominados N1 a N9. As minas em operação são N4E, N4WC, N4WN, N5W e N5E, indicadas no mapa da figura 3.8

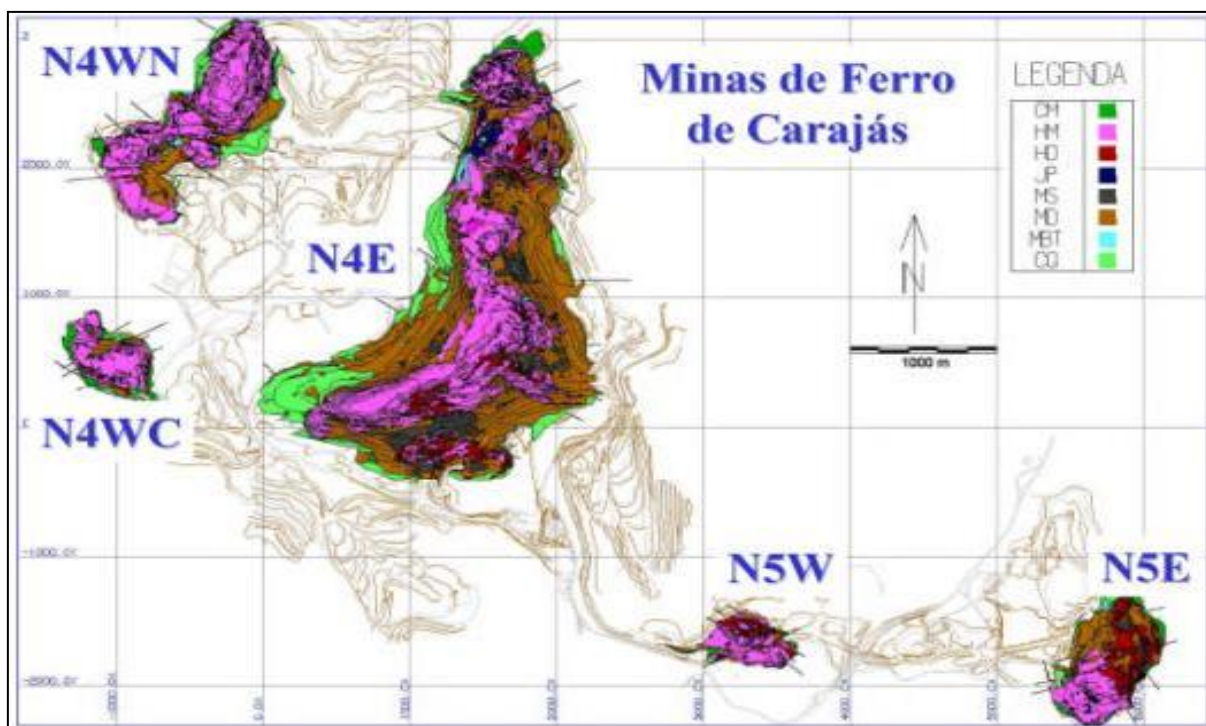


Figura 3.8 - Geologia das minas de Serra Norte - Carajás (Fonte: GAJAN/DIFN)

A Formação Carajás (Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007), compreende uma camada e corpos lenticulares descontínuos de jaspelitos, formações ferríferas dolomíticas e lentes de hematita compacta, entremeada por soleiras e diques de rochas básicas, principalmente no domínio setentrional do Sinclínório de Carajás, onde ocorrem os corpos de minério mais espessos e economicamente mais importantes. Diversos corpos lenticulares de jaspelito e minério de alto teor também ocorrem no flanco meridional do Sinclínório. Jaspelitos representam o protominério do depósito de Carajás com 17,11 a 43,40% de Fe e 35,10 a 60,84% de SiO₂ (TOLBERT et al. 1971). São caracterizados por um mesobandamento irregular de espessura centimétrica, e um microbandamento regular de espessura milimétrica definidos pela intercalação de camadas claras e escuras que representam estruturação primária da rocha (Figura 3.9).

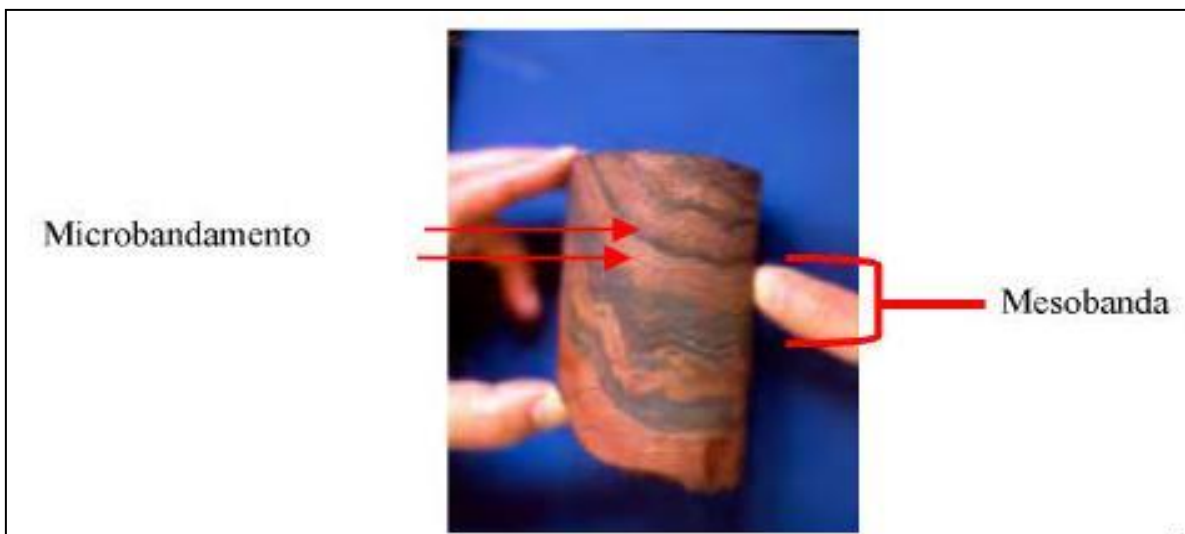


Figura 3.9 - Jaspelito da Formação Carajás com típico meso- e microbandamento de óxido de ferro e jaspe (ROSIERE, 2005).

Os níveis escuros dos jaspelitos são constituídos por óxido de ferro, apresentando variações em sua trama. As fase dominantes são hematita fina (7 a 80mm de diâmetro) e magnetita martitzada (7 a 250mm de diâmetro) como blastos idiomórficos em uma matriz muito fina. Hematita é geralmente microcristalina, microgranoblástica ou ocorre como plaquetas finas sem orientação.

Uma camada de formação ferrífera carbonática com cerca de 50m de espessura ocorre próximo da base da camada de jaspelito a uma profundidade de 180m abaixo do minério friável do corpo N4E. Formações ferríferas carbonáticas são dolomíticas e constituídas por bandas claras de dolomita e chert em proporções variadas, alternadas com bandas escuras de óxidos de ferro.

Processos de dolomitização são comuns, resultando no progressivo obliteramento das estruturas primárias. Localmente o jaspelito pode se transformar em dolomito ferruginoso.

Os jaspelitos encontram-se dobrados, com *kinks*, e localmente falhados, sem o desenvolvimento de uma xistosidade em grande escala. O inventário estrutural indica um comportamento dúctil-rúptil sob condições de baixas temperaturas/profundidades.

Os corpos de hematita compacta ocorrem sob a forma de lentes, em contato com as rochas metavulcânicas subjacentes e estão envolvidos por minério friável, onde aparecem evidências de alteração hidrotermal. Nas proximidades do contato entre o minério compacto e a rocha vulcânica, a mesma também está alterada hidrotermalmente e parcialmente mineralizada em ferro, com o desenvolvimento de brechas hidráulicas, cavidades preenchidas com carbonato, quartzo, caulim e hematita microlamelar, veios de quartzo e hematita, e agregados fibrosos de clorita.

Os corpos de hematita compacta são geralmente concordantes ao acamamento, formando corpos tabulares, com dimensões superiores a 100m e espessuras em torno de 50m. Os contatos com as rochas encaixantes são geralmente abruptos, mas interdigitações e contatos gradacionais também são observados localmente. Estes corpos geralmente exibem bandamento relictado herdado dos jaspelitos com níveis mais densos alternados com bandas porosas. No depósito N4 (Figura 3.8) este tipo de minério é cinza escuro, fosco e poroso, enquanto que, em outros, tais como em N5 (Figura 3.8), ele é mais denso e de cor cinza metálica. Corpos de minério discordantes são mais raros e ocorrem como veios.

Os corpos de minério friável ocorrem de duas formas distintas: minério pulverulento sem estrutura interna e minério com estrutura bandada relictada. O minério friável de N4E passa, em profundidade, para minério dolomítico, na sua parte superior predominam veios de quartzo sacaroidal.

Lentes ricas em manganês, de cor cinza a marrom, ocorrem em diversas partes das minas, sem controle estratigráfico ou estrutural aparente.

A mina de N4 (Figura 3.8) compreende dois corpos de minério principais, N4E e N4W, separados por uma falha N-S. O corpo de minério de N4E tem reservas superiores a 1 bilhão de toneladas de minério friável. O corpo N4E tem forma aproximada da letra J, com 5km de extensão e 500 metros, segundo o mergulho de 30° a 40° para NW e espessura média de 350 metros, separado dos outros corpos pela zona de cisalhamento de Carajás. Na porção norte o minério é friável, laminado, com diversos corpos irregulares de jaspelitos e na porção sul predominam jaspelitos dolomitizados e lentes de manganês dentro do minério friável a pulverulento. Lentes de minério compacto ocorrem nas duas porções do depósito.

O minério da mina de N4W é predominantemente friável, sendo possível distinguir corpos ricos em manganês. Corpos de hematita compacta são raros. Os jaspelitos que ocorrem nas porções W e NW da mina são altamente magnéticos e tem fraturas preenchidas por calcopirita e pirita.

O minério da mina N5 (Figura 3.8) apresenta características bastante distintas. Em N5E, tem o aspecto podiforme, com jaspelitos e minério de alto teor totalmente envolvidos pelas rochas vulcânicas da Formação Parauapebas/Cigarra. Não existem evidências de dolomitização e o minério é constituído essencialmente por hematita dura com brilho metálico.

3.11 - Principais litotipos presentes nos furos de sonda

3.11.1 - Os principais tipos de materiais ricos em ferro da jazida de Serra Sul

- **Hematita Friável (HF);**

Formadas predominantemente pelo enriquecimento supergênico dos jaspelitos (Figura 3.10). É o tipo mais encontrado nos furos de sonda 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 450m 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 jaspelitos pobres (JP) ocorre uma quebra brusca nos teores de ferro, embora, localmente, observam-se contatos gradacionais com os jaspelitos ricos (JR). Contém aproximadamente 17% das partículas acima de 8mm. Trata-se de uma camada bastante espessa variando de poucos metros a até mais de 420m.



Figura 3.10 – 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). Ocorrem na forma de lentes e/ou bandas intercaladas aos jaspelitos de forma concordante (Figura 3.11). 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 8mm. A espessura dos Corpos varia de poucos metros a até 30m e o teor médio de Fe é de cerca de 66%, com baixos teores de P, sendo a média de 0.055. Os contatos com os tipos friáveis são abruptos. Em relação aos teores de Fe, possui contatos bem marcados apenas com os jaspelitos. 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.



Figura 3.11 – Amostra de mão de hematita Compacta

- **Hematita Manganésifera (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 jaspelitos e rochas máficas, podendo também se apresentar sob 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 50m.

- **Jaspelito (JP);**

São formações ferríferas bandadas geralmente da fácies óxido, compostas pela alternância entre bandas e lâminas de jaspe/sílica e bandas de hematita (Figura 3.12). 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: jaspelito carbonático, jaspelito silicoso, jaspelito clorítico e jaspelito 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 de 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;

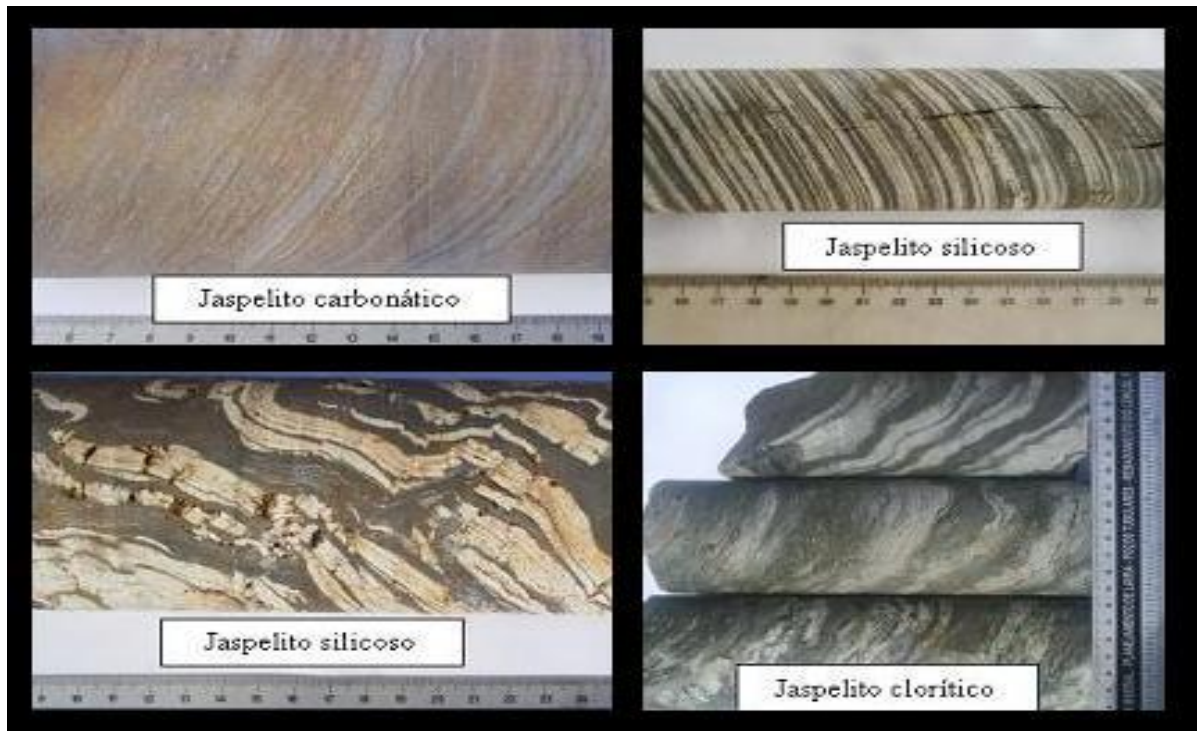


Figura 3.12 – Amostra de testemunho de Sondagem de Jaspelito

- **Jaspelito Rico (JR);**

Possui características macroscópicas semelhantes às dos jaspelitos; ocorrendo ao longo de todo o depósito sob a forma de lentes em contato com hematitas friáveis. São jaspelitos onde o quartzo foi bastante lixiviado, restando material rico em ferro e friável. Contém, na média, aproximadamente 28 % das partículas maiores que 8mm. 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 70m.

As cangas representam um produto da meteorização sobre as seqüências características da região. Ocorrem de diversas formas dependendo do substrato rochoso sobre o qual se

desenvolveram e das condições fisiográficas locais. Possuem ampla expressão na porção superior do Platô S11, constituindo elemento de sustentação do topo do platô. Foram divididas em dois tipos distintos: canga química (CQ) cobrindo as rochas máficas e canga estrutural (CE) cobrindo as formações ferríferas.

- **Canga Estrutural (CE);**

Rocha predominantemente compacta em avançado estado de alteração intempérica, onde não é possível distinguir a mineralogia a olho nu (Figura 3.13). 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, fósforo e perda ao fogo. Os teores de Fe na média giram em torno de 64.5%. Possui em torno de 62% das partículas acima de 8mm. Parte deste material pode ser aproveitado como minério, sendo um potencial gerador de produtos granulados. A espessura varia desde poucos metros podendo atingir até 60m;



Figura 3.13 – Amostra de testemunho de sondagem de Canga Estrutural.

- **Canga Química (CQ);**

Rocha de natureza detrítica gerada pela erosão da camada de formação ferrífera (Figura 3.14). Recobre grande extensão da área de Serra Sul juntamente com as cangas estruturais. A espessura média gira em torno de 20m podendo atingir 40m. O teor médio de Fe é de cerca de 58.6% e possui altos teores de P, Al e PF. Litologia considerada estéril.



Figura 3.14 – Amostra de testemunho de sondagem de Canga Química

Além da canga química (Figura 3.15), outras litologias consideradas estéreis são encontradas nos furos de sonda. Estas litologias são as encaixantes das formações ferríferas, representadas pelas rochas máficas das formações Parauapebas e Igarapé Cigarra, além do dique básico (DB) e das intercalações de *sills* máficos nas formações ferríferas. Estas rochas máficas podem estar decompostas ou não e são designadas de máfica sã (MS) e máfica decomposta (MD).

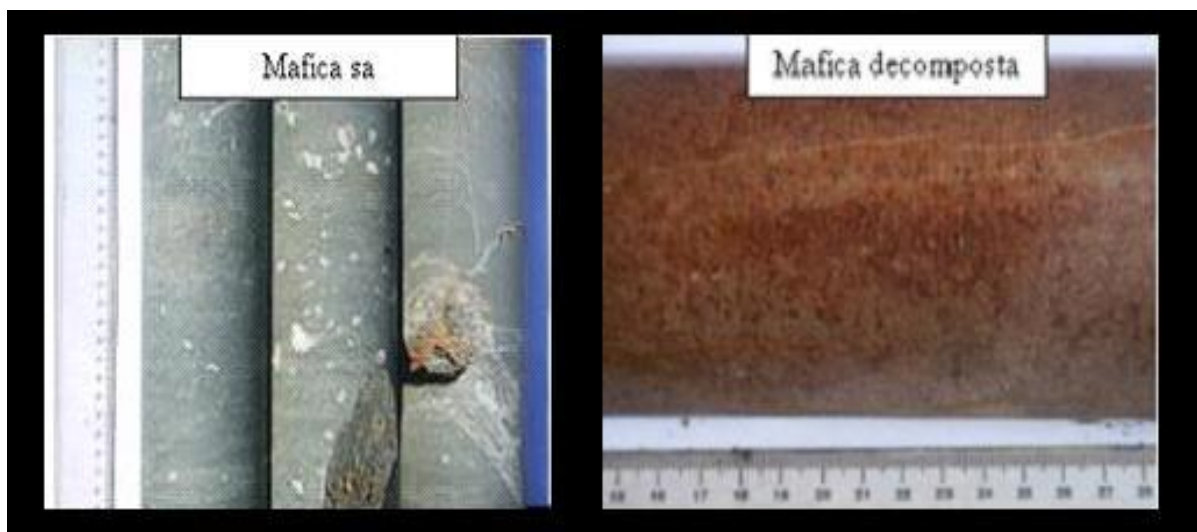


Figura 3.15 – Amostra de testemunho de sondagem de Máfica sã e decomposta

3.12 - HISTÓRICO DA PESQUISA

3.12.1 - Campanhas de Sondagem e Amostragem

Os trabalhos de pesquisa realizados na jazida de Serra Sul, Corpos C e D do Alvo S11, tiveram seu início no final da década de 60 e início da década de 70. Nesta época foi realizada grande campanha de pesquisa que abrangeu toda a Província Mineral de Carajás (PMC). Os trabalhos incluíram as áreas de Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste e São Felix do Xingu, todas com grande potencial de recursos geológicos de minério de ferro. A jazida de Serra Sul inclui ao todo 45 alvos de pesquisa, que vão desde S1 a S45. Estas informações estão sintetizadas na tabela 3.1

Tabela 3.1 – Campanhas de sondagem realizadas nos Corpos de Serra Sul

| Campanha (Ano) | Total de Furos | | | | | | Metragem Executada | | |
|-------------------|----------------|-----------|-----------|------------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| | Corpo A | Corpo B | Corpo C | Corpo D | Total de furos RD | Total de furos RC | Metragem RD (m) | Metragem RC (m) | Total Metragem (m) |
| 1970 | 11 | 23 | 7 | 22 | 63 | | 10.111,72 | | 10.111,72 |
| 2003/2004 | | | 0 | 153 | 153 | | 37.014,30 | | 37.014,30 |
| 2005 | | | 51 | 115 | 166 | | 30.750,30 | | 30.750,30 |
| 2006/2009 | | | | | 0 | | - | | - |
| 2010 | | | | 19 | 19 | | 4.738,30 | | 4.738,30 |
| 2011 | | | | 34 | 6 | 25 | 13.338,00 | 2.353,00 | 15.691,00 |
| 2012 | | | | 131 | 69 | 62 | 15.879,50 | 9.504,00 | 25.383,50 |
| TOTAL | 11 | 23 | 58 | 474 | 476 | 87 | 111.832,12 | 11.857,00 | 123.689,12 |

A malha de sondagem que predomina nos Corpos C e D do Alvo S11 e de 200x200m, com fechamento para 100x100m no chamado “Alvo Galeria” no Corpo D.



