

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGEM

A PERFILAGEM GEOFÍSICA GAMA-GAMA EM DEPÓSITOS DE FERRO DO  
QUADRILÁTERO FERRÍFERO – UMA FERRAMENTA PARA MEDIÇÕES DE DENSIDADE  
DE ROCHAS

Tiago de Almeida

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA

Porto Alegre

2011

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGEM

A PERFILAGEM GEOFÍSICA GAMA-GAMA EM DEPÓSITOS DE FERRO DO  
QUADRILÁTERO FERRÍFERO – UMA FERRAMENTA PARA MEDIÇÕES DE DENSIDADE  
DE ROCHAS

Tiago de Almeida

Geólogo

Trabalho realizado no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral/Metalurgia Extrativa

Porto Alegre

2011

Essa dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Co-Orientador:

Prof. Dr. Paulo Salvadoretti

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe (DMIN/UFRGS)

Geól. Dr. Marco Antônio da Silva Braga (VALE S.A.)

Profa. Dra. Vlândia Cristina de Souza (DMIN/UFRGS)

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Felipe C. L. Costa, pela oportunidade de poder realizar este mestrado, pela humildade e vontade de ensinar a todos, pela sabedoria e conhecimento que sempre passou pra todos os alunos.

Ao Prof. Dr. Paulo Salvadoretti, pelas inúmeras orientações, pelo constante auxílio em escritório e no campo, pela constante busca ao saber no auxílio deste trabalho.

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

Ao Geólogo Marcelo Vidigal, meu gerente na divisão de ferrosos na Vale e que me deu força e todas as condições para realizar esta pesquisa necessária ao desenvolvimento da Vale.

Ao Engenheiro de Minas Leandro José de Oliveira “Diretor” pela grande contribuição nos levantamentos de campo na Vale.

Ao Engenheiro de Minas Tiago Webber, pelo bom humor de sempre e pelo auxílio nos trabalhos de campo na Vale.

À UFRGS e à Escola de Engenharia pela oportunidade de estudar nessa escola.

Ao Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM), por toda infra-estrutura fornecida aos alunos.

A todos os colegas do PPGEM.

À VALE S.A., pela oportunidade de pesquisa e testes da ferramenta de densidade, fornecendo completo apoio logístico e financeiro ao projeto.

Ao Prof. José Tullio Moro e toda a equipe do Serviço de Proteção Radiológica (SPR) pelo apoio nos trabalhos que envolveram materiais radioativos.

Ao CNPQ pelo auxílio financeiro.

A todos os meus amigos que sempre me deram força pra continuar.

Principalmente a Cassiane, minha querida esposa, pela paciência e amor nas horas que mais precisei.

Porto Alegre, Maio de 2011.



## SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xiv
Resumo.....	xvi
Abstract.....	xvii
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Por que Utilizar Perfilagem Geofísica Gama-Gama no Minério de Ferro da VALE? ..	3
1.2 Objetivo .....	5
1.3 Metodologia.....	6
1.4 Localização das Áreas de Estudo .....	7
1.5 Estrutura da Dissertação .....	9
Capítulo 2.....	10
Fundamentos Teóricos.....	10
2.1 Os Métodos Utilizados nos Ensaios de Densidade em Minério de Ferro da VALE..	11
2.1.1 Conceitos .....	11
2.1.2 Descrição das Técnicas Utilizadas na VALE.....	11
2.1.2.1 Técnica do Frasco de Areia.....	12
2.1.2.2 Técnica do Meio Denso por Deslocamento de Volume de Água.....	12
2.1.2.3 Técnica do Gabarito Retangular .....	13
2.1.2.4 Técnica da Balança Hidrostática.....	14
2.1.2.5 Técnica da Abertura de Poços ou Cubo .....	15
2.2 Fatores que Influenciam nos Dados de Ensaios de Laboratório.....	16
2.2.1 Densidade Mineral dos Grãos.....	16

2.2.2 Porosidade da Rocha .....	18
2.2.3 Água Natural Contida na Rocha.....	20
2.2.4 Condição Topográfica.....	21
2.3 Valores de Densidade das Rochas Utilizadas na VALE .....	23
2.4 Perfilagem Geofísica.....	25
2.4.1 Fundamentos de Perfilagem Geofísica Gama-Gama.....	26
2.4.1.1 Considerações Teóricas Sobre as Partículas Gama ( $\gamma$ ) .....	28
2.4.1.2 Interação dos Raios Gama com o Meio .....	29
2.4.1.3 Função Resposta.....	32
2.5 Fatores que Influenciam os Dados de Perfilagem Gama-Gama.....	35
2.5.1 Decaimento Radioativo da Fonte.....	35
2.5.2 Efeito Z/A.....	36
2.5.3 Lama/Reboco e Rugosidade das Paredes.....	37
2.5.4 Presença de Água nas Formações .....	41
2.5.5 Argilosidade .....	41
2.5.6 Velocidade de Aquisição dos Dados na Perfilagem.....	42
2.5.7 Radiação Natural de Fundo .....	42
2.6 Volume de Investigação, Resolução Horizontal/Vertical e Penetração dos Raios Gama no Meio Natural .....	43
2.7 Trabalhos de Perfilagem Geofísica Gama-Gama em Minério de Ferro .....	48
Capítulo 3 .....	51
Geologia Regional e Local.....	51
3.1 Geologia Regional.....	52
3.1.1 Trabalhos anteriores .....	52
3.1.2 Estratigrafia .....	54

3.2 Geologia Local .....	57
3.2.1 Sinclinal Gandarela.....	57
3.2.2 Principais Tipos de Materiais Ricos em Ferro .....	63
3.2.3 Geologia Local do Alvo Dois Irmãos .....	67
3.2.4 Geologia Local do Alvo Maquiné .....	67
Capítulo 4 .....	71
Aquisição dos dados geofísicos.....	71
4.1 Procedimentos na Aquisição dos Dados .....	73
4.1.1 Dificuldades encontradas na aquisição dos dados geofísicos.....	74
4.1.2 Tempo para aquisição dos dados geofísicos.....	74
4.2 Aspectos da Execução do Furo que Influenciam na Perfilagem Gama-Gama.....	76
4.2.1 Inclinação .....	76
4.2.2 Tempo de Espera para Execução da Perfilagem Gama-Gama .....	77
4.2.3 Presença de Lama e/ou Água no Furo de Sondagem .....	80
4.2.4 Aproveitamento dos Perfis de Perfilagem Gama-Gama .....	80
Capítulo 5 .....	84
Análise dos Resultados .....	84
5.1 Perfil Geofísico Gama-Gama .....	85
5.1.1 Equações de Ajuste para o Perfil Gama-Gama .....	87
5.1.2 Perfil Gama-Gama no Alvo Dois Irmãos .....	93
5.1.3 Perfil Gama-Gama no Alvo Maquiné .....	96
5.2 Análise de Densidades Estimadas por Perfilagem Geofísica Gama-Gama .....	96
5.3 Densidades Estimadas por Litotipos .....	99

5.4 Comparativo entre Densidades Obtidas por Perfilagem Gama-Gama e Densidades Estabelecidas pela VALE .....	102
Capítulo 6 .....	105
Conclusões e Recomendações .....	105
6.1 Conclusões .....	105
6.2 Recomendações para os Trabalhos Futuros .....	110
Capítulo 7 .....	112
Referências Bibliográficas .....	112
Anexo 1 .....	115