Figura 3.16 – malha de sondagem nos Corpos C e D do Alvo S11.

3.12.2 - Campanha I

A primeira campanha de sondagem, cujos nomes dos furos se iniciam pelo código S11-Fxx, foi realizada na década de 70, quando foi feito um amplo trabalho de mapeamento geológico e sondagem exploratória em toda a PMC. O método de perfuração utilizado foi o de sondagem rotativa diamantada realizado pelas empresas SERVIPETROL e GEOSOL. Este trabalho resultou na delimitação dos principais alvos de minério de ferro na região de Carajás. No Alvo S11, Corpos A, B, foram realizados 24, no corpo C, 7 furos e no Corpo D e 22 furos, totalizando 29 furos e 10.111,72 metros perfurados.

Em 2006/2007 foi feita reamostragem e partes destes furos foram analisadas no teste padrão, a úmido, gerando resultados químicos e granulométricos.

3.12.3 - Campanha II

A segunda campanha de sondagem ocorreu entre os anos de 2003 e 2004, coordenada conjuntamente pelo DIPM e pela GAJAN, onde foram realizados 153 furos de sonda no Corpo D, perfazendo 37.014,30 metros perfurados. Os furos desta campanha são identificados pelo código S11D-xxx. O método de perfuração utilizado foi o de sondagem rotativa diamantada realizado pelas empresas GEOSOL e GEOSERV.

Esta campanha utilizou o Teste Padrão a Seco para as análises químicas e granulométricas dos furos de sonda.

3.12.4 - Campanha III

A terceira campanha realizada em 2005 conduzida pelo DIPM/GAPOK realizou 51 furos no Corpo C e 115 furos no Corpo D, totalizando 166 furos e 30.750,30 metros perfurados. O método de perfuração utilizado foi o de sondagem rotativa diamantada realizada pelas empresas GEOSOL e GEOSDNA no Corpo D e GEOSOL e BOART LONGYEAR/GEOSERV no Corpo C. Esta campanha utilizou o teste padrão a úmido para as análises dos furos de sonda.

4.1 - AQUISIÇÕES E ANÁLISE DOS DADOS

A campanha de aquisição de dados de sondagem utilizados neste trabalho desenvolveu-se em duas fases; a primeira com 23 furos, entre abril de 2010 a março de 2011, e a segunda quando foram realizados 31 furos de sondagem rotoperçussiva (R.C) em circulação reversa conforme a Tabela 4.1 Os furos de sondagem rotativa testemunhada no alvo denominado como Corpo D tem profundidade média de 240 m e seu mergulho de 90° (Anexo 3, 4, 5 e 6). Estes são de fundamental importância para instalação de piezômetros na área.

Na segunda fase acontece a campanha de sondagem rotoperçussiva, onde foram realizados 26 furos gêmeos, com profundidade média de 158m e mais 5 furos trigêmeos, conforme a Tabela 4.1.

A meta de 250 metros de profundidade não foi atingida e a principal causa apontada seria devido à presença de água nas zonas abaixo do lençol freático. Mesmo com o uso de compressores auxiliares não foi possível avançar além de 230m. Os furos mais profundos de RC foram aqueles iniciados em cotas mais altas, atingindo o lençol em níveis mais profundos. Esse valor é próximo da média de profundidade obtida nos testes realizados neste estudo.

Tabela 4.1 – Furos de sonda realizadas nos Corpos de Serra Sul realizados no trabalho.

| FURO | ANO | COTA | PROG. (M) | EXEC. (M) | EXEC. (%) | Início | Término |
|-------------|------------|-------------|------------------|------------------|------------------|---------------|----------------|
| 1 | 2011 | 739.583 | 200.00 | 134.00 | 0.67 | 10/08/2011 | 23/08/2011 |
| 2 | 2011 | 769.681 | 200.00 | 131.00 | 0.66 | 25/08/2011 | 01/09/2011 |
| 3 | 2011 | 771.290 | 200.00 | 200.00 | 1.00 | 12/09/2011 | 24/09/2011 |
| 4 | 2011 | 767.521 | 233.00 | 40.00 | 0.17 | 26/09/2011 | 27/09/2011 |
| 5 | 2011 | 774.296 | 208.00 | 158.00 | 0.76 | 28/09/2011 | 05/10/2011 |
| 6 | 2011 | 709.468 | 250.00 | 152.00 | 0.61 | 06/10/2011 | 13/10/2011 |
| 7 | 2011 | 810.143 | 250.00 | 205.00 | 0.82 | 13/10/2011 | 18/10/2011 |
| 8 | 2011 | 745.927 | 20.00 | 20.00 | 1.00 | 18/10/2011 | 18/10/2011 |
| 9 | 2011 | 745.937 | 20.00 | 20.00 | 1.00 | 18/10/2011 | 18/10/2011 |
| 10 | 2011 | 746.077 | 20.00 | 20.00 | 1.00 | 18/10/2011 | 18/10/2011 |
| 11 | 2011 | 746.135 | 20.00 | 20.00 | 1.00 | 18/10/2011 | 18/10/2011 |
| 12 | 2011 | 746.159 | 20.00 | 20.00 | 1.00 | 18/10/2011 | 18/10/2011 |
| 13 | 2011 | 746.545 | 20.00 | 20.00 | 1.00 | 18/10/2011 | 18/10/2011 |
| 14 | 2011 | 746.820 | 20.00 | 20.00 | 1.00 | 19/10/2011 | 19/10/2011 |
| 15 | 2011 | 746.476 | 20.00 | 20.00 | 1.00 | 19/10/2011 | 19/10/2011 |
| 16 | 2011 | 746.142 | 20.00 | 20.00 | 1.00 | 19/10/2011 | 19/10/2011 |
| 17 | 2011 | 746.221 | 20.00 | 20.00 | 1.00 | 19/10/2011 | 19/10/2011 |
| 18 | 2011 | 710.391 | 250.00 | 179.00 | 0.72 | 19/10/2011 | 25/10/2011 |
| 19 | 2011 | 758.510 | 220.00 | 104.00 | 0.47 | 20/10/2011 | 28/10/2011 |
| 20 | 2011 | 714.463 | 208.00 | 144.00 | 0.69 | 04/11/2011 | 10/11/2011 |
| 21 | 2011 | 716.183 | 238.00 | 130.00 | 0.55 | 10/11/2011 | 17/11/2011 |
| 22 | 2011 | 876.401 | 212.00 | 160.00 | 0.75 | 17/11/2011 | 22/11/2011 |
| 23 | 2011 | 803.359 | 250.00 | 184.00 | 0.74 | 25/11/2011 | 02/12/2011 |
| 24 | 2011 | 769.450 | 250.00 | 22.00 | 0.09 | 06/12/2011 | 06/12/2011 |
| 25 | 2011 | 887.256 | 250.00 | 210.00 | 0.84 | 07/12/2011 | 13/12/2011 |
| 26 | 2012 | 851.354 | 250.00 | 205.00 | 0.82 | 17/01/2012 | 30/01/2012 |
| 27 | 2012 | 816.826 | 250.00 | 224.00 | 0.90 | 30/01/2012 | 09/02/2012 |
| 28 | 2012 | 801.494 | 217.00 | 203.00 | 0.94 | 10/02/2012 | 16/02/2012 |
| 29 | 2012 | 864.893 | 250.00 | 201.00 | 0.80 | 17/02/2012 | 27/02/2012 |
| 30 | 2012 | 714.520 | 250.00 | 151.00 | 0.60 | 28/02/2012 | 01/03/2012 |
| 31 | 2012 | 810.367 | 250.00 | 120.00 | 0.48 | 02/03/2012 | 09/03/2012 |

Foi observado que há perda da eficiência relacionada com a profundidade do furo de RC conforme a Figura 4.1.

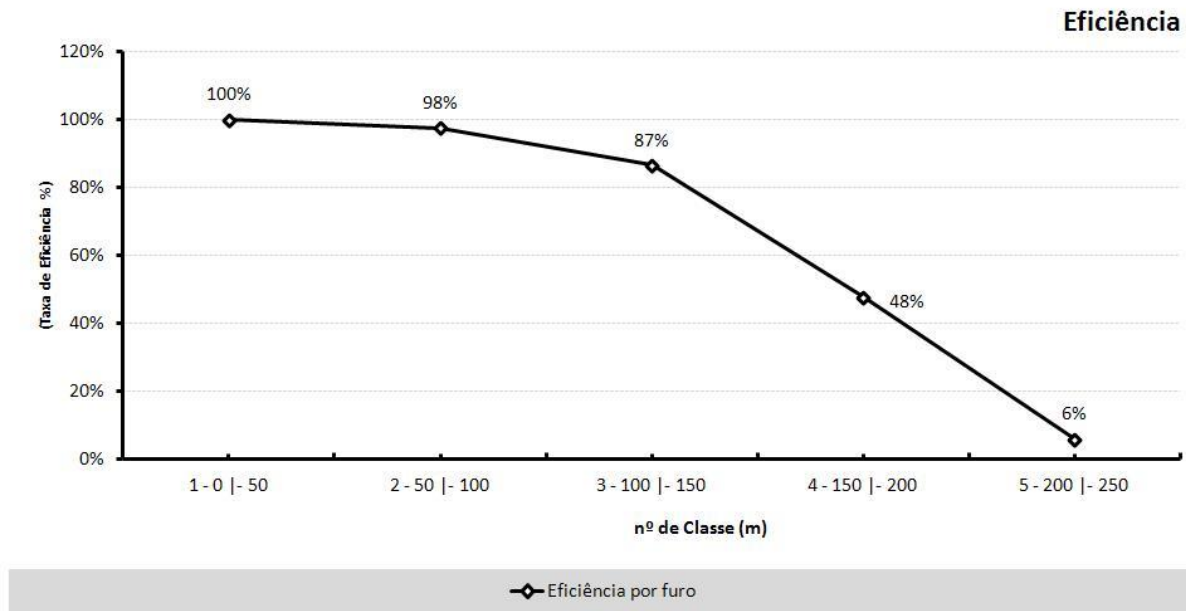


Figura 4.1 – Eficiência da sondagem rotopercussiva em relação à profundidade

De acordo com a Figura 4.1, os furos que passam de 150 m de profundidade têm 52% de chance de trancar ou não concluir a profundidade programada.

De posse dos boletins de sondagem Rotativa testemunhada e circulação reversa, iniciou-se a análise da taxa de penetração que tem como objetivo determinar o tempo gasto para se perfurar 1m de cada litologia. Esta taxa depende de parâmetros como peso sobre a broca, velocidade de rotação da coluna, profundidade do furo etc. Desta forma, adotamos o tempo médio de perfuração para cada método nas diversas litologias e espaços.

O tempo de perfuração analisado nos gráficos deste trabalho se refere ao tempo de corte da rocha, pois, não está sendo contabilizado o tempo de troca das ferramentas e acessórios.

De acordo com a análise dos gráficos das Figuras 4.1 a 4.10 percebem-se valores médios de taxa de penetração bastante diferente entre os métodos de perfuração e que estes, variam dependendo dos tipos de litotipos atravessados, mostrando que a velocidade de penetração é

condicionada à compactidade da rocha, sendo que em alguns litotipos o tempo é inversamente proporcional entre os dois métodos. Isto é observado de forma marcante na litologia JP.

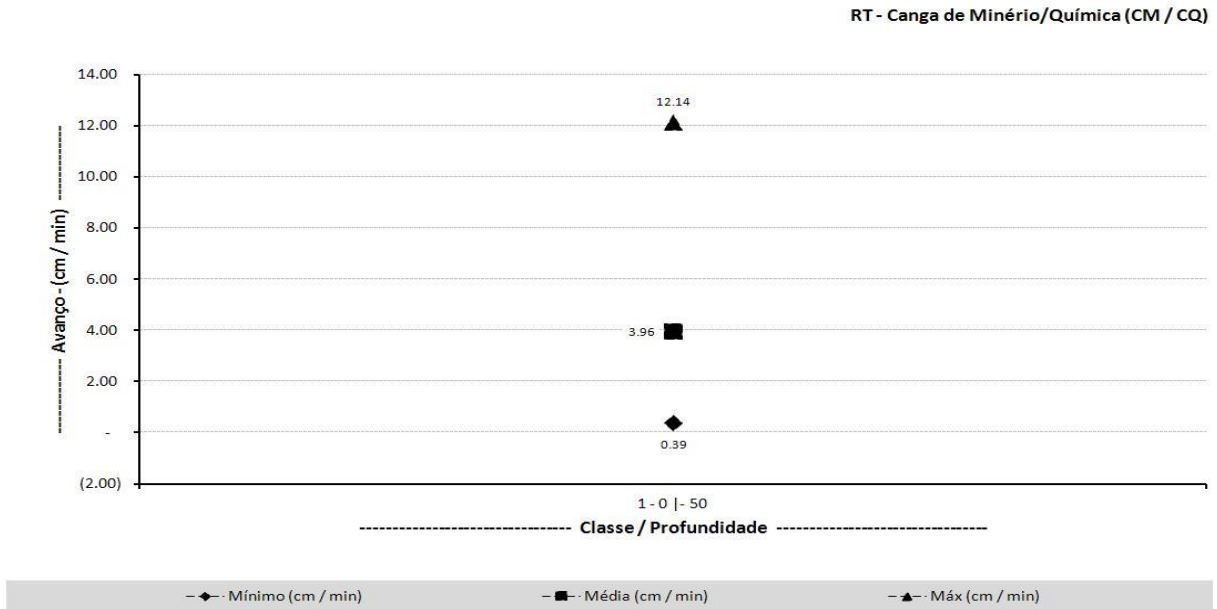


Figura 4.2 – Avanço por profundidade sondagem rotativa testemunhada - Canga de Minério / Química (CM / CQ)

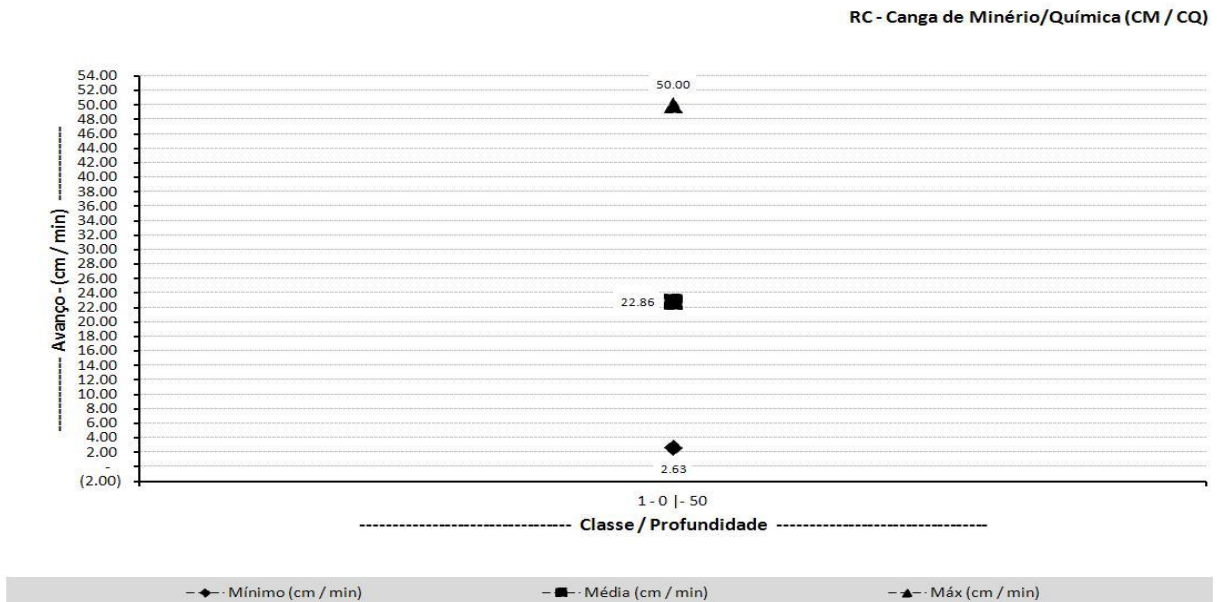


Figura 4.3 – Avanço por profundidades na sondagem rotopercussiva - Canga de Minério / Química (CM / CQ)

No litotipo Canga de Minério e Canga Química, citado (Figuras 4.2 e 4.3) existe uma espessura de rocha com no máximo 40m de profundidade com relação à superfície. Dessa forma, ficou contemplado para essa análise apenas a classe 1 de comparação, na qual a profundidade varia de 0 a 50m.

Na Figura 4.2 para o método de sondagem rotativa testemunhada, o tempo de perfuração (cm/min) foi trabalhado em cima de 245 amostras, totalizando 335m de sondagem na faixa supracitada. Na Figura 4.3, para o método de sondagem rotopercussiva foram coletadas 391 amostras que representam 391m. de sondagem realizada.

A taxa média de avanço pelo método de sondagem rotativa testemunhada representa uma redução de 82% em relação à taxa média de avanço alcançada pela sondagem rotopercussiva, (Figuras 4.2 e 4.3).

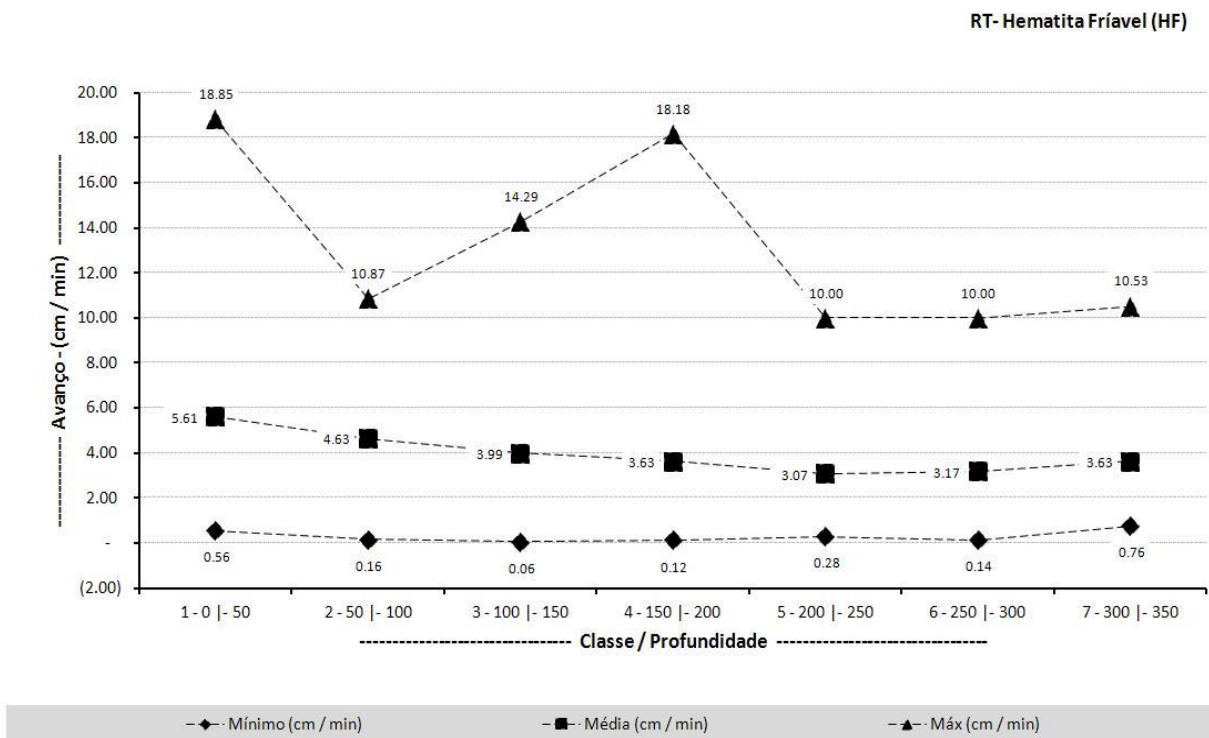


Figura 4.4 – Avanço por profundidade da sondagem rotativa testemunhada – Hematita Friável (HF)

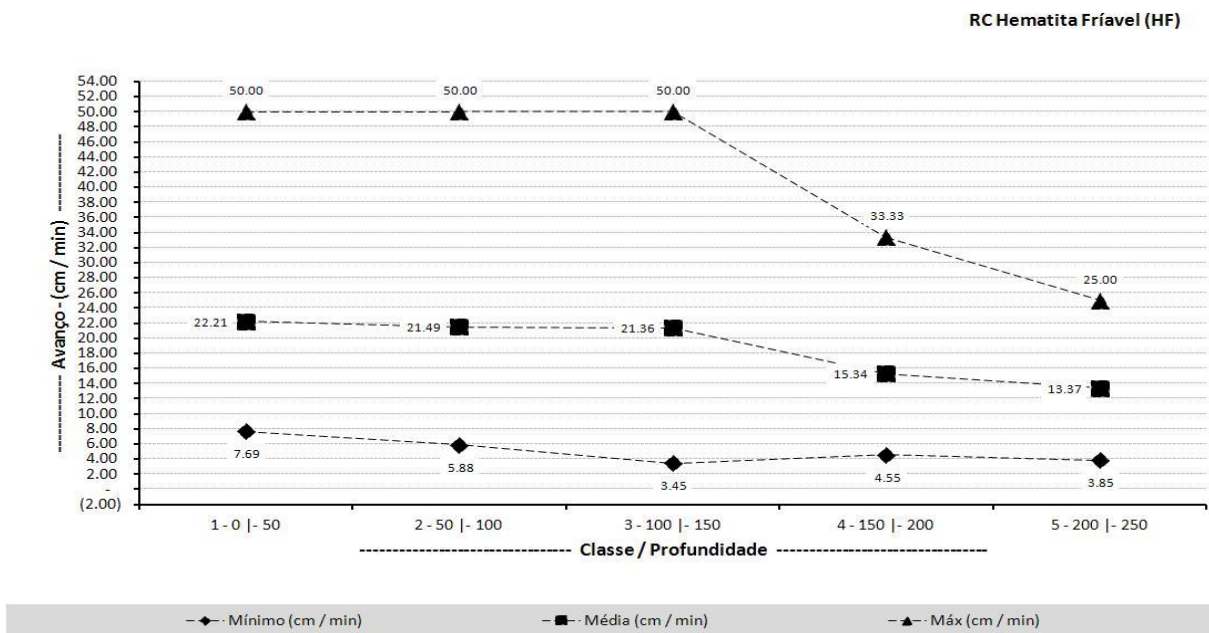


Figura 4.5 – Avanço por profundidade na sondagem rotopercussiva – Hematita Friável (HF)

Para o litotipo Hematita Friável (HF) citado nas Figuras 4.4 e 4.5 a espessura de rocha foi constante ao longo das classes analisadas a cada 50 metros, chegando à profundidade máxima no método rotativo testemunho na classe 7, de 300 a 350 metros.

Na sondagem rotativa testemunhada Figura 4.4 o tempo de avanço (cm/min) foi trabalhado em cima de 2061 amostras, totalizando 3.503 metros de sondagem para todas as faixas de profundidade. Enquanto na sondagem rotopercussiva (Figura 4.5) foram coletadas 2.337 amostras que representam 2.337 metros de sondagem realizada.

A taxa média para as classes 1 a 5 de (0 a 250 metros de profundidade), no método rotativo testemunhado representa uma redução em torno de 80% na taxa de avanço em relação ao método rotopercussivo. De acordo com as Figuras 4.4 e 4.5 a taxa média decai ao longo da profundidade, mas após a 3ª, faixa de 100 a 150m o índice de queda é maior na RC que na RT. Até a 3ª faixa ocorre o contrário.

Na Figura 4.5 os valores máximos obtidos nas classes 2 e 3 demonstram bastante equilíbrio, levando em consideração o número de 44 amostras analisadas para cada faixa. Sendo que na 1ª faixa, embora o avanço máximo de 50cm/min foi obtido em um número de amostras muito inferior aos demais.

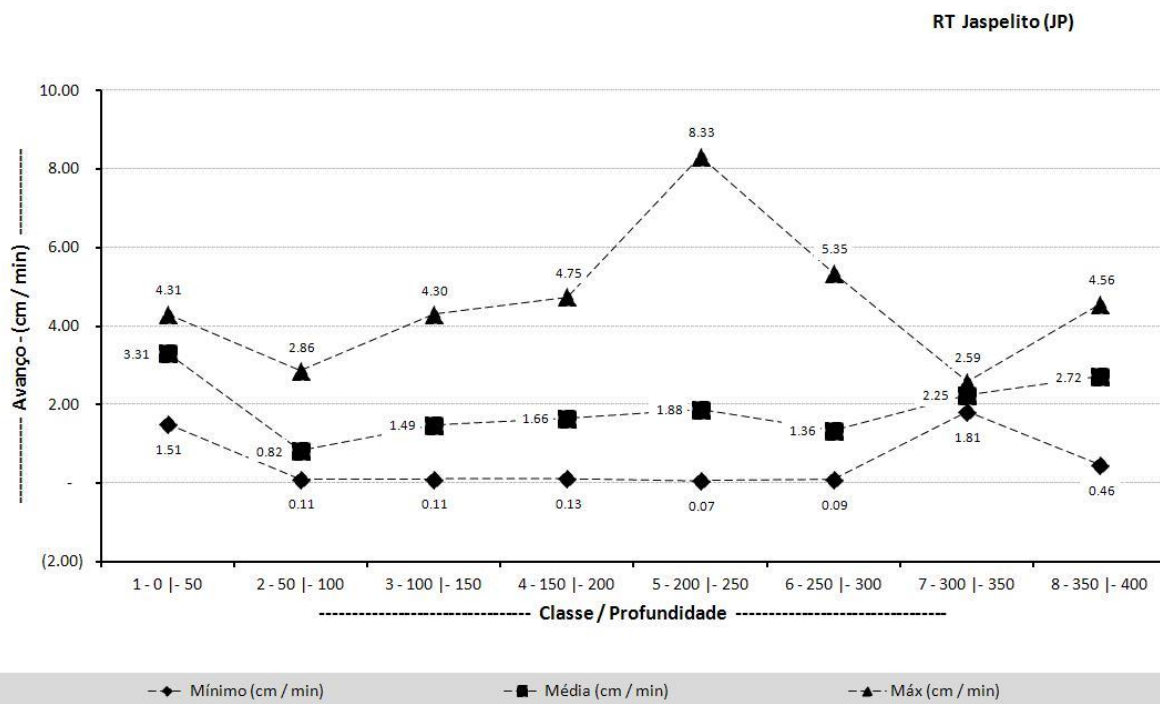


Figura 4.6 – Avanço por profundidade na sondagem rotativa testemunhada – Jaspelito (JP)

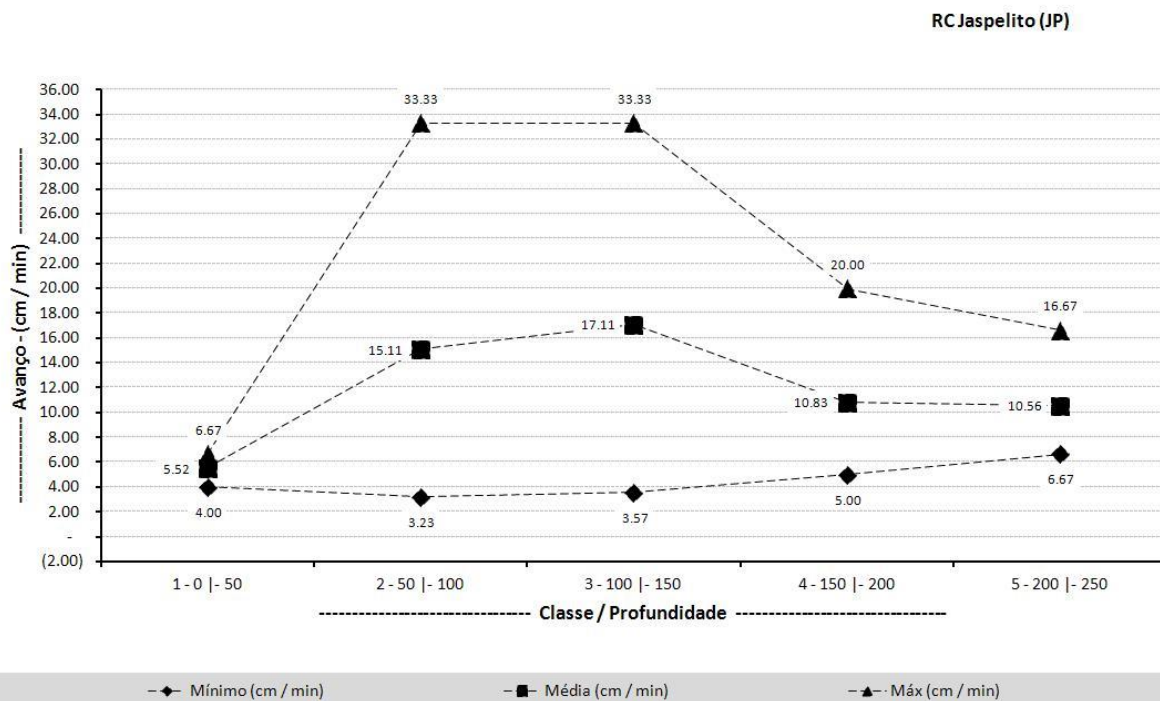


Figura 4.7 – Avanço por profundidade sondagem rotoperçussiva – Jaspelito (JP)

Para o litotipo Jaspelito (JP) citado nas figuras (4.6 e 4.7) a espessura de rocha atravessada ficou entre as classes 1, 2, 3, 4 e 5, variando entre 46 a 224 metros no método de sondagem rotoperfussiva e nas classes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, de 21 até 391 metros no método rotativo testemunhado.

Na sondagem rotativa testemunhada (Figura 4.6) o tempo de avanço de perfuração (cm/min) foi trabalhado em cima de 778 amostras, totalizando 705 metros de sondagem nas faixas supracitada. Para a sondagem rotoperfussiva, foram coletadas 256 amostras que representam 256 metros de sondagem realizada.

A taxa média entre as classes 1 e 5, de (0 a 250 metros de profundidade) no método rotativo testemunhado representa uma redução média de 84% em relação à taxa média de avanço da rotoperfussiva, (Figura 4.6 e 4.7). No método rotativo testemunhado entre a 2ª e 6ª faixa, existe equilíbrio na taxa de perfuração, porém no método de sondagem rotoperfussiva a taxa tende a aumentar de forma significativa às faixas 1, 2 e 3, onde este método mostra sua eficiência, com aumento entre a 2ª e 3ª faixa

O método de sondagem rotoperfussiva em função do fraturamento da rocha tem um desempenho muito melhor do que no método rotativo testemunhado até, porém sua eficiência cai bastante após essa profundidade.

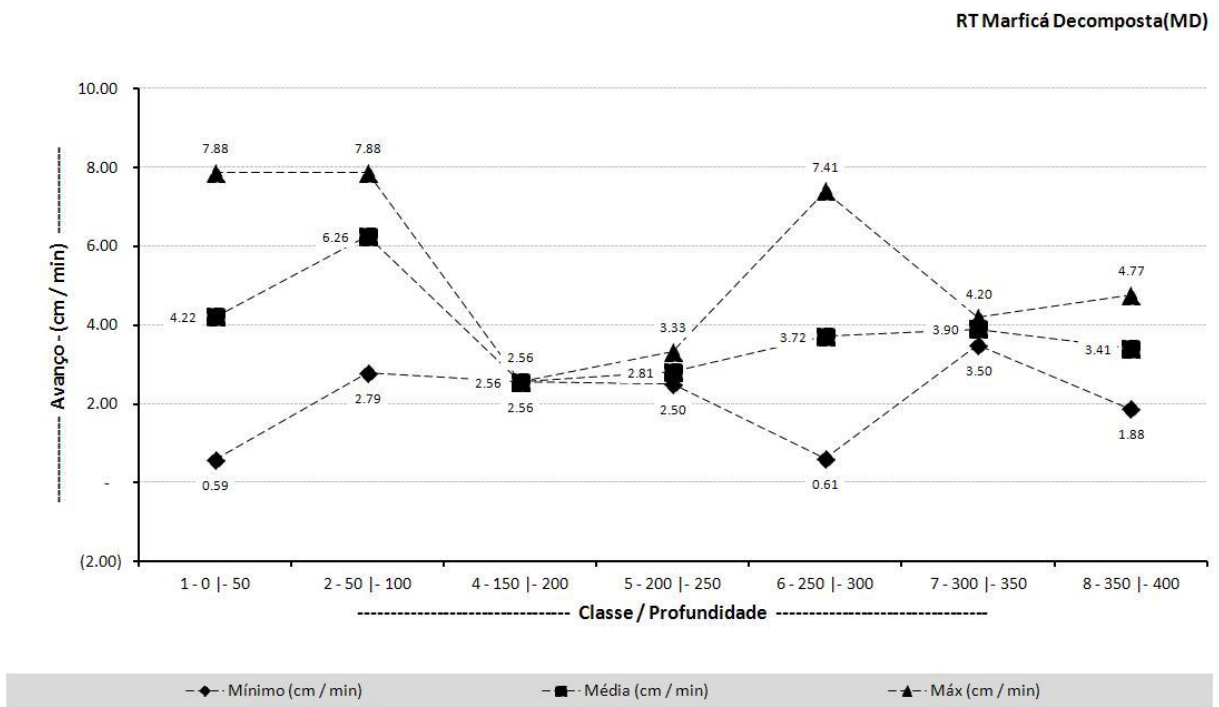


Figura 4.8 – Avanço por profundidade sondagem rotativa testemunhada – Máfica Decomposta (MD)

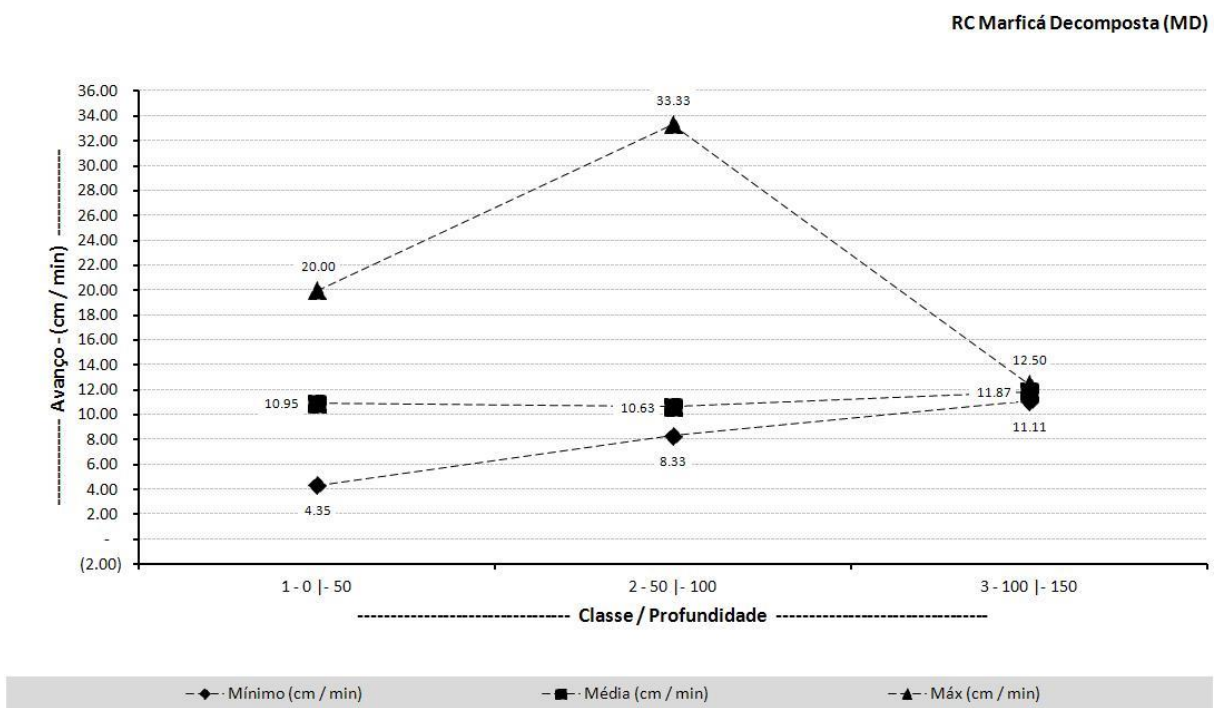


Figura 4.9 – Avanço por profundidade na sondagem rotopercussiva – Máfica Decomposta (MD)

Para o litotipo Máfica Decomposta citado nas Figura 4.8 e 4.9 a espessura de rocha atravessada ficou entre as classes 1, 2 e 3, variando entre 9 a 116 metros no método de sondagem rotopercussiva e nas classes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, de 7 até 386 metros no método rotativos testemunhada.