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Exemplos de testemunhos de rocha (minério e estéril) dentro das caixas de testemunhos após a realização da sondagem direta. A) Amostras de rocha totalmente fragmentadas, impossibilitando as medidas de densidade. B) Detalhe do minério semi-compacto, ilustrando como o material fica, na maioria das vezes, fragmentado após a sondagem e disposição nas caixas de testemunhos.....	3
Figura 1.2: Exemplo de trecho de sondagem sem recuperação da amostra, o que impossibilita a execução do ensaio de densidade.....	4
Figura 1.3: Mapa geológico e de localização do Alvo Dois Irmãos e Alvo Maquiné, onde foram realizados os trabalhos de perfilagem geofísica gama-gama.....	7
Figura 2.1: Realização do ensaio de densidade pela Técnica do Frasco de Areia (Santos, 2006).....	12
Figura 2.2: Realização do ensaio de densidade pela Técnica do Meio Denso por Deslocamento de Volume de Água (Santos, 2006).....	13
Figura 2.3: Realização do ensaio de densidade pela Técnica do Gabarito Retangular (Santos, 2006).....	14
Figura 2.4: Realização do ensaio de densidade pela Técnica da Balança Hidrostática.....	14
Figura 2.5: Realização do ensaio de densidade pela Técnica da Abertura de Poço ou Cubo (Santos, 2006).....	15
Figura 2.6: Minério da porção central do Quadrilátero Ferrífero - Minério hematítico com percentagens elevadas de goethita/limonita, magnetita e minérios de ganga. (Fonte: Caracterização Mineralógica CVRD, 2002).....	17
Figura 2.7: Minério da porção leste do Quadrilátero Ferrífero - Minério hematítico com percentagens baixas de goethita/limonita, magnetita e minérios de ganga. (Fonte: Caracterização Mineralógica CVRD, 2002).....	18
Figura 2.8: Os três tipos fundamentais de porosidade conforme diferentes materiais numa seção geológica (Teixeira, 2003).....	19
Figura 2.9: Canga detrítica em locais com relevo sub-horizontal.....	22
Figura 2.10: Exemplo de canga estruturada no QF.....	22
Figura 2.11: Valores de densidade para rochas do Quadrilátero Ferrífero. (2006). HC – Hematita Compacta; HF – Hematita Friável; IC – Itabirito Compacto; IF – Itabirito Friável; CG – Canga; SO – Solo; XIC– Xisto Compacto; XI – Xisto.....	23

Figura 2.12: Valores de densidade para rochas da porção central do Quadrilátero Ferrífero. (2006). HC – Hematita Compacta; HF – Hematita Friável; IC – Itabirito Compacto; IF – Itabirito Friável; CG – Canga; SO – Solo; XIC– Xisto Compacto; XI – Xisto.....	24
Figura 2.13: Sonda e componetes dos equipamentos de perfilagem gama-gama.....	28
Figura 2.14: Interações dos raios gama com o meio.....	30
Figura 2.15: Interações dos raios gama com o meio – efeito fotoelétrico.....	30
Figura 2.16: Interações dos raios gama com o meio – efeito Compton.....	31
Figura 2.17: Interações dos raios gama com o meio – produção de pares.....	31
Figura 2.18: Função resposta usual para a utilização em perfilagem geofísica gama-gama.....	32
Figura 2.19: Campo de calibração no U.S Bureau of Mines, no Colorado.....	38
Figura 2.20: Exemplo de gráfico de espinha e costela.....	40
Figura 2.21: Três importantes conceitos da perfilagem geofísica (Oliveira, 2005).....	43
Figura 2.22: Efeito de diferentes colimações no volume de investigação e profundidade de investigação (Webber, 2008).....	44
Figura 2.23: Padrão bidimensional dos fótons alcançando o detector mais longe da fonte para uma formação homogênea com 2,5 g/cm <sup>3</sup> de CaCO <sub>3</sub> (Petler, 1990).....	45
Figura 2.24: Número de interações de fótons nos detectores (Petler, 1990).....	45
Figura 2.25: Número médio de interações por fóton detectado em diferentes intervalos de energia (Petler, 1990).....	46
Figura 2.26: Profundidade das respostas radiais (Petler, 1990).....	46
Figura 2.27: Resposta fotoelétrica no contato horizontal (Petler, 1990).....	47
Figura 3.1: Mapa de localização, mostrando a inserção do Quadrilátero Ferrífero na porção meridional do Cráton do São Francisco.( Marshak e Alkmim, 1989).....	53
Figura 3.2: Coluna estratigráfica proposta para o Quadrilátero Ferrífero, modificada. (Alkmin & Marshak, 1998).....	55
Figura 3.3: Mapa geológico da região do Sinclinal Gandarela, Modelo de Dorr (1969).(Braga, 2009).....	58

Figura 3.4: Estratigrafia da região do levantamento por perfilagem geofísica gama-gama.....	58
Figura 3.5: Corpos de hematita friável (a), ricos em especularita (b) na região do Baú Gandarela.....	59
Figura 3.6: Corpos de hematita compacta (a e b), na região do Baú - Gandarela.....	60
Figura 3.7: Corpo de hematita goethitica, na região do Baú - Gandarela.....	60
Figura 3.8: Corpo de itabirito goethitico, na região do Baú - Gandarela.....	61
Figura 3.9: Corpos de itabirito friável (a e b), na região do Baú - Gandarela.....	61
Figura 3.10: Corpos de itabirito compacto (a e b), na região do Baú -Gandarela.....	62
Figura 3.11: Cobertura de Canga (a e b), na região do Baú - Gandarela.....	62
Figura 3.12: Mapa geológico da região do Baú - Gandarela, contendo o detalhamento das litologias que compõem a Formações dos Grupos Itabira, Piracicaba e Caraça, e as litologias do Supergrupo Rio das Velhas, onde foi realizado o levantamento por perfilagem geofísica gama-gama, Modelo de Dorr (1969).....	64
Figura 3.13: Mapa geológico da região de Maquiné, contendo o detalhamento das litologias que compõem a Formações dos Grupos Itabira, Piracicaba e Caraça, e as litologias do Supergrupo Rio das Velhas, onde foi realizado o levantamento geofísico 3D-FTG, Modelo de Dorr (1969).....	68
Figura 3.14: Tipos de rochas ricas em ferro encontradas na jazida de Maquiné Norte.....	70
Figura 4.1: Montagem improvisada do equipamento de perfilagem logo após dos furos serem finalizados.....	74
Figura 4.2: Ferramenta descendo no furo de sondagem, sofrendo atrito com a parede devido à inclinação de 80° .....	77
Figura 4.3: Descida da sonda impedida devido às irregularidades da parede do furo.....	77
Figura 4.4: Aspecto da boca de furo de sondagem com aproximadamente um mês de conclusão, onde ocorrem irregularidades externas que podem se agravar em profundidade.....	78

Figura 4.5: Perfil geofísico referente ao diâmetro do furo FDDI-0209. A elipse em vermelho mostra uma zona não aproveitável (baixa qualidade do registro de densidade).....	81
Figura 5.1: Plotagem de contagens (CPS) para o sensor HRD versus densidades naturais, obtidas por análises de laboratório, para o conjunto completo de amostras de testemunhos de sondagem (dados de Dois Irmãos e Maquiné).....	87
Figura 5.2: Perfil FDDI-0275 ilustrando diferenças de posicionamento, em profundidade, de amostras extraídas de testemunhos de sondagem.....	90
Figura 5.3: Trecho em detalhe do perfil FDDI-0275, mostrando alta densidade em torno de 44 metros de profundidade, deslocada em relação ao ponto de coleta da amostra para teste de laboratório.....	90
Figura 5.4: Perfil FDDI-0220 mostrando contatos entre xisto e materiais friáveis entre 35 e 50 metros de profundidade.....	91
Figura 5.5: Destaque para o intervalo contendo xisto no perfil FDDI-0220, apresentando uma diferença de aproximadamente 3,3 m entre a interpretação geológica e a determinação por perfilagem geofísica gama-gama.....	92
Figura 5.6: Curva de ajuste obtida para o cintilômetro HRD com dados válidos de furos de sondagem do Alvo Dois Irmãos (Tabela A.2, Anexo 1). Coeficientes para a função de densidade: $A=11861,823$ e $B=0,91501066$ .....	94
Figura 5.7: Curva de ajuste obtida para o cintilômetro HRD com dados válidos de furos de sondagem do Alvo Maquiné (Tabela A.3, ANEXO 1). Coeficientes para a função de densidade: $A=9384,8449$ e $B=0,82065908$ .....	95
Figura 5.8: Scatterplot dos dados de densidade natural versus densidade estimada por perfilagem geofísica gama-gama, no Alvo Dois Irmãos.....	97
Figura 5.9: Scatterplot dos dados de densidade natural versus densidade estimada por perfilagem geofísica gama-gama, no Alvo Maquiné.....	98
Figura 5.10: Curva de ajuste CPS versus densidade natural (sensor HRD) obtida com todos os dados válidos (Dois Irmãos e Maquine, simultaneamente). Coeficientes para a função de densidade: $A=10306,875$ e $B=0,8598482$ .....	99
Figura 5.11: Scatterplot (plotagem de espalhamento) de densidade natural versus densidade obtida por perfilagem geofísica gama-gama, usando a curva de ajuste do conjunto completo de dados.....	99
Figura 5.12: Valores médios de densidade e variabilidade (+/- um desvio padrão) das diferentes litologias encontradas nos alvos Dois Irmãos e Maquiné, de acordo com as estimativas feitas por perfilagem geofísica gama-gama.....	101



Figura 5.13: Perfis geofísicos do furo FDDI-0224, comparando (segunda coluna, da direita para a esquerda) densidades estimadas por perfilagem geofísica gama-gama (linha vermelha) e por análise laboratorial (linha azul). A tarja cinza representa trechos não confiáveis para estimativa de densidade.....104

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Comparação entre as técnicas de medida de densidade mais utilizadas na Vale (modificado de Santos, 2005).....	11
Tabela 2.2: Volume de poros e tamanho de partículas em sedimento. Fato importante é a diminuição da permeabilidade com aumento da porosidade e diminuição do tamanho da partícula (Teixeira, 2003).....	21
Tabela 2.3: Média dos valores de densidade das hematitas, dos itabiritos, das coberturas e dos materiais estéreis nas áreas de minério de ferro da Vale no Quadrilátero Ferrífero (2006).....	23
Tabela 2.4: Média dos valores de densidade das hematitas, dos itabiritos, das coberturas e dos materiais estéreis nas áreas de minério de ferro da Vale na porção central do QF (2006).....	24
Tabela 2.5: Diversos valores de C para alguns elementos mais comuns.....	36
Tabela 3.1: Listagem dos furos perfilados nos alvos Dois Irmãos (código FDDI) e Maquiné (código FDMQ), com as respectivas datas, coordenadas UTM (SAD69), parâmetro medido e profundidades.....	75
Tabela 3.2: Comparativo entre a data da sondagem e da perfilagem, juntamente com o comprimento perfilado.....	81
Tabela 3.3: Aproveitamento dos perfis referente ao Alvo Dois Irmãos.....	85
Tabela 3.4: Aproveitamento dos perfis referente ao Alvo Maquiné.....	86
Tabela 4.1 - Listagem dos furos perfilados nos alvos Dois Irmãos (código FDDI) e Maquiné (código FDMQ), com as respectivas datas, coordenadas UTM (SAD69), parâmetro medido e profundidades.....	72
Tabela 4.2: Comparativo entre a data da sondagem e da perfilagem, juntamente com o comprimento perfilado.....	79
Tabela 4.3: Aproveitamento dos perfis referente ao Alvo Dois Irmãos.....	82
Tabela 4.3: Aproveitamento dos perfis referente ao Alvo Maquiné.....	83
Tabela 5.1: Densidade média e número de amostras envolvidas nas estimadas por perfilagem geofísica gama-gama para os tipos litológicos encontrados nas áreas de Dois Irmãos e Maquiné.....	101

Tabela 5.2: Valores médios de densidade por litologia usados na avaliação do alvo Dois Irmãos, definidos pela Vale em ensaios de laboratório de testemunhos de sondagem e ensaios em afloramentos (dados de 2007).....103

## RESUMO

Durante a fase de avaliação de jazidas de ferro, é importante determinar a densidade das formações geológicas em suas respectivas profundidades. Como uma alternativa prática para obter esta informação, testou-se a aplicação de perfilagem geofísica gama-gama em furos de sondagem nos depósitos de Dois Irmãos e Maquiné, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Brasil. O objetivo deste estudo foi investigar obtenção da densidade in situ do minério de ferro e encaixantes usando a técnica de perfilagem geofísica gama-gama. A utilidade desta técnica cresce quando a recuperação de testemunhos é deficiente ou inexistente, como ocorre em determinadas situações envolvendo minérios de ferro friáveis. O equipamento de medida é constituído de uma fonte emissora de radiação gama e sensores de radiação, que são introduzidos em furos de sondagem. A radiação detectada pelos sensores permite estimar a densidade das rochas próximas ao sistema de medida. Comparações feitas entre densidades determinadas por análises de laboratório e densidades estimadas por perfilagem geofísica mostraram diferenças inferiores a 15%, em situações nas quais o diâmetro dos furos de sondagem manteve-se constante.

**PALAVRAS-CHAVE:** Perfilagem geofísica, gama-gama, densidade.

## ABSTRACT

During the evaluation of iron deposits, it is important to determine the bulk density of geological formations at various depths. To put this issue in a practical way, we present the results of the application of wireline logging in Dois Irmãos and Maquiné deposits, Iron Quadrangle, Minas Gerais-Brazil. The aim of this study is to investigate the possibility of recording the in-situ densities of subsurface iron ore bodies and waste rock. The usefulness of this technique grows as the borehole core recovery is deficient or inexistent, as happens in certain situations involving friable iron ore. The measurement system is constituted of a gamma-ray source and three detectors mounted in a sonde which is lowered into a borehole and the gamma-rays are counted. In the following, this gamma-ray counting rate is transformed into density, supposing the calibration curve is a true exponential function and the densities come from core data. By comparing densities determined in laboratory and through the logs we have found differences below 15% supposing the borehole diameters are nearly constant.

**KEY-WORDS:** Geophysical logging, gamma-gamma, density.

# Capítulo 1

## Introdução

Os métodos geofísicos aplicados a mineração estão sendo cada vez mais utilizados no Brasil e no mundo. Este fato deve-se aos métodos terem baixos custos na aquisição dos dados e credibilidade nas medidas de inúmeros parâmetros físicos no mesmo furo de sondagem. Estes métodos permitem medidas indiretas de propriedades físicas de rocha, sendo de grande valia, principalmente, em locais onde ocorrem incertezas e impossibilidade de realização de medidas diretas das propriedades físicas nas amostras.