Na sondagem rotativa testemunhada Figura 4.8 o tempo de perfuração (cm/min) foi trabalhado em cima de 81 amostras, totalizando 139 metros de sondagem. Para sondagem rotopercussiva (Figura 4.9) foram coletadas 116 amostras, que representam 116 metros de sondagem realizada.

A taxa média entre as classes 1 e 3 (de 0 a 150 metros) no método rotativo testemunhado apresentou uma redução de 61% em relação a taxa da rotopercussiva (Figura 4.8 e 4.9). No método sondagem rotopercussiva existe certa equivalência entre as classes 1, 2 e 3, porém no método rotativo testemunhado a média tende a variar entre as classes.

Embora a Máfica Decomposta não exerça resistência durante a perfuração, devido ser um material bastante argiloso, ela oferece um grau muito elevado no risco de trancamento da coluna de perfuração para os dois métodos.

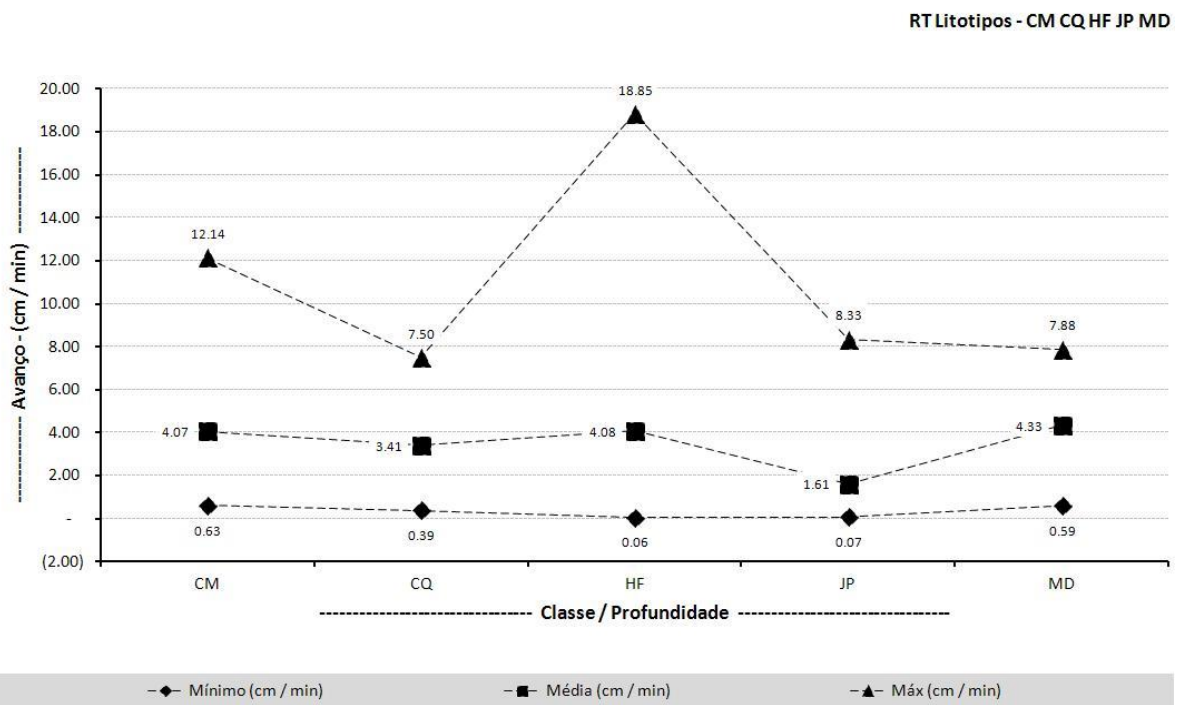


Figura 4.10 – Avanço por litologia na sondagem rotativa testemunhada

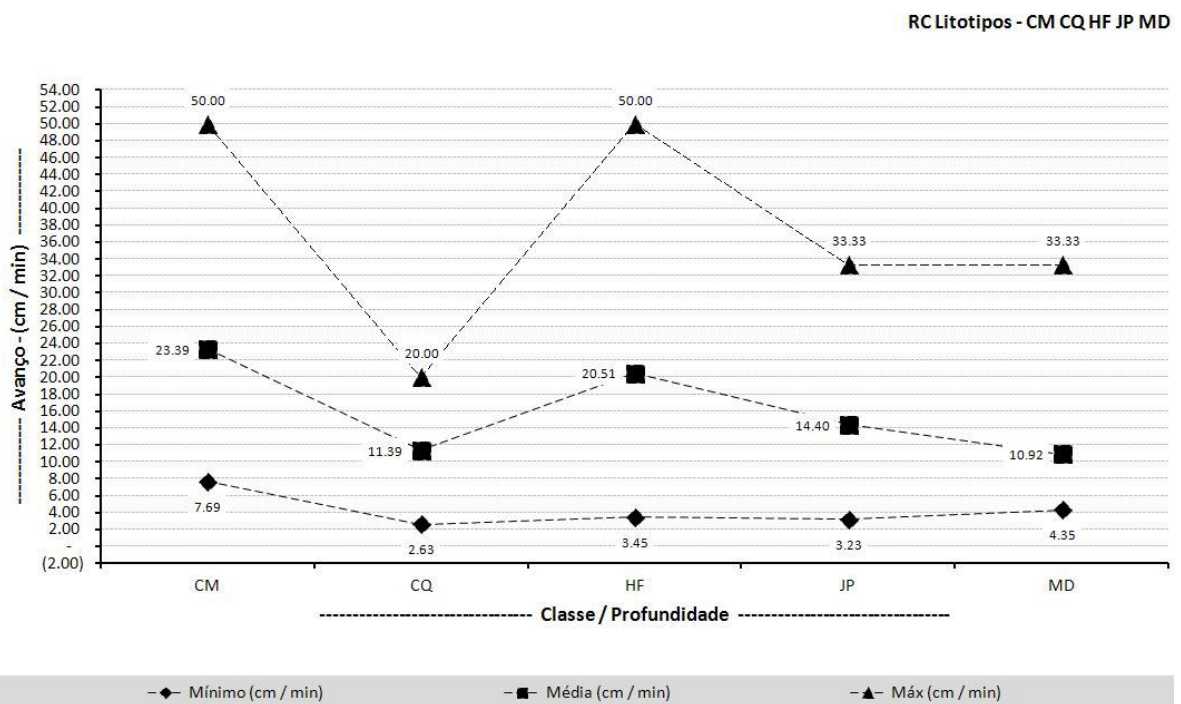


Figura 4.11 – Avanço por litologia na sondagem rotoperçussiva

A taxa de perfuração no método de sondagem rotativa considerando todos os litotipos CM, CQ, HF e MD (Figura 4.10) são muito parecidas, porém no litotipo JP existe uma queda acentuada. Na Figura 4.11 o método rotopercussiva, não exibe o mesmo equilíbrio entre os litotipos atravessados, sendo que na Máfica Decomposta, por ser material de menor compacidade foi constatada a menor média de tempo de perfuração em relação às litologias CM, CQ, HF e JP.

A Figura 4.12 demonstra baixa recuperação ao longo de quase todo trecho perfurado na zona de HF (minério). Na Figura 4.13 entre 25 à 125,00m independente dos litotipos atravessados a recuperação se encontra próximo a massa prevista, porém no HF (minério) a massa recuperada a parti de 125m ultrapassa o previsto reflexo de arriamento das paredes do poço.

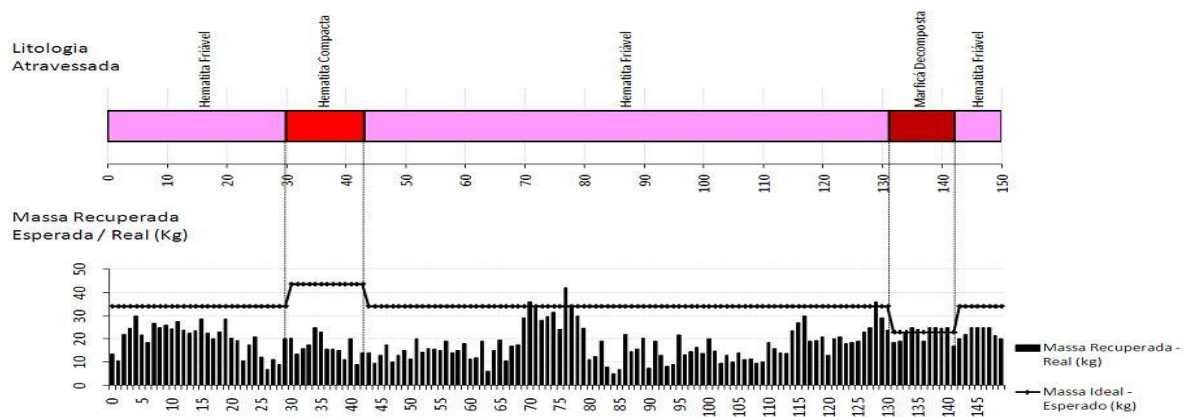


Figura 4.12 – Massa recuperado por intervalo perfurado

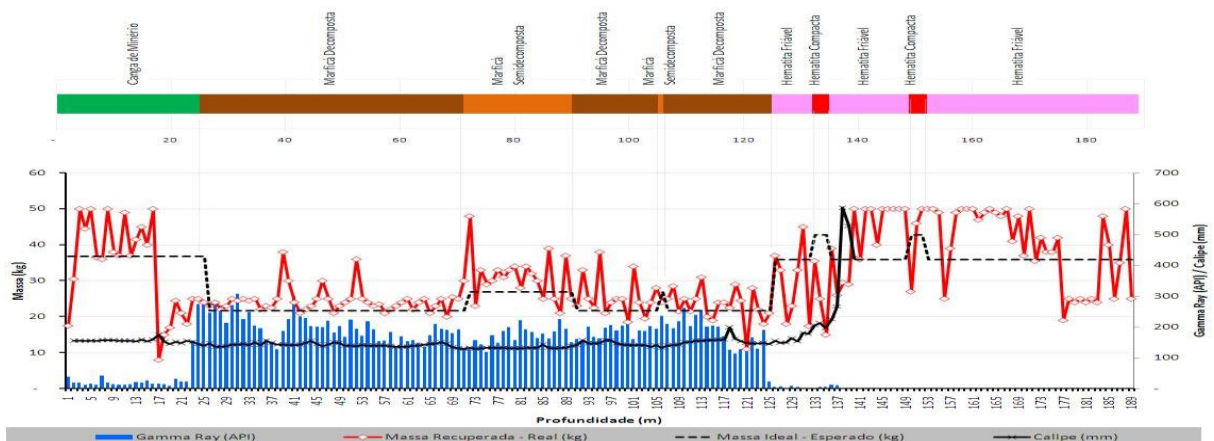


Figura 4.13 – Massa recuperada do furo N4W-RC00004 com Perfilagem Geofísica.

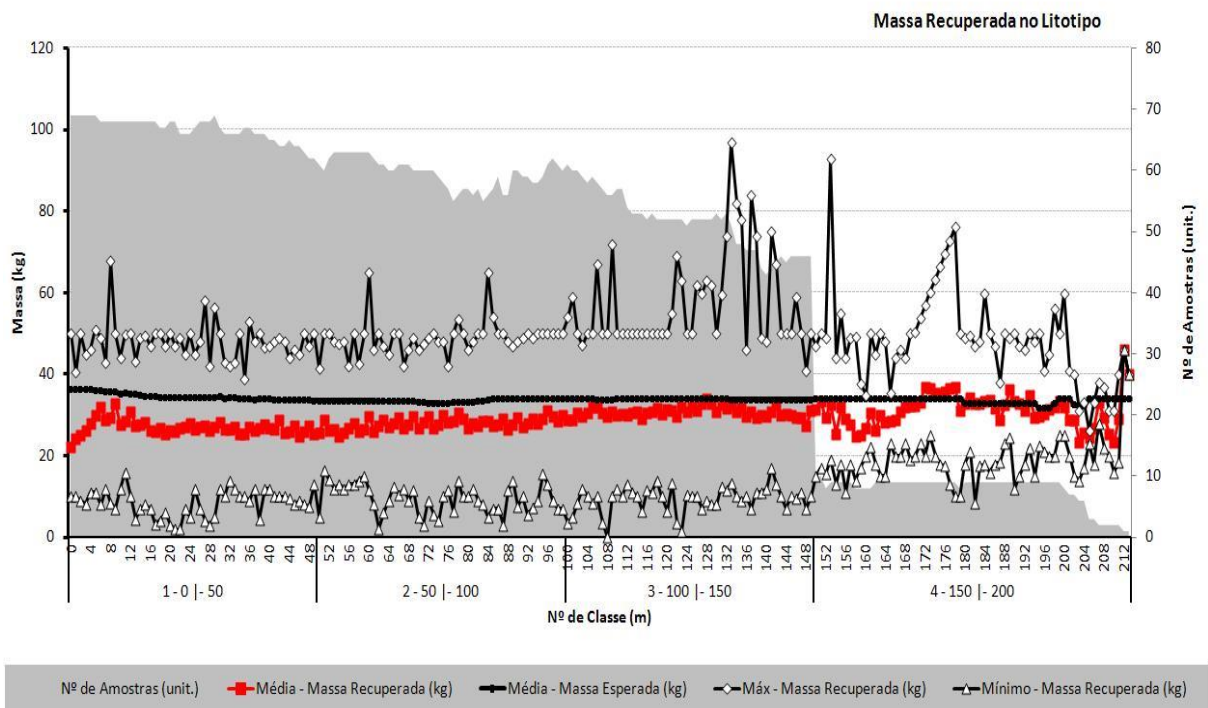


Figura 4.14 – Massa recuperada por furos em diferentes profundidades

A massa ideal desejada (volume contido dentro de cada barrilete a cada manobra x densidade do material) é um indicativo de uma perfuração sem grandes variações da rugosidade das paredes do furo. Inicialmente, esperava-se ter um menor variação entre menor e maior massa obtida para cada intervalo de acordo com o litotipo atravessado. Nota-se que quando se colocam todas as amostras, a curva média de massa se aproxima da curva ideal (Figura 4.14) fator não corroborado quando se gera curvas para cada litotipo.

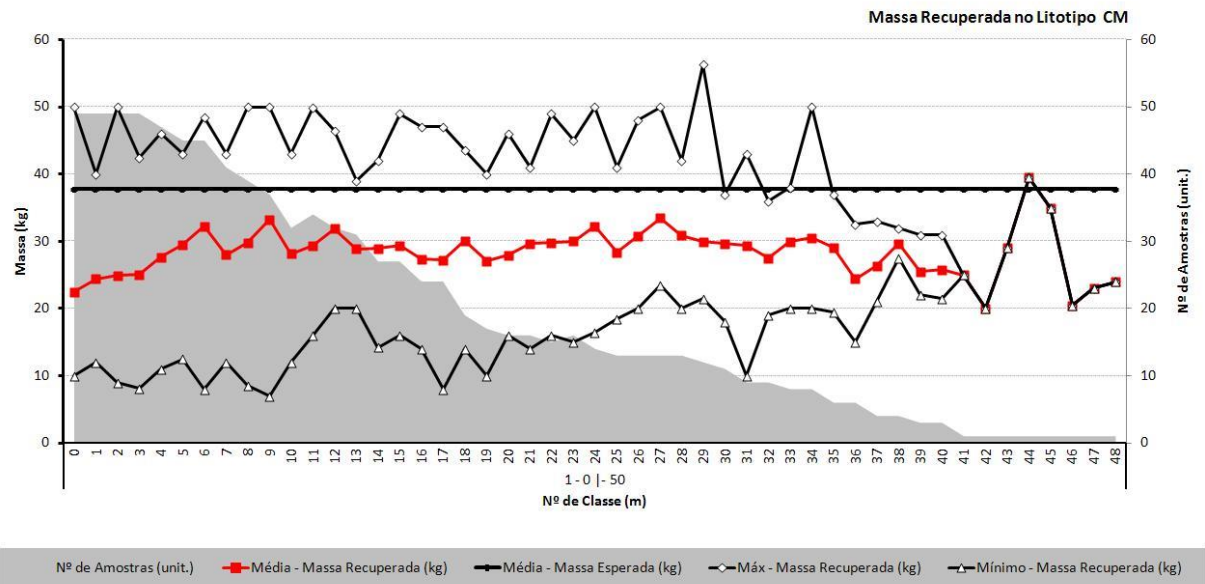


Figura 4.15 – Massa recuperada em diferentes profundidades CM

Na Canga de Minério (Figura 4.15) a massa média recuperada está abaixo do peso ideal desejado, isto pode ser explicado pelo fator da canga ser heterogênea e ter vários contaminantes de menor densidade.

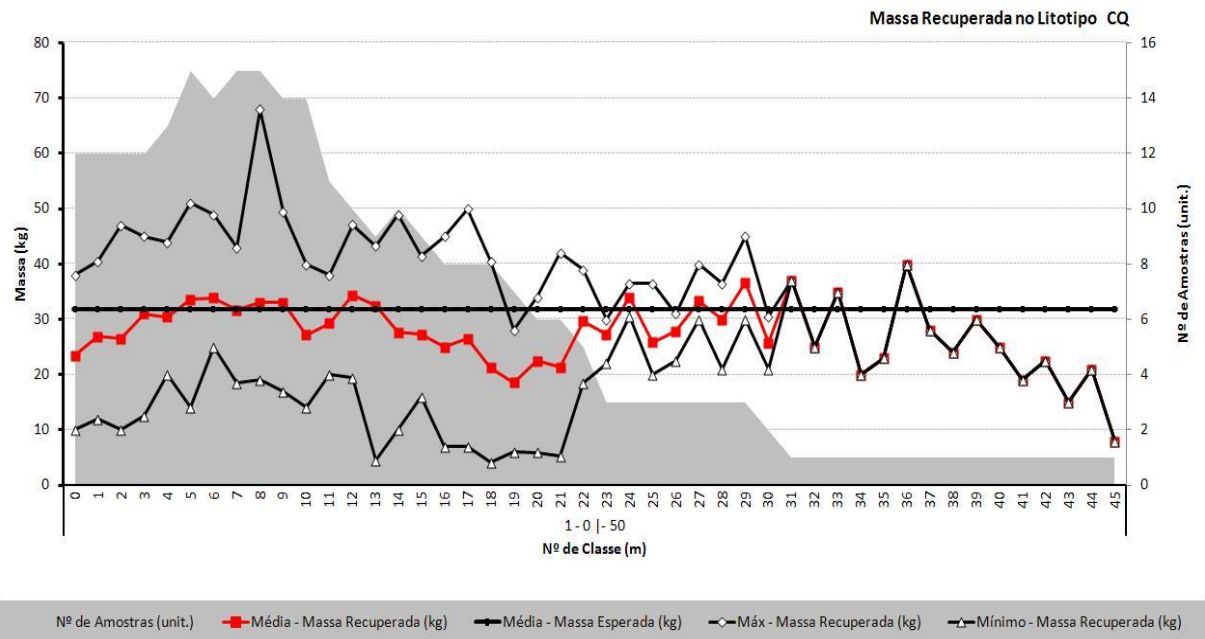


Figura 4.16 – massa recuperada da CQ em diferentes profundidades

Na Canga Química (Figura 4.16) a massa média obtida se aproxima bastante do peso ideal desejado.