A sondagem com recuperação de testemunhos de rocha é a ferramenta mais utilizada na amostragem das jazidas para avaliação dos depósitos minerais, pois fornece material físico que pode ser levado a laboratório e analisado em diversas propriedades físicas (Webber, 2008). O processo de sondagem e amostragem é bastante confiável, porém caro e, na maioria das vezes, de execução lenta. Atualmente, porém, as empresas de todo mundo utilizam este método para avaliação de suas jazidas.

A perfilagem geofísica gama-gama para medidas de densidade de rocha vem sendo aplicada em inúmeros locais do mundo, como na Austrália, por exemplo, nas áreas de carvão e minério de ferro, sendo um método consagrado na indústria do petróleo e executada em furos de sondagem há muitos anos (Borsaru *et al.*, 1995; Butt & Fullagart, 2001; Borsaru, 2002; Borsaru, 2005).

A gerência de exploração mineral de ferrosos da Vale (GAEMF), vem desenvolvendo desde 2004, projetos de geofísica aplicada na área de minério de ferro, tanto em geofísica aérea quanto em perfilagem geofísica gama-gama para densidade em furos de sondagem. O objetivo destas pesquisas é aplicar técnicas avançadas de

medições de propriedades físicas das rochas, tentando solucionar alguns problemas e/ou dando suporte a decisões e planejamento.

A coordenação de geofísica de ferrosos da Vale deu início as pesquisas e testes das ferramentas de perfilagem geofísica em furos de sondagem com o objetivo de desenvolver a aplicabilidade da “Well Density Log” para medidas in situ de densidade nos diferentes tipos de minério de ferro e rochas encaixantes dos depósitos minerais. A idéia de investigar a aplicabilidade dessa ferramenta se deve ao fato de que, atualmente, os valores de densidade são medidos com base em amostras retiradas de afloramentos de rocha e de furos de sondagem, porém os métodos atuais possuem limitações para serem utilizados em diferentes tipos litológicos. Um exemplo ocorre nas medidas nos materiais friáveis e semi-compactos, onde, na maioria das vezes, não se tem material íntegro para realização de testes de laboratório para as medidas de densidade. Pode-se, então, melhorar as estimativas de recursos e reservas através da aquisição de um maior número de amostras por furo de sondagem e, conseqüentemente, por depósito mineral estudado.

O valor de densidade é fundamental para o cálculo de recursos e reservas e a adoção de um método mais abrangente para auxiliar nas medidas de densidade in situ visa minimizar as incertezas nos valores de tonelagem estimados nos depósitos de minério de ferro. O valor de densidade traz inúmeros benefícios como, por exemplo, a avaliação da densidade ao longo de todo o furo de sondagem (informação continua ao longo do furo), melhoria de previsibilidade, mais precisão na geometria dos modelos dos depósitos, possibilitando maior aderência e reconciliação ao planejamento de longo e curto prazo, entre outros. O valor da densidade também é fundamental para a geologia de engenharia e geotecnia, pois possibilita o cálculo mais preciso da estabilidade/segurança dos taludes das minas da Vale, por exemplo.

## 1.1 Por que utilizar perfilagem geofísica gama-gama no minério de ferro da VALE?

Os minérios extraídos nas minas da Vale são basicamente itabiritos e hematitas, friáveis, compactos e uma porção intermediária denominada de semi-compacto. As medidas de densidade do minério e estéril são feitas em amostragens nos furos de sondagem e em afloramentos, porém com alguns problemas para amostragem.

Um problema é medir a densidade em testemunhos de sondagem de minério friável e semi-compacto, pois as amostras trazidas à superfície ficam desagregadas nas caixas dos testemunhos (Figura 1.1). Quando estas amostras estão em bom estado de conservação, o que ocorre em poucos locais do furo de sondagem, as mesmas não possuem resistência para serem manipuladas manualmente (retiradas íntegras das caixas) e realizar os ensaios de sua densidade em laboratório. Este problema também ocorre nos materiais estéreis, como quartzitos e xistos, entre outros.

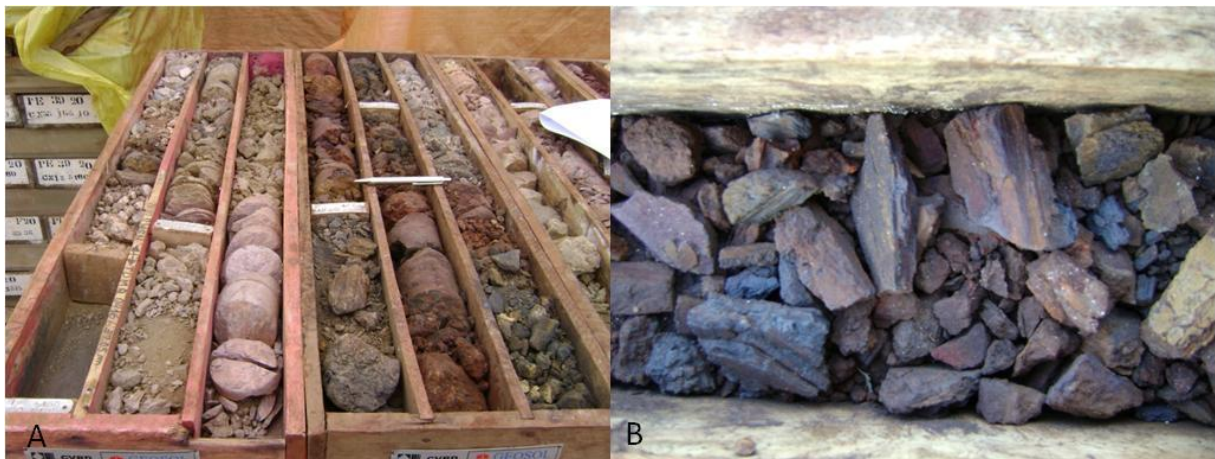


Figura 1.1 – Exemplos de testemunhos de rocha (minério e estéril) dentro das caixas de testemunhos após a realização da sondagem direta. A) Amostras de rocha totalmente fragmentadas, impossibilitando as medidas de densidade. B) Detalhe do minério semi-compacto, ilustrando como o material fica, na maioria das vezes, fragmentado após a sondagem e disposição nas caixas de testemunhos.



Outro problema é que em alguns trechos o minério friável e semi-compacto não têm recuperação, o que ocasiona inúmeras incertezas quanto ao seu real posicionamento em profundidade e, principalmente, não se obtém o testemunho para amostragem e ensaio da densidade em laboratório (Figura 1.2). A profundidade das amostras nas caixas nem sempre é precisa, o que ocasiona uma estimativa incorreta da densidade em profundidade no depósito mineral.



Figura 1.2 – Exemplo de trecho de sondagem sem recuperação da amostra, o que impossibilita a execução do ensaio de densidade.

Sendo assim, justifica-se a investigação do uso de perfilagem geofísica gama-gama para as medidas de densidade das rochas dos depósitos de minério de ferro da Vale. O eventual sucesso deste novo procedimento possibilitará a medida de densidade dentro dos furos de sondagem imediatamente após o término da perfuração, antes da medida de densidade em laboratório.

## 1.2 Objetivo

O objetivo principal deste estudo é testar a técnica de perfilagem geofísica gama-gama como uma ferramenta de medida de densidade in situ (ou densidade natural) nas formações ferríferas e nas rochas encaixantes (material estéril), a fim de complementar as informações advindas da coleta e análise de amostras de testemunhos de sondagem.