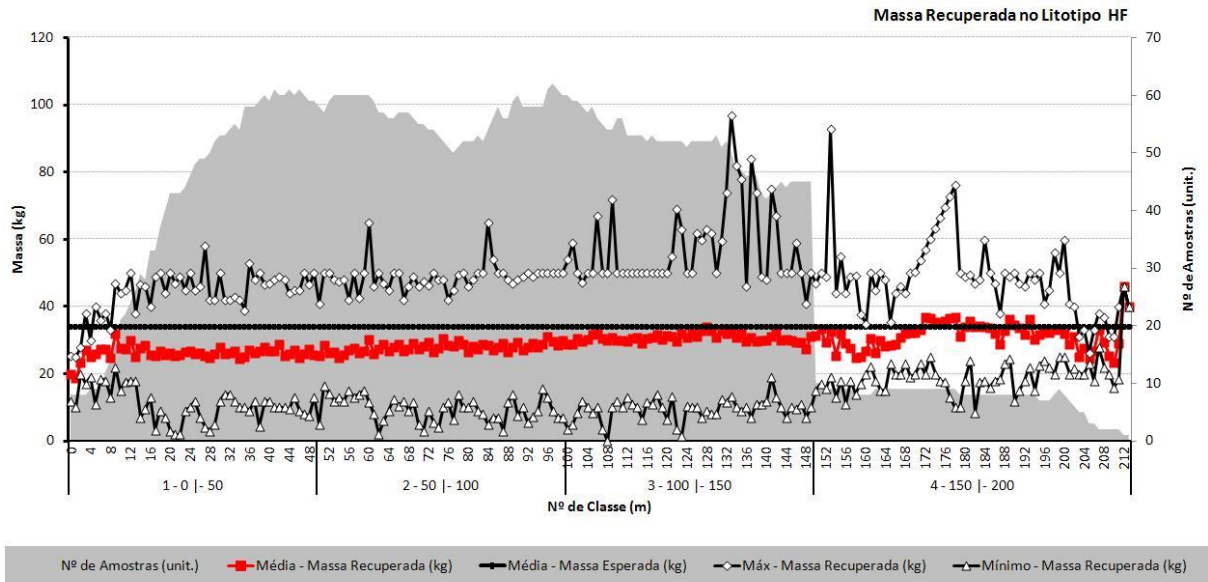


Figura 4.17 – massa recuperada na Hematita Friável em diferentes profundidades

Na Hematita Friável os valores máximos e mínimos de massa recuperada por intervalos de (1m) se afastam bastante do valor de peso médio ideal. A massa média tende a ser um pouco menor que a ideal.

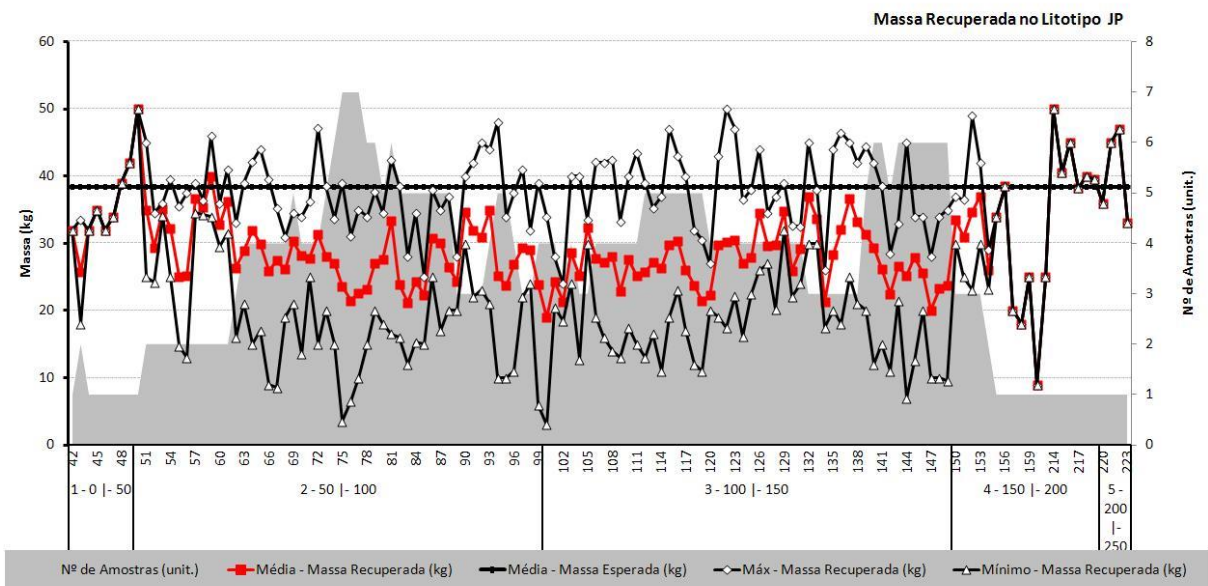


Figura 4.18 – massas recuperada de Jaspelito em diferentes profundidades

No jaspelito os valores máximos de peso obtido por intervalos de (1m) estão próximos da média dos valores de peso médio ideal. A massa média se encontra quase sempre abaixo do ideal.

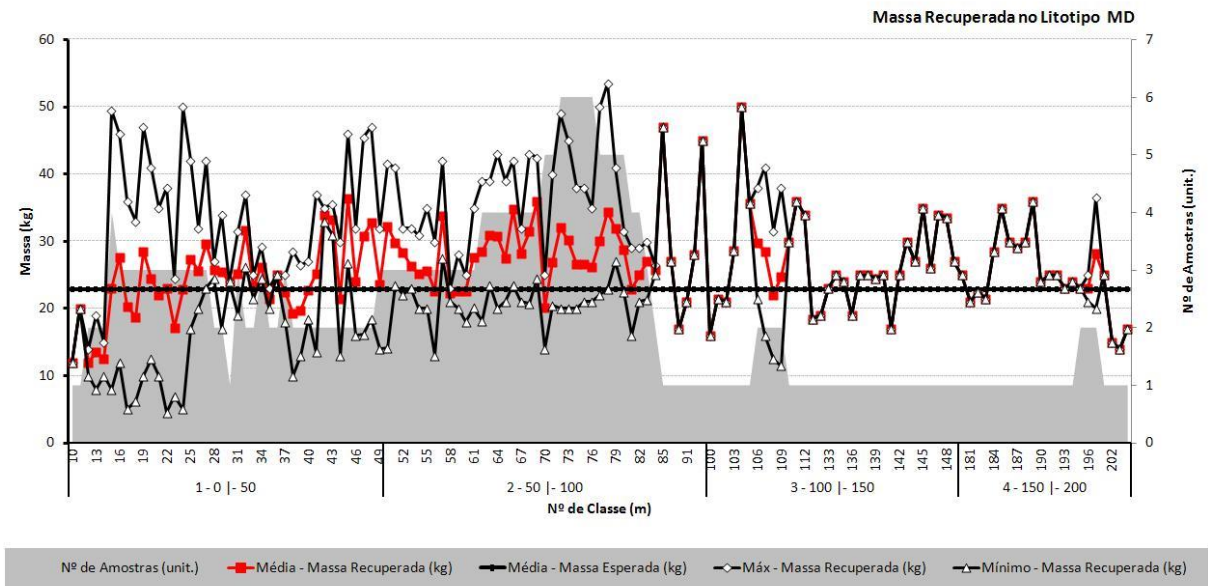


Figura 4.19 – Massa recuperada na Máfica Decomposta em diferentes profundidades

Na máfica decomposta (Figura 4.19), os valores médios de massa recuperada por intervalos de (1m) se aproximam bastante do valor de peso médio ideal. Isto, provavelmente tem haver com a contaminação que acontece durante a perfuração, pois todos os outros materiais atravessados tem densidade superior a da MD.

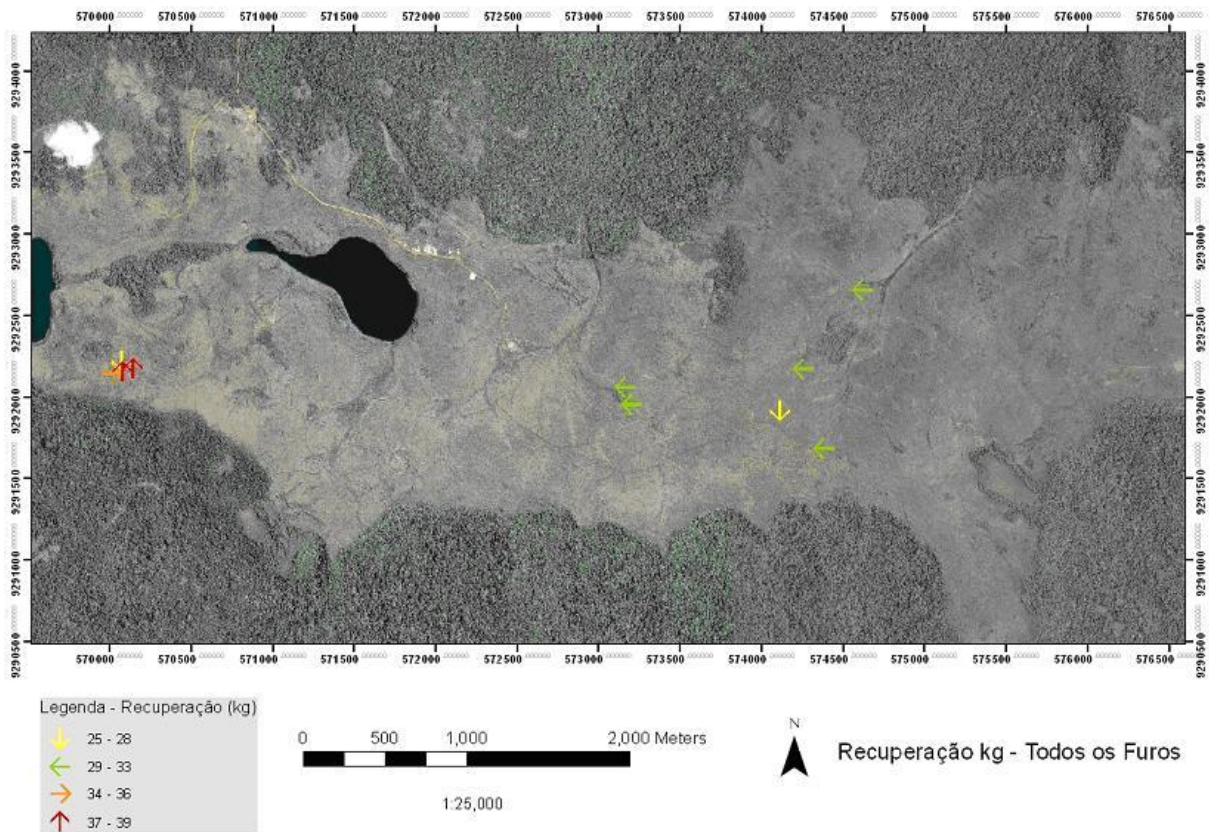


Figura 4.20 – Distribuição espacial dos furos de RC

Os furos mostram que na zona 1 (Figura 4.20), há uma regularidade da massa recuperada no minério (HF), entretanto na zona 2, não se observa o mesmo comportamento

4.2 - CUSTOS

Para efeito de comparação entre os métodos de sondagem rotopercussiva e rotativa testemunhada, toma-se como base uma profundidade equivalente, pois este fator é de fundamental importância na determinação dos custos.

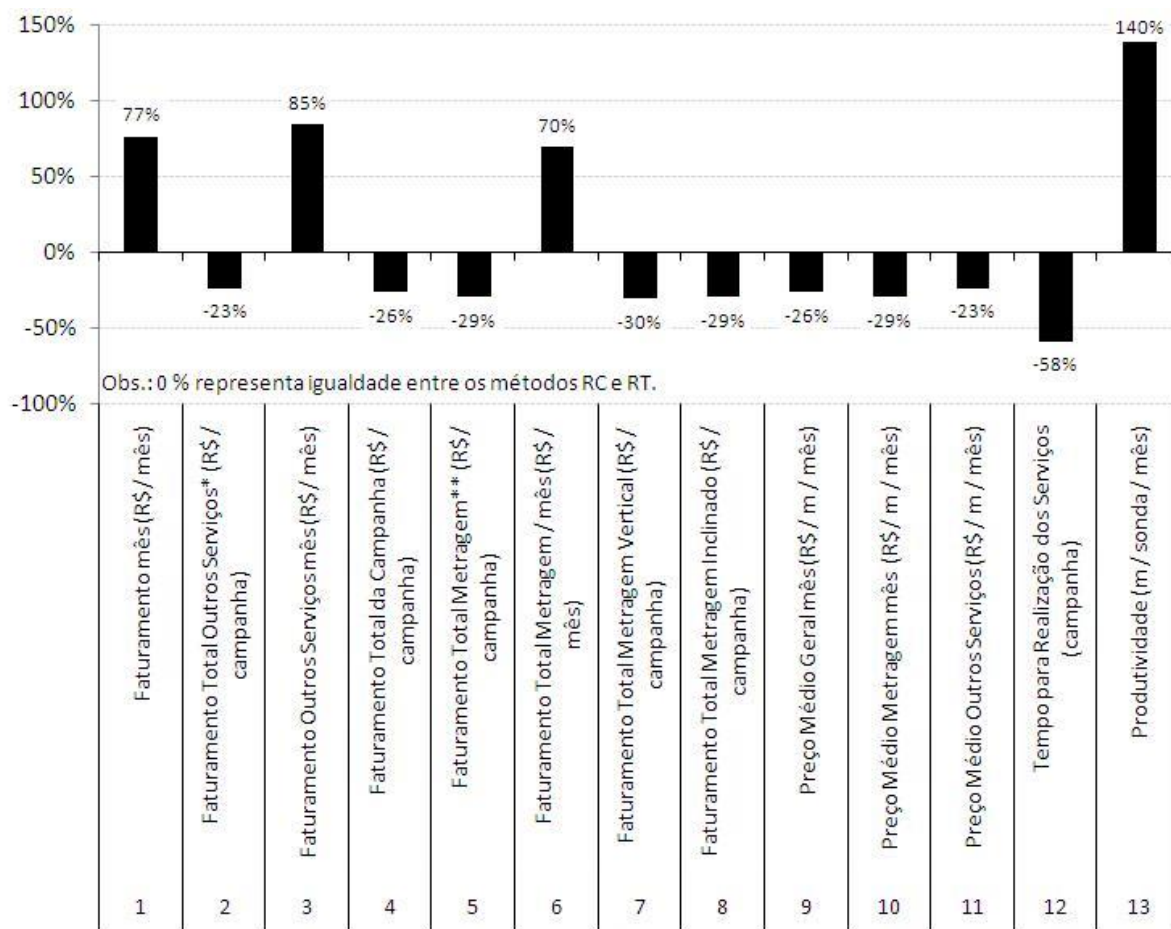


Figura 4.21 – Relação de custo e eficiência entre a sondagem rotoperfussiva/rotativa testemunhada.

Tabela 4.2 – Relação de custo entre os métodos de sondagem Rotativa Testemunhada e Rotoperfussiva

| Item | Categoria | RC/RT (%) | Descrição |
|------|-----------------------------|-----------|---|
| 1 | Faturamento mês (R\$ / mês) | 77% | O faturamento mensal da sondagem rotoperfussiva é maior que o da rotativa testemunha em função de sua maior produtividade, porém não chega a ser proporcionalmente equivalente. |

Continuação >>

| Item | Categoria | RC/RT (%) | Descrição |
|------|---|-----------|---|
| 2 | Faturamento Total Outros Serviços* (R\$ / campanha) | -23% | A sondagem rotopercussiva possui um faturamento menor com relação aos custos referente a “Outros Serviço” na campanha de sondagem. Alguns itens são determinantes tais como: a não utilização de caminhão pipa, encanamento de rede de água, custos com gerador e bombas de água. |
| 3 | Faturamento Outros Serviços mês (R\$ / mês) | 85% | O desembolso mensal para a sondagem rotopercussiva é maior em função de sua maior produtividade, porém no final da campanha o faturamento da sondagem rotopercussiva se torna menor. |
| 4 | Faturamento Total da Campanha (R\$ / campanha) | -26% | O faturamento total de uma campanha de rotopercussiva é menor que a sondagem rotativa levando em consideração os custos de “Outros Serviços” e “Metragem”. |
| 5 | Faturamento Total Metragem** (R\$ / campanha) | -29% | O faturamento total da campanha de sondagem rotopercussiva é menor, levando em consideração apenas as variáveis de custos referente a “Metragem”. Para esse item não está contabilizado os custos indiretos como: revestimento, container, manutenção, mobilização de equipe e etc. |
| | | | Continuação >> |

| Item | Categoria | RC/RT (%) | Descrição |
|------|---|-----------|---|
| 6 | Faturamento Total Metragem / mês (R\$ / mês) | 70% | O faturamento mensal referente aos custos de “Metragem” da sondagem rotoperfussiva é maior que a sondagem rotativa, em função de sua produtividade maior. |
| 7 | Faturamento Total Metragem Vertical (R\$ / campanha) | -30% | O faturamento total referente à metragem em uma programação de furos verticais dentro de uma campanha de sondagem rotoperfussiva é menor que a sondagem rotativa testemunhada. |
| 8 | Faturamento Total Metragem Inclinado (R\$ / campanha) | -29% | O faturamento total referente à metragem em uma programação de furos inclinados dentro de uma campanha de sondagem rotoperfussiva é menor que a sondagem rotativa testemunhada. |
| 9 | Preço Médio Geral mês (R\$ / m / mês) | -26% | O preço médio mensal referente a Metragem e Outros Serviços na sondagem rotoperfussiva é menor que o da rotativa testemunhada. |
| 10 | Preço Médio Metragem mês (R\$ / m / mês) | -29% | O preço médio mensal referente a Metragem e na sondagem rotoperfussiva é menor que o da rotativa testemunhada. |

Continuação >>

| Item | Categoria | RC/RT (%) | Descrição |
|------|---|-----------|---|
| 11 | Preço Médio Outros Serviços (R\$ / m / mês) | -23% | O preço médio mensal de Outros Serviços na sondagem rotopercussiva é menor que o da rotativa testemunhada. |
| 12 | Tempo para Realização dos Serviços (campanha) | -58% | O tempo para realização dos serviços de sondagem rotopercussiva para uma campanha de 13200 metros é menor que o da rotativa testemunhada. |
| 13 | Produtividade (m / sonda / mês) | 140% | A produtividade mensal por sonda do sistema de sondagem rotopercussiva é maior que o da rotativa testemunhada. |

Foram utilizados os mesmos critérios referente a metragem executada, profundidades dos furos (de 0 até 300 m), distancia de deslocamento, inclinação e litologia atravessada para os dois métodos.

Obs.: A taxa apresentada acima reflete valores de planilha de custo, não está trabalha com variáveis de desempenho operacional pontuados nos capítulos anteriores.

(*)_ Outros Serviços - Custos referente a atividades diferentes do processo de perfuração, ex.: Aluguel de container, mobilização de equipamento e equipe, fornecimento de insumos para perfuração e etc.