Secundariamente, é objetivo desta dissertação:

- ✓ Desenvolver a metodologia de aplicação da ferramenta de densidade nos depósitos de minério de ferro da Vale, apresentando e discutindo os resultados dos testes e das medidas da perfilagem geofísica gama-gama;
- ✓ Criar uma função de calibração entre as leituras do sensor geofísica e a densidade para os depósitos de minério de ferro estudados;
- ✓ Estimar os valores de densidade para os dois depósitos estudados;
- ✓ Comparar as medidas de densidade por geofísica com as medidas de densidade baseadas em ensaios de laboratório, medindo um erro médio de estimativa;
- ✓ Analisar as condições que influenciam na qualidade dos dados de perfilagem geofísica gama-gama;
- ✓ Analisar as correções de dados que não foram feitas nesta aplicação de perfilagem geofísica gama-gama e que são executados sistematicamente em outras campanhas de perfilagem (petróleo, por exemplo), verificando os problemas que podem ocorrer sem aplicação destas correções;
- ✓ Verificar o tempo total necessário para realizar toda a operação de perfilagem gama-gama em campo.

### **1.3 Metodologia**

A metodologia utilizada neste trabalho segue as seguintes etapas:

- ✓ Utilizar a ferramenta de perfilagem geofísica gama-gama em diferentes litologias nos furos de sondagem dos Alvos Dois Irmãos e Máquiné do Quadrilátero Ferrífero (QF), para verificar a presença de contraste da propriedade física (densidade);
- ✓ Verificado o contraste, escolher intervalos onde os registros são relativamente estáveis, anotando o valor de CPS e requisitando medidas de densidade em laboratório nos testemunhos para a mesma profundidade da informação da perfilagem geofísica gama-gama, para fins de comparação;
- ✓ Ajustar a função para calibração da CPS versus Densidade de Laboratório para os dois depósitos estudados e verificar a existência de correlação linear entre os dados de densidade medidos em laboratório e os dados medidos por perfilagem geofísica gama-gama nos dois alvos estudados;
- ✓ Processar os dados em escritório e gerar estimativas de densidade para as litologias com base na perfilagem geofísica gama-gama;
- ✓ Anotar o tempo total necessário para realizar todo o procedimento de perfilagem em campo.

## 1.4 Localização Das Áreas De Estudo

A campanha de perfilagem geofísica gama-gama foi realizada em duas áreas assim identificadas: Alvo Dois Irmãos e Alvo Maquiné. Ambos os alvos localizam-se próximos à cidade de Barão de Cocais - MG, distante aproximadamente 120 km de Belo Horizonte (figura 1.3), em direção leste.

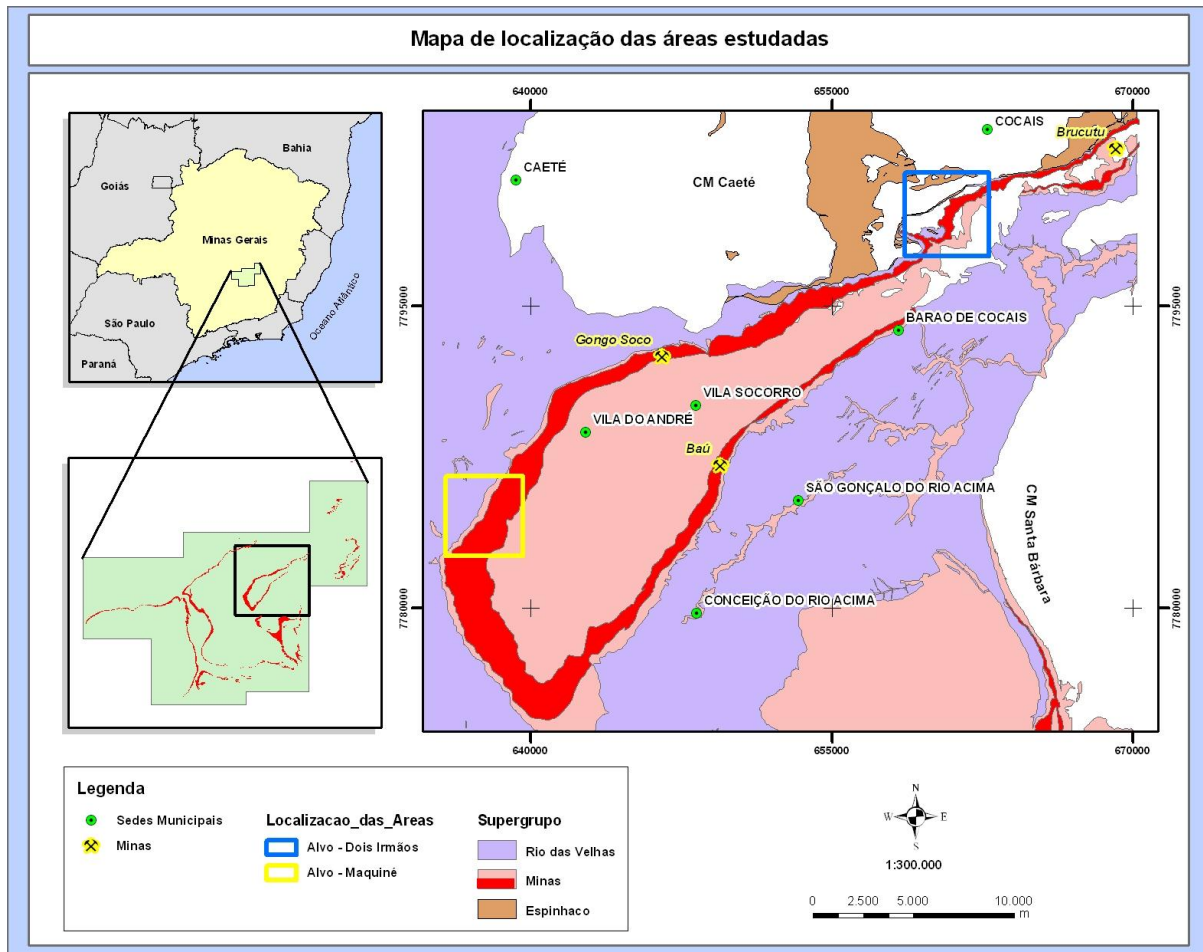


Figura 1.3 – Mapa geológico e de localização do Alvo Dois Irmãos e Alvo Maquiné, onde foram realizados os trabalhos de perfilagem geofísica gama-gama.

O acesso ao Alvo Dois Irmãos se faz, a partir de Belo Horizonte, pela BR-381 no sentido leste (Vitória-ES) até o trevo de acesso a Barão de Cocais. Toma-se a direita no trevo e o Alvo encontra-se a beira da MG-256 em frente ao trevo de acesso a mina de Brucutu.

O acesso ao Alvo Máquiné se faz, a partir de Belo Horizonte, sentido Rio Acima, passando pela cidade de Nova Lima, acesso de asfalto por cerca de 30 Km até a cidade de Rio Acima. Após atravessar a cidade de Rio Acima tomar a estrada não pavimentada no sentido da localidade de Água Limpa, totalizando 15 Km neste acesso. Após, tomar a estrada sentido Barão de Cocais percorrendo uma distancia de 10 Km de estrada não pavimentada até o entrocamento para a área de pesquisa Maquiné Norte, entrar a esquerda no entrocamento e percorrer mais 7 Km de estrada não pavimentada até atingir a área de Maquiné Norte, totalizando 62 Km.

## 1.5 Estrutura da Dissertação

O capítulo 2 descreve os fundamentos teóricos dos métodos de densidade e daqueles utilizados na Vale, atualmente, para medir densidade das rochas e testemunhos de sondagem. Encontram-se ilustrados os métodos mais utilizados na Vale para medidas diretas de densidade nos testemunhos e afloramentos, com uma breve descrição de cada um deles e quais os valores de densidade utilizados para o minério de ferro na Vale. Também encontra-se neste capítulo os fundamentos teóricos da perfilagem geofísica gama-gama, a descrição dos fatores que influenciam as medidas de densidade com base nos métodos diretos e na perfilagem geofísica gama-gama e exemplos de trabalhos com utilização da perfilagem gama-gama no minério de ferro.

O capítulo 3 apresenta a descrição da Geologia Regional e Geologia Local do Quadrilátero Ferrífero (QF), a Estratigrafia, a descrição dos tipos de minério (hematitas e itabiritos) e coberturas nos alvos Dois Irmãos e Maquiné.

O capítulo 4 apresenta a aquisição dos dados de perfilagem geofísica gama-gama, os procedimentos desta aquisição, os aspectos que influenciam os dados na aquisição e tratamentos e o aproveitamento dos perfis.

O capítulo 5 traz a análise dos resultados dos dados adquiridos em Dois Irmãos e Maquiné, com grande enfoque nos problemas que dificultaram a aquisição e a interpretação final dos dados, como a presença de água/lama no furo, o posicionamento das amostras, as irregularidades nas paredes dos furos, entre outros. As equações de ajuste foram geradas para os dois alvos e estas equações utilizadas para a estimativa dos dados finais de densidade em cada alvo, com uma equação de um alvo sendo utilizada para estimar a densidade do outro alvo. Ao final, foi criado um gráfico que ilustra a densidade média definida por perfilagem gama-gama em cada litologia estudada, fazendo uma comparação com os valores utilizados, atualmente, na Vale.

O capítulo 6 conclui a dissertação, propondo que o método de perfilagem geofísica gama-gama seja utilizado nas avaliações de recursos e reservas nos depósitos minerais da Vale, principalmente no minério de ferro que é a maior commodity da companhia.

## **Capítulo 2**

### **Fundamentos Teóricos**

Este capítulo se dedica aos fundamentos teóricos das técnicas de medida de densidade utilizados na Vale e do método de perfilagem geofísica gama-gama proposto, além de discernir sobre os fatores que influenciam a qualidade dos dados medidos nos ensaios de laboratório e na perfilagem geofísica gama-gama.

## 2.1 Métodos Utilizados Nos Ensaios De Densidade Em Minério De Ferro Da VALE

A Vale utiliza diversos métodos para ensaios de densidade nas rochas. A seguir serão descritos os conceitos e as técnicas para determinação dos valores de densidade utilizados na empresa.

### 2.1.1 Conceitos

Na mineração, a densidade natural de uma rocha é representada pelo quociente entre a massa do material coletado e o volume representado, in situ. A densidade varia conforme a também varia a composição mineralógica das rochas (Hinze, 1990).

Para análise e avaliação dos valores de densidade das rochas das minas e áreas de exploração da Vale na região do Quadrilátero Ferrífero, os materiais são divididos em quatro (4) grupos: hematitas, itabiritos, coberturas e estéreis.

### 2.1.2 Descrição Das Técnicas Utilizadas Na VALE

Existem várias técnicas para determinar a densidade das rochas. Segundo Santos (2006), a Vale utiliza-se principalmente da técnica do “Frasco de Areia” para materiais friáveis e do “Meio Denso por Deslocamento de Volume” para materiais compactos.

A Tabela 2.1 ilustra o comparativo entre as técnicas mais utilizadas na Vale.

Tabela 2.1 – Comparação entre as técnicas de medida de densidade mais utilizadas na Vale (modificado de Santos, 2006).

TÉCNICA	TIPO DE MATERIAL		AMOSTRAGEM		OBSERVAÇÃO
	COMPACTO	FRIÁVEL	AFLORAMENTO	TESTEMUNHO	
Frasco de Areia		X	X		
Meio Denso por Preenchimento de Volume		X	X		
Meio Denso Por Deslocamento de Volume	X		X	X	Ajuste
Gabarito Retangular		X		X	
Abertura de Poço		X	X		
Cilindro Biselado		X	X		Rocha Saturada
Caixa de Testemunho	X	X		X	
Balança Hidrostática	X		X	X	Ajuste
Picnômetro	X	X	X	X	Densidade do Grão



As técnicas utilizadas para medidas de densidade que foram comparadas aos valores medidos com a perfilagem geofísica gama-gama são o “Meio Denso por Deslocamento de Volume” e o “Gabarito Retangular”. Entretanto, outras técnicas também podem ser utilizadas. A seguir serão descritas as principais técnicas utilizadas na Vale atualmente, conforme o trabalho de Santos (2006).

### 2.1.2.1 Técnica Do Frasco De Areia

A técnica consiste em cavar um orifício no material com paredes regulares e bem definidas, sendo o material retirado e pesado posteriormente (Figura 2.1). Pesa-se o frasco cheio de areia, posiciona-se o frasco no orifício para preencher o mesmo com areia de densidade conhecida e pesa-se novamente o frasco com a areia que sobrou. No final, calcula-se a densidade relativa.



Figura 2.1 – Realização do ensaio de densidade pela Técnica do Frasco de Areia (Santos, 2006).

Esta técnica é utilizada para materiais friáveis em afloramentos e nas bancadas das minas. Sua execução é rápida e utiliza-se equipamento de pequeno porte.

### 2.1.2.2 Técnica Do Meio Denso Por Deslocamento De Volume De Água

A amostra é embalada em um plástico para evitar que água seja absorvida pelo material e, então, mergulhada em uma proveta graduada de forma a medir o volume de água deslocado pela amostra (Figura 2.2). A densidade é calculada a partir da relação

entre o peso da amostra e o deslocamento de água (volume) provocado pelo mergulho da amostra em um recipiente graduado.



Figura 2.2 – Realização do ensaio de densidade pela Técnica do Meio Denso por Deslocamento de Volume de Água (Santos, 2006).

Esta técnica é utilizada para materiais compactos e determina um valor de densidade que precisa ser convertida para um valor de densidade que incorpore o fraturamento natural que as rochas. Para ajustar a esta situação, os valores da densidade da amostra sofrem uma redução de 5%, que resulta num valor de densidade menor e mais próximo do valor real in situ. Esta redução de 5% é realizada sistematicamente em todos os dados de densidade das rochas compactas e representa o fraturamento das rochas.

### **2.1.2.3 Técnica Do Gabarito Retangular**

A técnica do gabarito retangular consiste em retirar o material acondicionado em um gabarito com 20cm de comprimento e largura igual ao da caixa de testemunho. O material retirado é pesado e define-se o volume da amostra pelas dimensões do gabarito e diâmetro do testemunho (Figura 2.3). A densidade é calculada através da relação entre a massa e volume do material.

Esta técnica é utilizada para materiais friáveis nos testemunhos de sondagem. O intervalo a ser coletado deve ter uma recuperação de 100%, apresentando a preservação da parede interna do barrilete de sondagem.



Figura 2.3 – Realização do ensaio de densidade pela Técnica do Gabarito Retangular (Santos, 2006).

#### 2.1.2.4 Técnica Da Balança Hidrostática

A técnica da balança hidrostática obtém a densidade a partir da relação entre o peso da amostra em condições atmosféricas dividida pela perda de peso imersa em água utilizando a balança de Jolly (Figura 2.4). É uma técnica equivalente ao meio denso por deslocamento de volume.