(**)_ Metragem - Custos referente a perfuração, ex.: Perfuração em uma metragem de 0 a 100, com furo inclinado, no diâmetro 4.5" no litotipo JP.

O método de sondagem rotopercussiva mostrou-se mais eficiente em relação a sondagem rotativa testemunhada no total de furos realizados no mês. Quando se trabalha o mesmo período de horas, tivemos uma metragem realizada maior 140% (Tabela 4.2). O tempo para realizar todos os no método da RC, foi menor 58% em relação ao método rotativo testemunhado.

Durante o tempo da campanha por mês considerando a metragem e preço por metro contratado o desembolso foi 70 % maior em favor da RC, diferente no final da campanha que chega 26% menor (Figura 4.21).

4.3 – SEGURANCA

O método de sondagem rotopercussiva, além de reduzir a quantidade de equipamentos em campo, também utiliza um número bem menor de colaboradores em relação à sondagem rotativa testemunhada, conseqüentemente menor exposição ao risco.

5.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as discussões e considerações finais sobre os trabalhos apresentados nesta dissertação.

5.1.1 - Sondagem rotativa testemunhada

O Equipamento de perfuração é relativamente mais leve (modular), fornecendo um núcleo "sólido" com informação valiosa da rocha (testemunho), geralmente havendo menor possibilidade de contaminação, preservando informações importantes quanto às condições da rocha, mesmos em furos profundos. Entretanto, este método é lento em comparação com o método de perfuração de percussão no intervalo de profundidade equivalente, além de maior custo.

5.1.2 - Sondagem rotopercussiva

O entupimento ao longo do sistema ocasionou muitas vezes a necessidade de retirada do ferramental e retardo na operações de perfuração, além disso, acabou provocando desmoronamento das paredes dos furos. Isso não foi muito raro na rocha friável e bastante reduzido nas formações mais compactas e pouco argilosas (JP e HC). Outro aspecto relacionado com o litotipo atravessado tem a ver com a característica da amostra, uma vez que, o material úmido é extremamente viscoso, já com as amostras secas a pressão de descarga de amostra constantemente limpa toda a linha de passagem de amostra.

5.1.3 - Perfilagem geofísica

Os testes com perfilagem geofísica não forneceram resultados satisfatórios devido à interferência dos revestimentos de PVC (que retorcem em espiral) usados para proteger o equipamento de sondagem geofísica de possíveis desabamentos das paredes do furo. Estes

testes estão funcionando bem para poço aberto (não revestido) ou quando perfilados, dentro das hastes em diâmetro “H”.

Atualmente, a perfilagem geofísica em furos de sondagem tem significativa aplicação na localização e avaliação de recursos minerais. Os registros geofísicos constituem-se numa técnica de amostragem que se torna cada vez mais importante, na medida em que determinadas características físicas de rochas e minerais podem ser observadas *in situ*.

As medidas de densidade de rochas são fundamentais para o cálculo de recursos e reservas e a utilização da perfilagem geofísica gama-gama para medir estes parâmetros constitui uma importante ferramenta para auxiliar os métodos de sondagem, minimizando as incertezas nos valores de tonelagem estimados nos depósitos de minério de ferro.

Os benefícios da utilização desta técnica nas áreas de minério de ferro são inúmeros, sendo o principal deles a avaliação e obtenção da densidade ao longo de todo o furo de sondagem (informação contínua ao longo do furo). Fator que não foi possível devido às dificuldades operacionais e do próprio minério (friável) encontradas pela Vale para a medida direta da densidade nos testemunhos de sondagem rotativa.

A baixa recuperação dos testemunhos na sondagem dificulta bastante o exato posicionamento em profundidade das amostras de sondagem coletadas para análise e comparação com os dados gerados nos perfis gama-gama. Este fator, juntamente com as variações bruscas de caliper, é o que causa os maiores problemas na construção da curva de ajuste e de estimativa.

5.2 - DIFICULDADES ENCONTRADAS NA AQUISIÇÃO DOS DADOS

5.2.1 - Equipe técnica pouco preparada interfere na eficiência

Para enfrentar as dificuldades que ocorrem ao longo da execução de sondagem rotoperussiva e rotativa, seria necessário acompanhamento de profissional, especializado quase que em tempo integral registrando e interagindo com a operação e equipe em campo.

5.2.2 - Arrombamento de poço e variação na recuperação por intervalo

Quando o diâmetro do poço se afasta do diâmetro nominal da broca que perfurou determinado trecho, esse valor é chamado de “arrombamento do poço”. Essa variável teve alta frequência nos furos de RC provocando “rugosidades” nas paredes dos poços e essas irregularidades afetam a qualidade das leituras dos perfis, principalmente os perfis que correm com sapatas de contato junto às paredes dos poços como o perfil gama-gama e gama natural

Isto acontece quando parte do ar comprimido usado na perfuração retorna pela parte externa das hastes realizando a limpeza dos materiais desmoronados que se alojam entre a parede do furo e as hastes. Durante a operação de perfuração (Figura 5.1) a instalação de uma nova haste é feito uma limpeza utilizando todo o ar comprimido do sistema. Este problema tem se agravado quando na realização do furo trigêmeos este tem afastamento de aproximadamente 5,0m (Anexo 1 e 2).



Figura 5.1– Distribuição dos furos de sondagem rotopercussivo e rotativo testemunhado na mesma praça

5.2.3 - Inclinação

É importante salientar que a técnica de perfilagem gama-gama exige que a sonda esteja constantemente em contato com a parede do furo durante a subida, ou seja, no período de medição. O fato dos furos serem inclinados pode ter dificultado o constante atrito da

ferramenta com a parede do furo (o ar utilizado na perfuração tende a escoar sobre uma das paredes do furo, provocando rugosidades por desgaste e remoção de material). Além disso, como a perfuração é feita mediante várias manobras das hastes metálicas com presença do ar, as paredes dos materiais mais friáveis (por exemplo, itabirito friável) podem apresentar irregularidades devido ao constante atrito com a ferramenta de sondagem. Estas irregularidades servem de obstáculo para a descida da ferramenta de perfilagem, prejudicando também o contato entre a sonda e parede do furo na aquisição de dados. As Figura 5.2 e 5.3 ilustram o problema ocasionado devido às irregularidades do furo.

Nota-se, claramente, que a qualidade das estimativas de densidade obtidas por perfilagem depende da manutenção de furos com mínima rugosidade e isto não foi possível na maioria dos furos, as paredes encontravam-se danificadas no momento da perfilagem de fácil comprovação através do registro do Caliper.

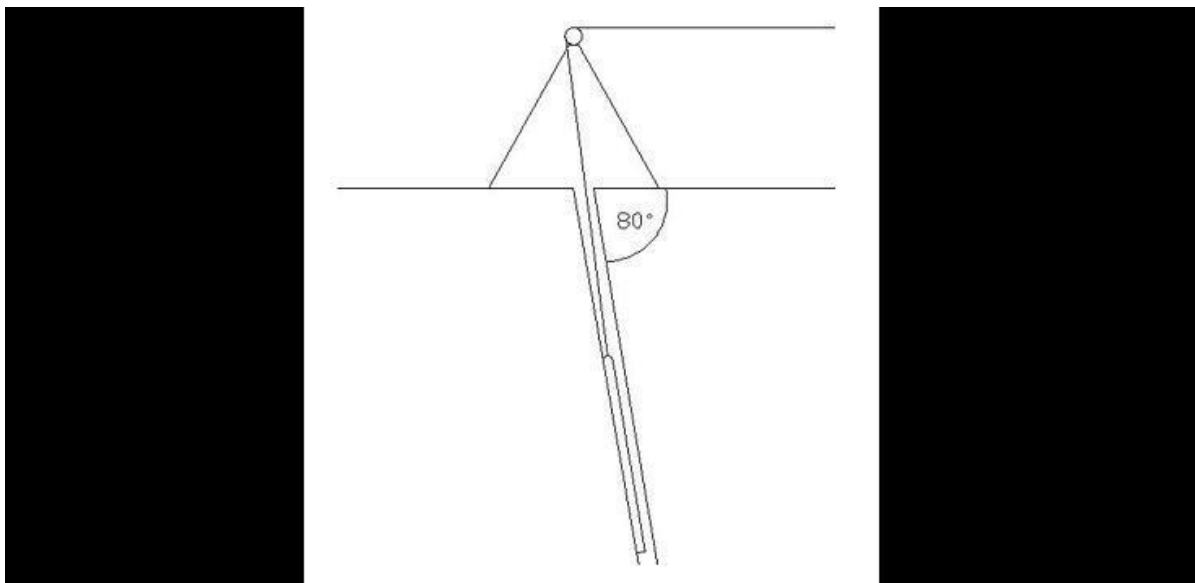


Figura 5.2 - Ferramenta descendo no furo de sondagem, sofrendo atrito com a parede devido à inclinação $< 80^\circ$.

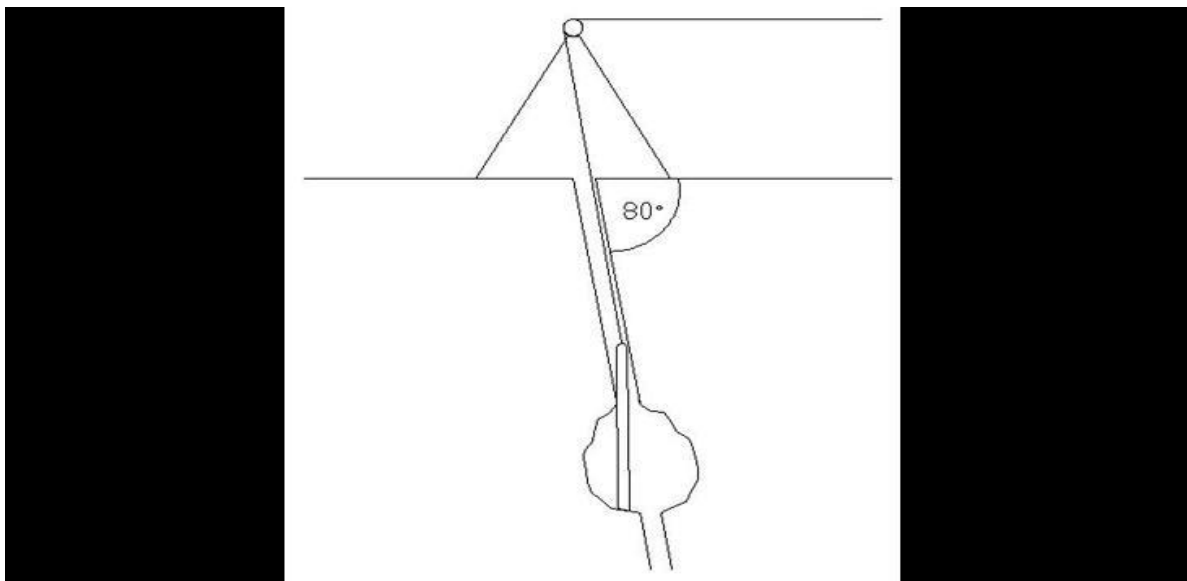


Figura 5.3 - Descida da sonda impedida devido às irregularidades da parede do furo.

5.2.4 - Entupimento da broca

Embora este problema seja menos comum na sondagem rotativa testemunhada, devido ao uso de fluido de perfuração, na sondagem de circulação reversa RC, muitas vezes, quando atravessa argilas que interceptam a formação, acontece entupimento da broca e todo o ferramental tem de ser sacado (Figura 5.4).



Figura 5.4 – Após penetração, vista da broca da sondagem rotopercussiva

5.2.5 - Tempo de espera para a execução da perfilagem gama-gama

Um dos aspectos observado em campo e que viabilizava ou não a perfilagem completa de um furo de sondagem é o tempo entre o término da sondagem e a execução da perfilagem geofísica.

O ideal é que o furo seja perfilado durante o processo de perfuração, ou que a execução da perfilagem seja imediatamente após a conclusão do furo de sonda (furo não revestido). A Gerencia de Exploração Mineral de Ferrosos está desenvolvendo técnica para fazer a perfilagem por dentro do ferramental na sondagem rotativa testemunhada e com isto a profundidade perfilada se aproxime da profundidade sondada, e ainda eliminando quase totalmente o risco de prisão da ferramenta de perfilagem.

A perfilagem de furos já concluídos e selados por longo tempo é arriscada, pois a movimentação da ferramenta de perfilagem, durante a descida, pode causar o deslocamento de material das paredes e este material desmoronar sobre a ferramenta durante a perfilagem, prendendo a sonda dentro do furo.



Figura 5.5 - Descida do cabo da sonda de perfilagem em contato a parede do furo.

Por esta razão, a perfilagem em furos antigos foi executada em duas etapas: primeiramente a ferramenta de densidade era colocada sem fonte radioativa e deslocada até o fundo do furo

para testar a integridade do mesmo (Figura 5.5). Após, recolhia-se a ferramenta, acoplado a fonte e efetuando a perfilagem propriamente dita. Na grande maioria dos furos concluídos a longo tempo, a ferramenta de perfilagem não desceu até o fundo, atingindo menos de 50% da profundidade total do furo. O perfil geofísico obtido, nestes casos, era de baixa qualidade devido às grandes irregularidades das paredes dos furos.

5.2.6 - Os revestimentos de PVC e seus efeitos nos perfis de perfilagem gama-gama

Com o objetivo de preservar as paredes os furos de sondagem foram revestidos com PVC, material que influencia pouco na penetração dos raios gama. Porém, se este revestimento é realizado antes da leitura de caliper não permite a detecção de zonas com maior rugosidade no furo. Além disso o espaço entre o PVC (Figura 5.6) e a rugosidade natural do furo provocou um efeito do PVC que pode ser estudado, também, no campo de calibração.



Figura 5.6 – Vista de planta do espaço entre a parede do furo e o revestimento colocado em uma sondagem rotoperfuração

6.1 CONCLUSÕES

As dificuldades operacionais impediram atingir a meta de 250 metros de profundidade em todos os furos. Aqueles mais profundos de RC foram os iniciados em cotas mais altas, atingindo o lençol em níveis mais profundos. Sugere-se usar a profundidade de 150m como limite para as campanhas de sondagens RC futuras, uma vez que, este valor é próximo da média de profundidade obtida nos testes realizados neste estudo.

Devido ao caráter destrutivo da sondagem rotopercussiva há impossibilidade de analisar fisicamente as amostras em laboratório, pois não haverá uma reprodutibilidade satisfatória. A análise do desempenho da sondagem rotopercussiva em furos profundos mostrou que ocorreram problemas técnicos operacionais que dificultaram a execução destes furos, além disso, o risco de prisão do ferramental aumentou consideravelmente após 150 m.

A variação na recuperação de material na sondagem RC em determinadas profundidades do furo e conseqüentemente aumento ou diminuição da massa recuperada em outros intervalos interferem na qualidade das amostras na análise dos perfis geológicos, para isso, injeção de ar no furo deveria ser mais bem controlada para cada tipo de maciço e para cada profundidade, ou seja, a rocha friável tem sido bastante afetada pela falta deste controle e com isto, há desmoronamentos da parede do furo.

Na execução dos furos gêmeos ou repetição de furo na mesma praça deve haver um afastamento superior a 5 metros entre eles, pois afastamento menor entre os furos ocasionou comunicação no subsolo.

A utilização da perfilagem geofísica (gama-gama) como uma técnica auxiliar nos métodos de sondagem deve ser disseminada, pois obtém dados pontuais dos furos perfilados, já a perfilagem (gama-natural) definir os contatos geológicos e geotécnicos e o uso do *calipe* consegue mapear a integridade das paredes do furo.

A utilização do método de sondagem rotativa diamantada ou rotopercussiva vai depender de algumas variáveis predefinidas para o projeto, tais como: a fase de adensamento de malha, profundidade que se pretende chegar, tipo de testes físico com a amostra que se pretende fazer, o que se pretende gastar. Portanto substituir a sondagem rotativa diamantada por rotopercussiva de circulação reversa pode se muito interessante na fase de pré lavra, para outros casos nem tanto.

6.2 RECOMENDAÇÕES

E por fim, são feitas recomendações para trabalhos futuros.

6.2.1 - Para sondagem rotativa testemunhada:

Verificar sempre a profundidade do furo, tendo cuidado com a sobra da composição antes do término da manobra.

Ao retirar o material recuperado a equipe de sondagem (sondador) deverá registrar o avanço e a recuperação no boletim diário de sondagem.

Para o material perfurado em forma de cunha a recuperação deverá ser medida diretamente na calha.

Atentar no início da manobra, quanto à presença de sujeira e caimento de testemunho.

Não permitir a pescaria de material friável, perfurado e não recuperado na manobra. Considerar como recuperação zerada e solicitar lavagem daquele intervalo retirando o material por injeção de fluido de perfuração nos casos onde há retorno.

Tomar cuidado durante a limpeza do furo, observando a profundidade final, evitando que o material contaminado (sujeira) se torne testemunho.

Melhorar a comunicação e a logística de atendimento ao pessoal da sonda, diminuindo assim, o total de horas improdutivas, além de evitar problemas técnicos motivados pela parada parcial, ou total do equipamento de perfuração.

6.2.2 - Para sondagem rotopercussiva:

Devido ao caráter destrutivo da sondagem rotopercussiva, há impossibilidade de analisar fisicamente as amostras em laboratório. Isto torna imprescindível o uso de métodos auxiliares à perfuração.

A análise do desempenho da sondagem rotopercussiva em furos profundos mostrou que ocorrem problemas técnicos operacionais que dificultam a execução destes furos, além disso, o risco de prisão do ferramental aumenta muito.

A injeção de ar no furo deveria ser mais bem controlada para cada tipo de maciço e para cada profundidade, pois a falta deste controle principalmente na rocha friável faz com que se tenha bastante desmoronamento da parede do furo, conseqüentemente massa por intervalo bastante diferente da ideal.

A baixa recuperação de material em determinadas profundidades do furo e o aumento da massa recuperada em outros intervalos interfere na qualidade das amostras.

Na execução de furos gêmeos e/ou repetição de furo na mesma praça deve haver um afastamento superior a 5 metros entre eles, pois afastamento menor causa comunicação no subsolo entre os furos, provocando perda de ar e conseqüentemente menor retorno de material por intervalo.

Sugere-se usar a profundidade de 150 m como limite para as campanhas de sondagens RC futuras na área de estudo.

Considerar a possibilidade de realizar a sondagem RC com uso sistemático de fluido de perfuração, o que poderia aumentar consideravelmente a qualidade das paredes dos furos. Isto favoreceria muito a perfilagem geofísica.

6.2.3 - Para execução dos trabalhos de Geofísica:

Em relação à aplicação da perfilagem geofísica gama-gama, recomenda-se testar no campo de aferição o uso de revestimento de aço e PVC e estudando todos os fatores que influenciam os dados de perfilagem gama-gama e que, conseqüentemente, causam erros significativos para as estimativas de densidade.

Como forma de mitigar as restrições inerentes do método rotopercussivo, é recomendado o uso de métodos indiretos de aquisição de informações, como perfilagem geofísica e imageamento de furos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, T.; BRAGA, M. A. S.; SILVA, J. C.; SALVADORETTI, P.; WEBBER, T.; COSTA, J. F. C. L.. 2008. **Estimativa de densidades a partir de perfilagem geofísica efetuada em furos de sondagem em jazidas de ferro da Companhia Vale do Rio Doce – Minas Gerais**. V CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO & V CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEO, IBRAM, 16p.