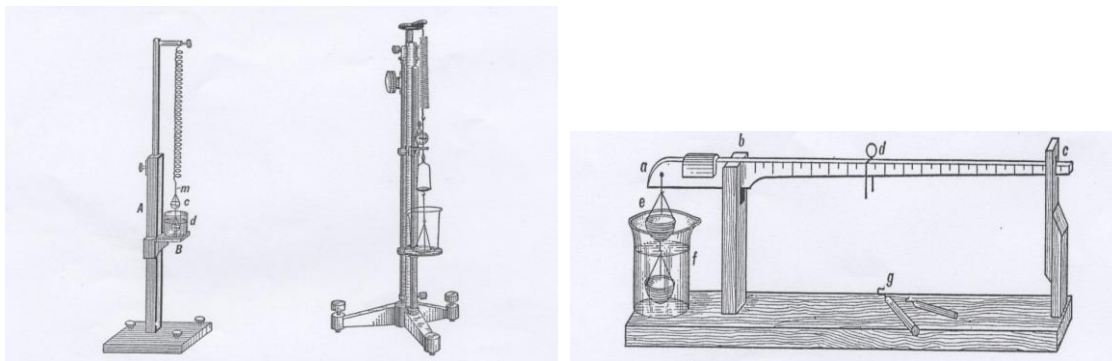


Figura 2.4 – Realização do ensaio de densidade pela Técnica da Balança Hidrostática

Esta técnica é utilizada para materiais compactos e determina um valor de densidade que precisa ser convertida para um valor de densidade que incorpore o fraturamento natural que as rochas. Para ajustar a esta situação, os valores da densidade da amostra sofrem uma redução de 5%, que resulta num valor de densidade menor e mais próximo do valor real in situ. Esta redução de 5% é realizada sistematicamente em todos os dados de densidade das rochas compactas e representa o fraturamento das rochas.

### 2.1.2.5 Técnica Da Abertura De Poços ou Cubo

A técnica de Abertura de Poços consiste em cavar um poço de paredes regulares, sendo o material retirado e pesado. O poço é revestido com um plástico e preenchido com um volume de água conhecido (Figura 2.5). A densidade é calculada pela relação entre o peso de material retirado do poço e o volume desse poço. Podem ser utilizadas as seguintes dimensões: 1m x 1m x 1m (1m<sup>3</sup>), 1m x 1m x 0,5m (0,5m<sup>3</sup>) ou até encher um tambor com o material retirado do poço.

Esta técnica é utilizada para materiais friáveis e a sua execução é lenta, exige um esforço físico maior e equipamentos de porte médio.



Figura 2.5 – Realização do ensaio de densidade pela Técnica da Abertura de Poço ou Cubo (Santos, 2006).

## **2.2 Fatores Que Influenciam Nos Dados De Ensaio De Laboratório**

Existem inúmeros fatores que influenciam os valores de densidade das rochas. Todos os dados deste item são referenciados a compilação de dados do trabalho de Santos (2006).

Segundo o Australasian Joint Ore Reserves Committee (Código JORC), a densidade é essencialmente controlada por três fatores: a densidade mineral dos grãos que formam os minerais das rochas, a porosidade da rocha e a água natural contida na rocha.

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.

### **2.2.1 Densidade Mineral Dos Grãos**

A densidade mineral 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). Segundo o Relatório de Caracterização Tecnológica da Vale, na região do Quadrilátero Ferrífero, pode-se classificar pela gênese em dois tipos de rochas: um de predominância supergênica e outro de predominância hidrotermal ou tectônica.

As rochas com gênese de predominância supergênica apresentam minério hematítico com conteúdo elevado de goethita/limonita (Figura 2.6). Podem ser

representados pela porção central do Quadrilátero Ferrífero. Estas rochas apresentam-se com alto grau de hidratação, predominância friável e porosa e, conseqüentemente, possuem uma densidade menor em relação ao tipo com predominância hidrotermal ou tectônica.



Figura 2.6 – Minério da porção central do Quadrilátero Ferrífero - Minério hematítico com percentagens elevadas de goethita/limonita, magnetita e minérios de ganga. (Fonte: Caracterização Mineralógica CVRD, 2002).

As rochas com gênese de predominância hidrotermal ou tectônica apresentam em maior quantidade a hematita especular sem porosidade (Figura 2.7). São representados pela porção leste do Quadrilátero Ferrífero. Estas rochas apresentam-se com baixo grau de hidratação, predominância compacta e maciça e, conseqüentemente, possuem uma densidade maior em relação ao tipo com predominância supergênica.

Então, as rochas variam seu valor de densidade conforme composição química e natureza de sua formação.



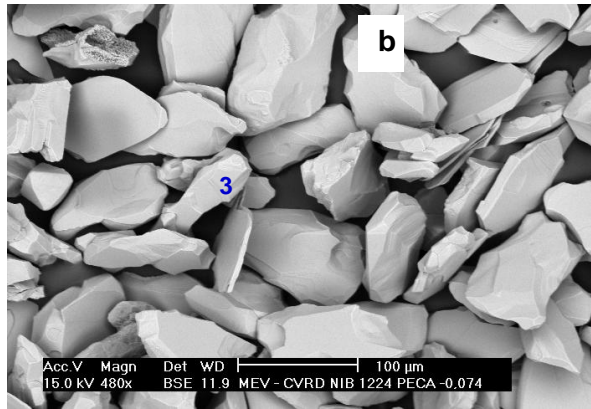


Figura 2.7 – Minério da porção leste do Quadrilátero Ferrífero - Minério hematítico com percentagens baixas de goethita/limonita, magnetita e minérios de ganga. (Fonte: Caracterização Mineralógica CVRD, 2002).

### 2.2.2 Porosidade Da Rocha

A porosidade é uma propriedade física definida pela relação entre o volume de poros e o volume total de um material. Existem dois tipos fundamentais de porosidade nos materiais terrestres: primária e secundária (Figura 2.8).

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. A porosidade primária pode ser dividida em porosidade intergranular, representada pelo espaço existente entre os grãos das rochas e em porosidade intragranular, representada pela porosidade do mineral.

Nos materiais sedimentares o tamanho e forma das partículas, o seu grau de seleção e a presença de cimentação influenciam a porosidade.

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.





A porção leste do Quadrilátero Ferrífero é representada por rochas com gênese de predominância hidrotermal ou tectônica no qual apresenta em maior quantidade a hematita especular sem porosidade. As rochas desta porção apresentam-se os valores mais elevados de densidade, devido o baixo grau de hidratação, predominância compacta e maciça.

A porção central do Quadrilátero Ferrífero, porção na qual foram realizados os levantamentos com perfilagem geofísica gama-gama, é caracterizada por rochas com gênese de predominância supergênica no qual apresenta minério hematítico com conteúdo elevado de goethita/limonita e itabiritos. As rochas desta porção apresentam-se os valores mais baixos de densidade devido ao alto grau de hidratação, predominância friável e porosa.

A porção oeste do Quadrilátero Ferrífero é considerada uma situação intermediária entre a porção leste e a porção central, portanto as rochas nesta região apresentam valores de densidade intermediários.

### **2.2.3 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

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 denominada permeabilidade (Teixeira, 2003) depende do tamanho dos poros e da conexão entre eles (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – 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 material seco, pois pode transformar (solubilizar, por exemplo) os minerais contidos nas rochas alterando sua composição química primária e, conseqüentemente, seu valor de densidade.

De outro modo, a água tem densidade em torno de  $1 \text{ g/cm}^3$ , bem mais baixa que a da rocha, e sua presença pode acarretar variações nos valores médios de densidade do meio.