ALMEIDA, T; **A Perfilagem Geofísica Gama-Gama em depósitos de Ferro do Quadrilátero DOQUADRILÁTERO Ferrífero – Uma Ferramenta Para Medições de Densidade de Rochas**. Dissertação de Mestrado, PPGEM – EE – UFRGS, Porto Alegre (RS), 18-48 p.

Araújo O. J. B. & Maia R. G. N. 1991. **Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás**; Subprojeto Recursos Minerais; Folha SB.22-Z-A Serra dos Carajás - Estado do Pará. DNPM/CPRM, Brasília, 136p.

BORSARU, M. 2005. **Selected Topics In Nuclear Geophysics**. CSIRO, Division of Exploration and Mining, PROCEEDINGS OF THE ROMANIAN ACADEMY, SERIES A, VOLUME 6, NUMBER 6, 11 p.

Bourgoyne, A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E., and Young, F.S.: **APPLIED DRILLING ENGINEERING**, SPE Textbook Series, Vol. 2, Richardson, Texas, USA, 1986.

BUTT, A.L. 2001. **Making the Most of Density from Borehole Logging**. ASEG, APLICATION OF GEOPHYSICAL LOGGING TO METALLIFEROUS MINING, 4 p.

BUTT, A.L; FULLAGAR, P.K. 2001. **Stratigraphic Log Interpretation at Tandicoogina**. ASEG, APLICATION OF GEOPHYSICAL LOGGING TO METALLIFEROUS MINING, 21 p.

BVP Engenharia Ltda (2009). **Detalhamento Geotécnico das Rochas Máficas Decompostas e Hematitas Moles da Mina N4E e Correlação com Ensaio Laboratoriais** - VL 707-01-09-E-CA-RT-11-003-00. 23p;

Cordani, U.G., Tassinari, C.C.G., Teixeira, W., Basei, M.A.S., Kawashita, K., 1979, **Evolução Tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos**. II Congresso Geológico Chileno. Arica. Chile, Actas, pp. 137-48.

Dias G. S., Macambira M. J. B., Dall'Agnol R., Soares A. D. V., Barros C. E. M. 1996. **Datação de zircões de sill de metagabro**: Comprovação da idade arqueana da Formação Águas Claras, Carajás, Pará. Simp. Geol. Amaz., V, Belém, Soc. Bras. de Geol. , Bol. Res. Exp., p. 376–379.

DOCEGEO—Rio Doce Geologia e Mineração S.A. (1988) **Província Mineral de Carajás. Litoestratigrafia e principais depósitos minerais**. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Anexo aos Anais, 165 pp.

Faraco M. T. L., Marinho P. A. C., Vale A. G., Costa E. J. S., Maia R. G. N., Ferreira A. L., Valente C. R., Lacerda Filho J. V., Moreton L. C., Camargo M. A., Vasconcelos A. M., Oliveira M., Oliveira I. W. B., Abreu Filho W. A., Gomes I. P. 2004. Folha SB.22 - Araguaia. In: Schobbenhaus C., Gonçalves J. H., Santos J. O. S., Abram M. B., Leão Neto R., Matos G. M. M., Vidotti R. M., Ramos M. A. B., Jesus J. D. A. de. (eds.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas**. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM; Gibbs A. K., Wirth K. R., Hirata W. K., Olszewski Jr. W. J. 1986. Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. *Rev. Bras. Geoc.* 16:201–211.

Gibbs A. K., Wirth K. R., Hirata W. K., Olszewski Jr. W. J. 1986. **Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás**. *Rev. Bras. Geoc.* 16:201–211;

Hair Jr, J.F.; Anderson, R.E., Tatham, R.L.; Black, W.C. **ANÁLISE MULTIVARIADA DE DADOS**, 5ª Edição, Bookman Companhia Editora, 2005.

HART'S E&P. 2002. **Logging history rich with innovation**. IN WWW.EANDPNET.COM, P. 52-55.

HEARST, J.R. & NELSON, P.H. & PAILLETT, F.L. 2000. **Well Logging for Physical** Hearst, J.R.; Nelson, P.H.; Paillet, F.L. **WELL LOGGING FOR PHYSICAL PROPERTIES**, 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2000.

Herrman, C. **MANUAL DE PERFURAÇÃO DE ROCHA**. Ao Livro Técnico S.A., 1972.

Huhn S. R. B., Santos A. B. S., Amaral A. F., Ledsham E. J., Gouvêa J. L., Martins L. P., Montalvão R. G. M., Costa V. G. 1988. **O terreno granito-greenstone da região de Rio Maria, Sul do Pará**. *Congr. Bras. Geol.*, XXXV, Belém, Soc. Bras. Geol., Anais....., p. 1438–1452.

Inventário de Minério de Ferro, Província Mineral de Carajás DIPM-VALE, 2007. Relatório Interno.

Lindenmayer ZG, Ronchi LH, Laux JH (1998) **Geologia e geoquímica da mineralização de Cu-Au primária da mina de Au do Igarapé Bahia, Serra dos Carajás**. *Rev Bras Geociênc* 28(3):257–268.

Lobato LM, Figueiredo e Silva RC, Rosiere CA, Zucchetti M, Baars FJ, Pimentel M, Rios FJ, Seoane JCS and Monteiro AM, 2005 - **Hydrothermal Origin for the Iron Mineralisation, Carajas Province, Para State, Brazil**: in Iron Ore 2005 Conference, Perth, WA, September 19-20, 2005 The AusIMM, Melbourne Publication Series 8 pp. 99-110

Macambira J.B., Ramos J.F.F., Assis J.F.P., Figueiras A.J.M. 1990. **Projeto Serra Norte. Conv. Seplan / DOCEGEO / UFPA. Projeto Pojuca. Convenio DNPM / DOCEGEO / UFPA. Relatório final**. 150 paginas. Inédito.

Macambira M. J. B., Lancelot J (1996) **Time constraints of the Archean Rio Maria crust, Southeastern Amazonian Craton, Brazil.** *Int Geol Rev* 38:1134–1142.

Machado N, Lindenmayer ZG, Krogh TE, Lindenmayer D (1991) **U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil.** *Precambrian Res* 49:329–354.

Maldonado, A. F. (2005). **Caracterização das estruturas geológicas e estimativa da resistência ao cisalhamento das descontinuidades na mineração de cobre de Tintaya, Peru.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, PP 83-104.

Maranhão, R. J. L., **INTRODUÇÃO À PESQUISA MINERAL.** Imprensa Universitária, Fortaleza, 1989.

Meireles E. M., Hirata W. K., Amaral A. F., Medeiros Filho C. A., Gato W. C. 1984. **Geologia das Folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral de Carajás, Estado do Pará.** *Anais XXXI Cong. Bras. Geol.*, Rio de Janeiro, S, 2164-2174.

Mellito KM, Tassinari CCG (1998) **Aplicação do método Rb-Sr e Pb-Pb à evolução da mineralização cuprífera do depósito de Salobo 3 α , Província Mineral de Carajás, Pará.** In: *Cong Bras Geol 40, Proceedings, Belo Horizonte, SBG*, p 119. NERY, G.G. 2003. **Perfil de densidade.** NOTAS DE AULA, 8 p.

Nogueira A. C. R., Truckenbrod W., Costa J. B. S., Pinheiro R. V. L. 1994. **Análise faciológica e estrutural da Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás.** *Simp. de Geol. da Amaz., IV, Belém, Soc. Bras. Geol.*, Resumos Expandidos, p363–364.

Nogueira A. C. R., Truckenbrod W., Pinheiro R. V. L. 2000. **Storm and tide-dominated siliciclastic deposits of the Archean Águas Claras Formation, Serra dos Carajás, Brazil.** *Inter. Geol. Congr., 31st, Rio de Janeiro, Soc. Bras. Geol.*, Abstract volume (CD-ROM).

Olszewski W. J., Wirth K. R., Gibbs A. K., Gaudette H. E. 1989. **The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks, Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting.** *Prec. Res.*, 42:229–254.

Pidgeon R. T., Macambira M. J. B., Lafon J. M. 2000. **Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from enderbite from the Pium Complex, Carajás province, Brazil: Evidence for ages of granulite facies metamorphism and protolith of the enderbite.** *Chemical Geology*, 166:157–171.

Pimentel M. M. & Machado N. 1994. **Geocronologia U-Pb dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará.** *Cong. Bras. Geol.* 38, *Proceedings*, SBG, Camboriú, 2:390–391.

Pinheiro R. V. L. & Holdsworth R. E. 2000. **Evolução tectonoestratigráfica dos Sistemas Transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Craton Amazônico, Pará.** *Rev. Bras. Geoc.* 30(4): 597-606.

Rodrigues E. S., Lafon J. M., Scheller T. 1992. **Geocronologia Pb-Pb da Província Mineral de Carajás: Primeiros resultados.** *Congr. Bras. Geol.* 37, Boletim de resumos, SBG, São Paulo, 2:183–184.

Rosiere, C. A., Baars, F. J., Soane J. C. S., Lobato, L. M., da Silva, L. L., Cortez de Souza, S. R., Mendes, G. E., 2005, *Structure and iron mineralization of the Carajas Province, in Iron Ore* 2005, p.56-59

Santos A. dos, Pena Filho J. I. de C., Araújo E. S., Souza E. C. de, João X. da S. J., Ricci P. dos S. F., Amaral J. A. F. do, Araújo O. J. B. de, Maia R. G. N., Rezende N. das G. de A. da M., Paula M. L. R. de, Santos G. dos, Argolo T. K. C. de. 2000. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Xinguara**, Folha SB.22-Z-C. Estado do Pará. Escala 1:250.000. *Org.* Santos A. dos, Pena Filho J. I. de C. – Brasília: CPRM, 2000. ...1 CD-ROM.

Santos. G.J.I et al Endo I.– **Avaliação de Recursos de Minério de Ferro Jazida de Serra Sul- Alvo S11- Corpos C e D, Pará, Brazil**, Setembro, 2008, p.: 24-31. Relatório Interno.
SCOTT, J.H. 1977. **Borehole Compensation Algorithms For A Small Diameter, Dual-Detector Density Well-Logging Probe.** SPLWA EIGHTTEENTH ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, JUNE 5-8, 17 p.

Seoane J.C.S.& Baars F.J.2001. **Selecting exploration targets in Carajás Mineral Province - a review of the geology, deposits, models and current practices.** Consulting report. Roots Rock Ltda. Belo Horizonte.

Souza SRB, Macambira MJB, Scheller T (1996) **Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaúnas (Serra dos Carajás, PA);** implicações estratigráficas: V Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, 1996, SBG, pp 380–382.

Tassinari, C.C.G., 1996, **O Mapa Geocronológico do Craton Amazônico no Brasil: Revisão dos Dados Isotópicos.** São Paulo, (Tese de Livre Docência) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Pp. 139.

TEIXEIRA, W. TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (2003). **Decifrando a terra.** Editora Nacional, São Paulo: Ed 2009, p 195

Tolbert GE, Tremaine JW, Melcher GC, Gomes CB (1971) **The recently discovered Serra dos Carajás iron deposit, northern Brazil.** *Econ Geol* 66:985–994

Trendall AF, Basei MAS, Laeter JR, Nelson DR (1998) **SHRIMP zircon U-Pb constraints on the age of the Carajás formation, Grão Pará Group, Amazon Craton.** *J South Am Earth Sci* 11(3):265–277.

Vasquez L.V., Rosa-Costa L.R., Silva C.G., Ricci P.F., Barbosa J.O., Klein E.L., Lopes E.S., Macambira E.B., Chaves C.L., Carvalho J.M., Oliveira J.G., Anjos G.C., Silva H.R. 2008. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas - SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará.** Organizadores, Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.

Vieira, M.B.H. **Caracterização mineralógica e textural de pellet feed e sinter feed de Serra Sul/Carajás**. Relatório Técnico, CVRD, 2004.

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

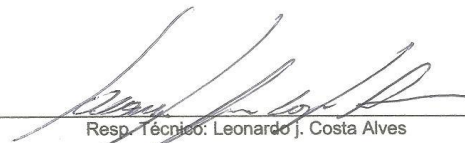
Wirth KR, Gibbs AK, Olszewski WJ Jr (1986). **U-Pb ages of zircons from the Grão Pará and Serra dos Carajás granite**, Pará, Brazil. Rev Bras Geociênc 16:195–20.

ANEXO 1

MEMORIAL DESCRITIVO IMPLANTAÇÃO MARCOS DE APOIO A PROSPCCÇÃO 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 arvore 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.**



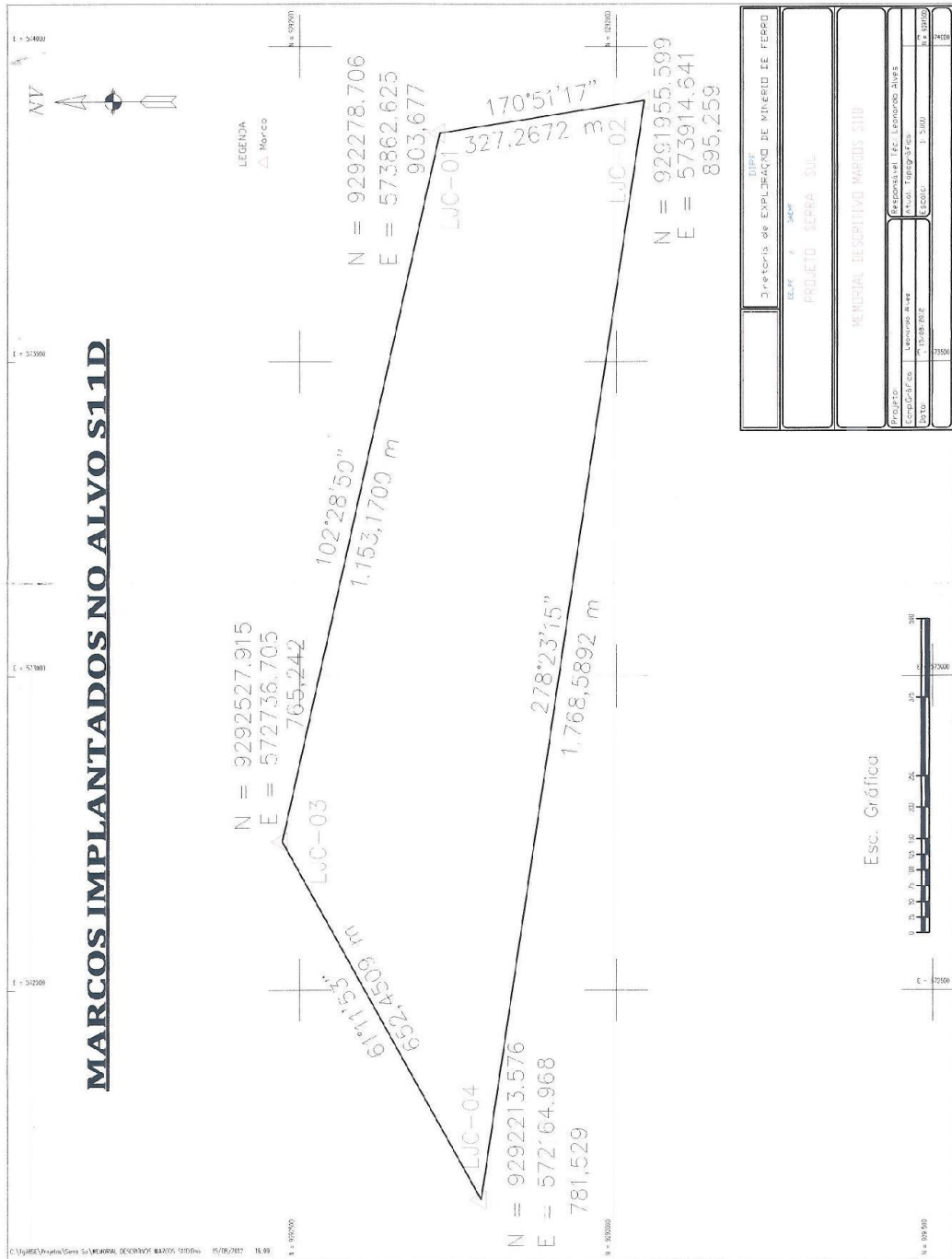
Resp. Técnico: Leonardo J. Costa Alves

PROFISSAO: Supervisor de Agrimensura.

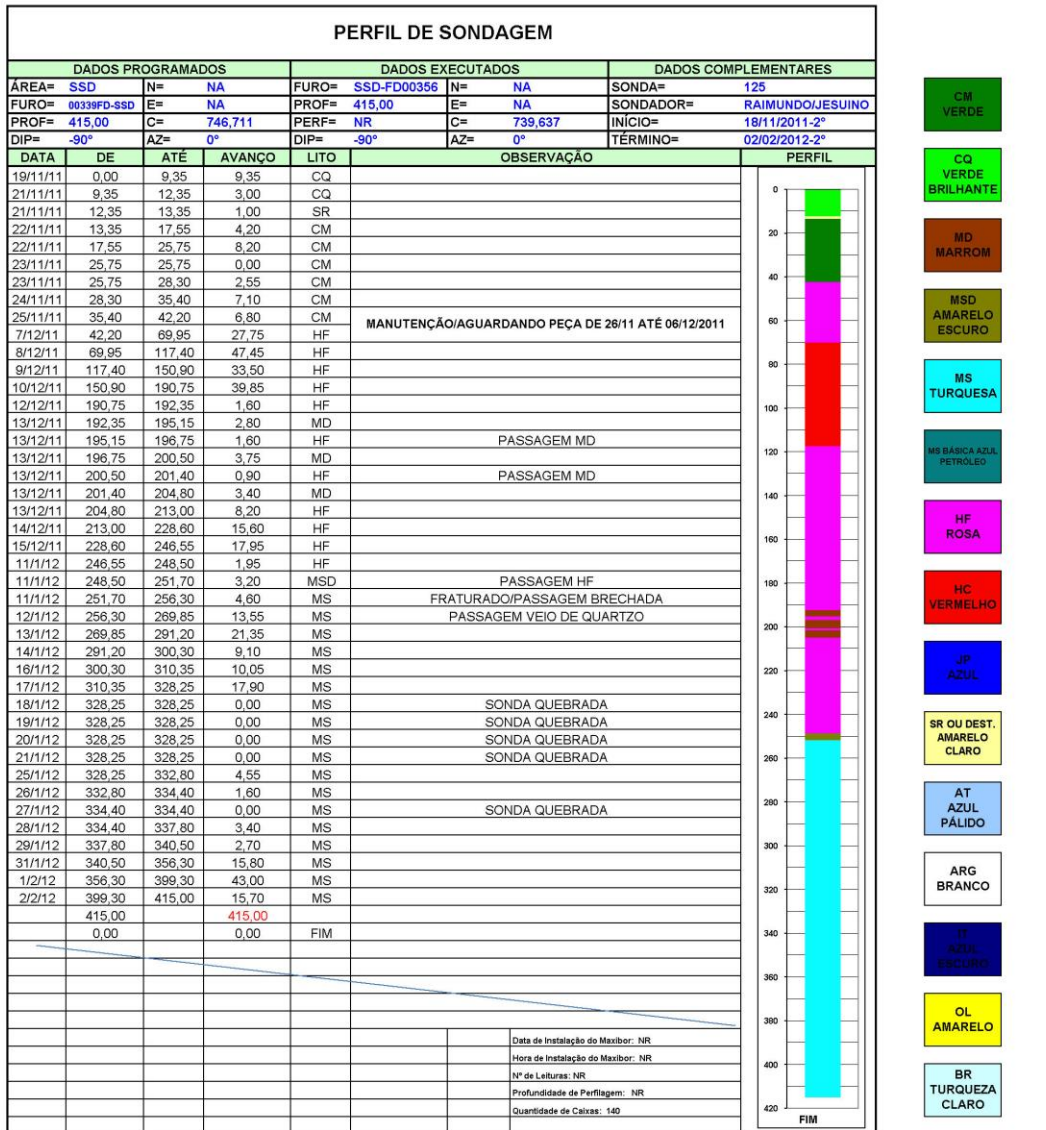
CREA -10023 TD/PA

Leonardo João Costa Alves
Supervisor de Topografia
CREA Nº 10.023 TD

ANEXO 2



ANEXO 3



- CQ VERDE
- CQ VERDE BRILHANTE
- MD MARROM
- MSD AMARELO ESCURO
- MS TURQUESA
- MS BARRA 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

ANEXO 5 (FRENTE)



Relatório Diário de Sondagem

| | | | | | |
|-------|---------------|-------|----------|------|-----|
| FURO | 650-R.C.00022 | DATA | 17/11/11 | AZ° | - |
| SONDA | 403 | TURNO | 2ª | DIP° | 90° |

CLIENTE VALF

PROJETO S. Sul

APOIO _____

| INTERVALO | | | Rec(%) | Litologia | Martelo | Material | | | Obs. |
|-----------|-------|--------|--------|-----------|---------|----------|------------|---------|------|
| De | Até | Peso | | | | Diâmetro | Tempo(Min) | N° Saco | |
| 0,00 | 1,00 | 10,000 | | | | 5" | 3 | ↓ | |
| 1,00 | 2,00 | 12,000 | | | | " | 4 | ↓ | |
| 2,00 | 3,00 | 13,000 | | | | " | 4 | ↓ | |
| 3,00 | 4,00 | 12,000 | | | | " | 5 | ↓ | |
| 4,00 | 5,00 | 11,500 | | | | " | 4 | ↓ | |
| 5,00 | 6,00 | 21,000 | | | | " | 5 | ↓ | |
| 6,00 | 7,00 | 31,000 | | | | " | 5 | 2 | |
| 7,00 | 8,00 | 28,000 | | | | " | 6 | 2 | |
| 8,00 | 9,00 | 28,500 | | | | " | 5 | 2 | |
| 9,00 | 10,00 | 38,000 | | | | " | 6 | 2 | |
| 10,00 | 11,00 | 33,000 | | | | " | 7 | 2 | |
| 11,00 | 12,00 | 50,000 | | | | " | 6 | 2 | |
| 12,00 | 13,00 | 28,000 | | | | " | 7 | 2 | |
| 13,00 | 14,00 | 18,000 | | | | " | 6 | ↓ | |
| 14,00 | 15,00 | 38,000 | | | | " | 7 | 2 | |
| 15,00 | 16,00 | 39,000 | | | | " | 6 | 2 | |
| 16,00 | 17,00 | 31,000 | | | | " | 5 | 2 | |
| 17,00 | 18,00 | 30,000 | | | | " | 4 | 2 | |
| 18,00 | 19,00 | 38,000 | | | | " | 6 | 2 | |
| 19,00 | 20,00 | 40,000 | | | | " | 7 | 2 | |
| 20,00 | 21,00 | 34,300 | | | | " | 6 | 2 | |
| 21,00 | 22,00 | 43,500 | | | | " | 5 | 2 | |
| 22,00 | 23,00 | 50,000 | | | | " | 6 | 2 | |
| 23,00 | 24,00 | 22,000 | | | | " | 5 | ↓ | |
| 24,00 | 25,00 | 21,000 | | | | " | 4 | ↓ | |
| 25,00 | 26,00 | 15,000 | | | | " | 8 | ↓ | |
| 26,00 | 27,00 | 15,000 | | | | " | 7 | ↓ | |
| 27,00 | 28,00 | 15,000 | | | | " | 6 | ↓ | |

DIGITADO
 23/11/13
 Pol: S. Sul

François ALEX 205 S. Buit 2831 01/02/2012

ANEXO 6

| BOLETIM DE SONDAAGEM | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|------------|-----------------------|--------|-------------|----------|----------------|----------|--------|---------|--|
| Serviço | | | Cliente | | | | Local | | | | |
| 001085-001 | | | CIA. VALE DO RIO DOCE | | | | SERRA SUL - PA | | | | |
| Número do Furo | | Inclinação | Concluído? | | Coordenadas | Sonda | Horímetro | Data | Turno | Boletim | |
| S11D254 | | 90 | NÃO | | | 061 | | 09/03/05 | 2 | 962 | |
| De | Até | Avanço | Rec(m) | Rec(%) | Material | Diâmetro | Coroa | Tempo | Luva | Orienta | |
| 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 100,00 | CM | HW | 046341 / | 6 | LWÍDEA | N | |
| 0,50 | 1,00 | 0,50 | 0,50 | 100,00 | CM | HW | 046341 / | 7 | LWÍDEA | N | |
| 1,00 | 2,00 | 1,00 | 0,85 | 85,00 | CM | HW | 046341 / | 9 | LWÍDEA | N | |
| 2,00 | 3,25 | 1,25 | 1,05 | 84,00 | CM | HW | 046341 / | 11 | LWÍDEA | N | |
| 3,25 | 4,95 | 1,70 | 1,45 | 85,29 | CM | HW | 046341 / | 14 | LWÍDEA | N | |
| 4,95 | 6,95 | 2,00 | 1,70 | 85,00 | CM | HW | 046341 / | 19 | LWÍDEA | N | |
| 6,95 | 8,95 | 2,00 | 1,75 | 87,50 | CM | HW | 046341 / | 17 | LWÍDEA | N | |
| 8,95 | 10,95 | 2,00 | 1,80 | 90,00 | CM | HW | 046341 / | 18 | LWÍDEA | N | |
| 10,95 | 12,90 | 1,95 | 1,65 | 84,62 | CM | HW | 046341 / | 18 | LWÍDEA | N | |
| 12,90 | 14,65 | 1,75 | 1,75 | 100,00 | HM | HW | 046341 / | 17 | LWÍDEA | N | |
| 14,65 | 16,65 | 2,00 | 2,00 | 100,00 | HM | HW | 046341 / | 19 | LWÍDEA | N | |
| 16,65 | 18,65 | 2,00 | 1,80 | 90,00 | HM | HW | 046341 / | 21 | LWÍDEA | N | |
| 18,65 | 20,55 | 1,90 | 1,90 | 100,00 | HM | HW | 046341 / | 20 | LWÍDEA | N | |



13m.

| Total Avanço | Total Furo | Avanço Boletim | Recuperação | Metragem Destruída | Metragem Perdida | Total Perc Recup |
|--------------|------------|----------------|-------------|--------------------|------------------|------------------|
| 20,55 | 20,55 | 20,55 | 18,70 | | 1,85 | 91,00 |

| Diâmetro | Metros | Água | | Material | Quantidade | Verific/Troca |
|--------------------------------|--------|-------------------|-------|----------------|------------------|---------------|
| HX | 3,05 | Dist. Bombeamento | 1200 | POL PLUS - LT | 1,0000 | |
| | | Perdas (Fendas) | | BENTONITA - KG | 125,0000 | |
| | | Nível Estático | | GRAXA - KG | 0,2000 | |
| Atividade da Sonda | | De | Até | R\$ | OLEO DIESEL - LT | 35,0000 |
| Treinamento de Pessoal | | 18:00 | 18:10 | N | | |
| Ensaio de Perda D'água | | 18:10 | 19:10 | N | | |
| Batendo Lama / Limpando Poço | | 19:10 | 20:30 | N | | |
| Furando / Manobrando / Pescand | | 20:30 | 22:40 | N | | |
| Recortando Furo / Revestindo | | 22:40 | 23:10 | N | | |
| Furando / Manobrando / Pescand | | 23:10 | 06:00 | N | | |

| Complemento | | | | Nome | Função |
|-------------|--|--|--|--------------------------------|-------------------|
| | | | | ANTONIO ADAILSON VASC. DE LIMA | SUP. SONDAAGEM I |
| | | | | CICERO ELISBAO DE SOUZA | SONDADOR I |
| | | | | ELIEL GONCALVES DE SOUZA | AJ. DE SONDAAGEM |
| | | | | FRANCISCO PEREIRA GUEDES | SUP. SONDAAGEM I |
| | | | | REGINALDO FERREIRA SILVA | AUX. DE SONDAAGEM |

| Medida de Desvio | Quantidade | Inclinação | Azimute |
|------------------|------------|------------|---------|
| | | | |

Chefia Equipe: 
 Visto Cliente:  23/03/05

ANEXO 7 (FRENTE)

Tabela com as estimativas dos parâmetros de resistência dos litotipos das Minas de Ferro de Carajás.

| LITOTIPO | GRAU DE RESISTÊNCIA | DESCRIÇÃO | CARACTERÍSTICAS | RESISTÊNCIA UNIAXIAL ESTIMADA (Mpa) |
|---------------------------------|---------------------|-----------------------|--|-------------------------------------|
| MD - Máfica Decomposta Inferior | C0 | Extremamente Macia | - Penetrada pela ponta do dedo polegar; - Moldada pelas mãos; - Facilmente penetrada pela ponta do canivete; - Escavada por equipamento Manual; - Esmigalha-se facilmente sob a pressão das mãos; - Indentada facilmente pela ponta fina do martelo de geólogo. | 0.25-1.0 |
| MD - Máfica Decomposta Média | C1 | Macia | - Riscada e raspada facilmente pelo canivete; - Quebra-se sob um único impacto do martelo de geólogo;; - Bordas dos fragmentos facilmente quebradas pela pressão dos dedos; | 1.0-5.0 |
| MD - Máfica Decomposta Superior | | | - Raspada e riscada com dificuldade pela lâmina do canivete; - Quebra-se sob um único impacto do martelo de geólogo; - Pequenos fragmentos (2x2x2 cm) não quebram sob pressão dos dedos; - Escavação por equipamentos mecanizados; - Endentação rasa sob impacto da ponta fina do martelo de geólogo. | |
| MSD - Máfica Semi-Decomposta | C2 | Macia/Média | - Quebra-se sob um único impacto do martelo; - Indentação rasa sob o impacto da ponta fina do martelo de geólogo; - As bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos; - A lâmina do canivete provoca sulco acentuado na superfície do fragmento; - Podem ser raspada pelo canivete. | 5.0-25.0 |
| | C3 | Média | - Espécime de mão podem ser quebrados sob poucos golpes firmes de martelo de geólogo; - Bordas finas dos fragmentos podem ser quebradas pelas mãos com certa dificuldade; - Superfície pouco riscável por lâmina de aço; - Não pode ser raspada pelo canivete; - Escavada por desmonte a fogo. | 25.0-50.0 |
| MS - Máfica Sã | C4 | Média/Dura | - Espécime de mão requerem alguns golpes de martelo para serem quebrados; - Bordas dos fragmentos dificilmente quebrados pelas mãos; - Superfícies dificilmente riscadas pelo canivete; - Escavada por desmonte a fogo. | 50.0-100.0 |
| | C5 | Dura | - Espécime de mão requerem muitos golpes de martelo para serem quebrados; - Fragmentos possuem bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço; - Superfície praticamente não riscada pelo canivete; - Escavada por desmonte a fogo. | 100.0-250.0 |
| | C6 | Extremamente Dura | - Espécime somente lascados com uso de martelo; - Escavada por desmonte a fogo. | >250 |
| JP - Jaspelito | C5 | Dura | - Espécime de mão requerem muitos golpes de martelo para serem quebrados; - Fragmentos possuem bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço; - Superfície praticamente não riscada pelo canivete; - Escavada por desmonte a fogo. | 100.0-250.0 |
| CQ - Canga Química | C2 | De Macia a Média | - Apresenta grau de alteração muito variado desde levemente alterada até solo residual; - A resistência varia nas categorias macia (C1) e média (C3), com predominância de média macia (C2). | 1.00-50.0 |
| CM - Canga de Minério | C1 | De Macia a Média/Dura | - Apresenta grau de alteração variando de altamente alterada à completamente alterada; - A consistência/resistência predominante é macia (C1), com expressivas ocorrências nos graus (C2) média, macia e (C4) média dura. | 1.0-100.0 |
| MBT - Minério de Baixo Teor | C1 | Macia | - Apresenta grau de alteração moderado; - Consistência predominantemente macia (C1). | 1.0-5.0 |
| HC - Hematita Compacta | C4 | Média/Dura | - Espécime de mão requerem alguns golpes de martelo para serem quebrados; - Bordas dos fragmentos dificilmente quebrados pelas mãos; - Superfícies dificilmente riscadas pelo canivete; - Escavada por desmonte a fogo. | 50.0-100.0 |
| HF - Hematita Friável | C0 | Extremamente Macia | - Penetrada pelas pontas dos dedos; - Facilmente penetrada pela ponta do canivete; - Lâminas incipientes ou mesmo incipientes; - Esmigalha-se facilmente sob a pressão das mãos; - Aspectos granulométrico mais arenosa. | 0.25-1.0 |
| | C1 | Muito Macia | - Penetrada facilmente pelo canivete; - Lâminas milimétricas a centimétricas duras a semi-duras parcialmente contínuas; - Granulometria um pouco mais particulada. | 1.0-5.0 |
| | C1/C2 | Muito Macia/Macia | - Penetrada com pouco mais de dificuldade pela ponta do canivete; - Lâminas centimétricas duras, compactas e contínuas, muito resistentes; - Granulometria bastante particulada. | 1.0-25.0 |

Fonte:
Mapeamento Lito-Estrutural e Geomecânico das Minas de N4WN (2008). Rel BVP nº 2.01.02.100-E-RT-011
Mapeamento Lito-Estrutural e Geomecânico das Minas de N4E (2009). Rel BVP nº 2.01.02.100-E-RT-020
Mapeamento Lito-Estrutural e Geomecânico das Minas de NSW (2009). Rel BVP nº 2.01.02.100-E-RT-025
Mapeamento Lito-Estrutural e Geomecânico das Minas de N5E (2009). Rel BVP nº 2.01.02.100-E-RT-035
Sá, G.(2010) - CARACTERIZAÇÃO LITOESTRUTURAL E PARAMETRIZAÇÃO GEOMECÂNICA DAS SUPERFÍCIES DE RUPTURA EM TALUDES DA MINA DE N4E, CARAJÁS - PA. Dissertação de Mestrado. UFOP/IMG.217p.

ANEXO 7 (VERSO)

Os quadros abaixo apresenta os Parâmetros de caracterização geomecânica definidos pela Vale.

| GRAU DE ALTERAÇÃO (Particularidade do material rochoso) | | | 01 |
|---|------------------------|--|----|
| CODIGO | GRAU | DESCRIÇÃO | |
| 01 | FRESCA | Nenhum sinal visível de material rochoso alterado / Rocha sã, alteração mineralógica nula a incipiente / Minerais preservam as características originais de brilho, cor e clivagem (W1) / Descoloração sutil das principais descontinuidades / Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as ferruginosas estão coesas e sem presença de alteração. | |
| 02 | LEVEMENTE ALTERADA | Descoloração leve indicando alteração da rocha e das descontinuidades / Todo material pode estar descolorido / Alteração mineralógica perceptível / Menos de 5% do maciço rochoso está alterado / Cores esmaecidas / Perda do brilho dos minerais (W2) / Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as ferruginosas estão coesas, presença de oxidação nas bandas ferruginosas e nas descontinuidades. | |
| 03 | MODERADAMENTE ALTERADA | Menos da metade do material rochoso está decomposto, a rocha fresca ou descolorida está presente como uma estrutura descontínua ou em pedaços / Toda a matriz apresenta-se com evidências de oxidação, caulinitização / Pode ocorrer material mais alterado e ou solo ao longo das descontinuidades (W3) / Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as ferruginosas apresentam-se menos coesas (principalmente as bandas silicosas), presença acentuada de oxidação nas bandas ferruginosas, nas descontinuidades e, filmes de hidróxidos de ferro nas bandas silicosas. | |
| 04 | ALTAMENTE ALTERADA | Mais da metade do material rochoso está decomposto e ou desagregado / A rocha fresca ou descolorida está presente como uma estrutura descontínua ou em pedaços / Alteração mineralógica muito acentuada / Cores bastante modificadas / Possível presença de núcleos rochosos menos alterados (W4) / Nas FFB as bandas silicosas apresentam-se com baixa coesão e as bandas ferruginosas apresentam-se menos coesas com presença acentuada de oxidação, nas bandas silicosas aparecem filmes de hidróxidos de ferro. | |
| 05 | COMPLETAMENTE ALTERADA | Todo material esta decomposto, porém com a estrutura original preservada / Sapolito (W5) Nas FFB tantos as bandas silicosas quanto às ferruginosas apresentam-se com baixa coesão (silica liberada) e as bandas ferruginosas apresentam-se alto índice de oxidação (limonitizados). | |
| 06 | SOLO RESIDUAL | Todo material rochoso foi decomposto e a estrutura original esta destruída. Solo formado por alteração "in situ". (W6) Nas FFB as bandas de sílica então liberadas com filmes de hidróxido de ferro, as bandas ferruginosas estão completamente hidratadas. | |

| GRAU DE CONSISTÊNCIA (Particularidade do material rochoso) | | | 02 |
|--|-----------------|---|----|
| CODIGO | GRAU | DESCRIÇÃO | |
| 00 | EXTREMAM. MACIA | Penetrável pelo polegar. Marcado com a unha / Esfarela facilmente sob pressão dos dedos e dissolve completamente quando agitado em água / R_0 (T_c 0,25 a 1 Mpa) | |
| 01 | MACIA | Penetrável por lâmina provoca sulcos profundos, desagregáveis manualmente / Esfarela ao golpe do martelo / R_1 (T_c 1 a 5 Mpa). | |
| 02 | MÉDIA MACIA | Facilmente penetrável por lâmina; quebra-se facilmente a um golpe do martelo / Somente as bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos / R_2 (T_c 5 a 25 Mpa) | |
| 03 | MÉDIA | Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo, as bordas do fragmento não podem ser quebradas pela pressão dos dedos / A lâmina de aço provoca sulcos rasos na superfície / R_3 (T_c 25 a 50 Mpa) | |
| 04 | MÉDIA DURA | A lâmina de aço dificilmente provoca sulcos na superfície / Quebra-se a um golpe de martelo / R_4 (T_c 50 a 100 Mpa) | |
| 05 | DURA | Quebra-se com vários golpes de martelo / Não risca pela lamina de aço / R_5 (T_c 100 a 250 Mpa) | |
| 06 | EXTREMAM. DURA | São impenetráveis por lâminas de aço / Os fragmentos possuem bordas ásperas e cortantes / Quebra-se com dificuldade a vários golpes do martelo / R_6 (T_c >250 Mpa) | |