#### 2.2.4 Condição Topográfica

A condição topográfica tem uma influência direta no valor da densidade para os materiais denominados de “cobertura” (solo, canga e rolado). As coberturas em relevos inclinados geralmente são rasas e em relevos sub-horizontais são mais profundas e porosas.

O solo é a camada superior da crosta terrestre que apresenta propriedades diferentes com relação ao material rochoso subjacente, como resultado de interações climáticas. Em alguns locais, como acontece no QF e nas reservas de minério de ferro, o solo formado é substituído pela canga. A canga é um material superficial, podendo ser constituída por blocos de tamanhos variados de formação ferrífera, cimentados por matriz goethítica/limonítica. Topograficamente, a canga ocorre como capeamento da formação ferrífera “in situ”, podendo ser classificada em três tipos: laterítica, detritica e estruturada.

A canga laterítica é formada por processos de intemperismo químico de rochas ferruginosas, não sendo observados fragmentos cimentados a parcialmente cimentados.

A canga detrítica (Figura 2.9) é formada por quantidade variável de fragmentos detríticos, geralmente de formação ferrífera como hematitas cimentados por limonita e goethita. A canga estruturada (Figura 2.10) é um estágio avançado de alteração pela hidratação dos minerais de ferro e lixiviação da sílica e as estruturas da rocha são encontradas preservadas.

Os tipos lateríticos e detríticos de canga estão preferencialmente nas áreas mais baixas, onde predomina a infiltração de água e o acúmulo de material. A canga estruturada é característica de regiões de topografia inclinada, onde predomina o escoamento superficial da água e saída de material.



Figura 2.9 – Canga detrítica em locais com relevo sub-horizontal.



Figura 2.10 – Exemplo de canga estruturada no QF.

A densidade varia em relação aos três tipos de canga, dependente da topografia e do tipo de canga presente. Geralmente, as cangas estruturadas e detríticas possuem densidades mais altas do que a canga laterítica, já que a última apresenta material em decomposição avançada, alta porosidade por lixiviação dos materiais e não apresenta fragmentos de formação ferrífera (hematitas, por exemplo) na sua estrutura.

## 2.3 Valores De Densidade Das Rochas Utilizados Na VALE

As jazidas minerais e as tipologias de minério têm suas características dadas pela combinação de diferentes processos geológicos como gênese, tectônica, metamorfismo local e alteração supergênica, resultando em composição mineralógica, textura, teores e grau de compactidade distintos.

De um modo geral, para o estudo de densidade das rochas na região do Quadrilátero Ferrífero é interessante destacar as porções leste, central e oeste, pois elas apresentam características distintas. Os valores médios de densidade por litologia apresentam uma diferença percentual variando de 15 a 42% (Figura 2.11 e Tabela 2.3). Estes valores são determinados utilizando em torno de dez mil (10.000) amostras (Santos, 2006).

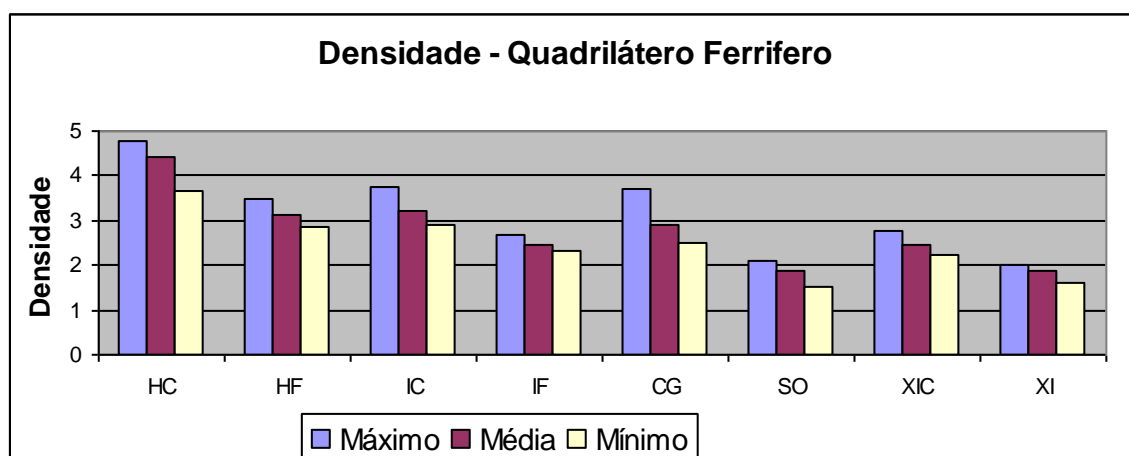


Figura 2.11 - Valores de densidade para rochas do Quadrilátero Ferrífero. (2006). HC - Hematita Compacta; HF - Hematita Friável; IC - Itabirito Compacto; IF - Itabirito Friável; CG - Canga; SO - Solo; XIC- Xisto Compacto; XI - Xisto.

Tabela 2.3 - Valores de densidade das hematitas, dos itabiritos, das coberturas e dos materiais estéreis nas áreas de minério de ferro da Vale no Quadrilátero Ferrífero (2006).

Quadrilátero Ferrífero	HEMATITAS		ITABIRITOS		COBERTURAS		ESTEREIS	
	HC	HF	IC	IF	CG	SO	XIC	XI
Média	4,42	3,14	3,19	2,47	2,88	1,87	2,47	1,89
Máximo	4,78	3,50	3,76	2,70	3,70	2,09	2,76	2,01
Mínimo	3,67	2,86	2,91	2,32	2,48	1,53	2,23	1,61

Na porção central do Quadrilátero Ferrífero, importante neste estudo, ocorre material muito hidratado com presença de goethita e limonita, onde encontram-se os

minérios mais porosos. Os valores de densidade são determinados utilizando em torno de cinco mil e quinhentas (5.500) amostras.

A Figura 2.12 e a Tabela 2.4 ilustram os valores médios de densidade para os materiais no setor central do QF.

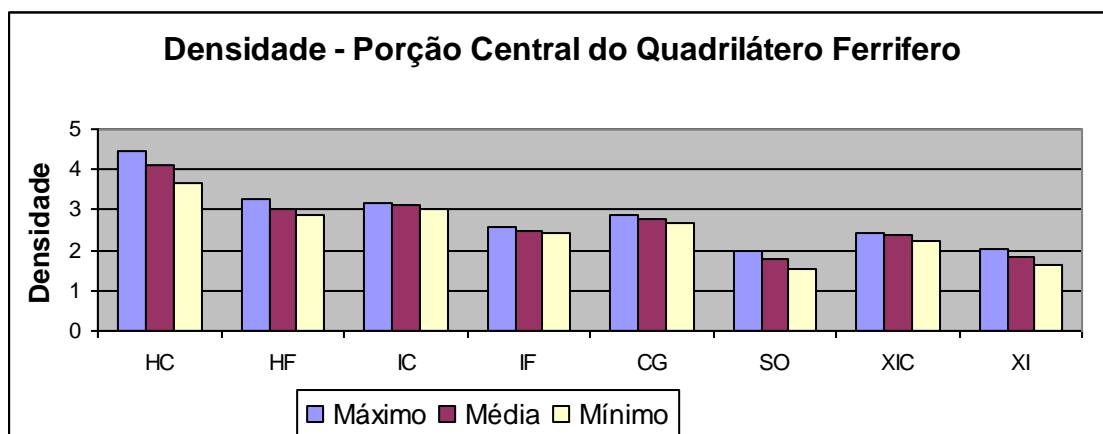


Figura 2.12 – Valores de densidade para rochas da porção central do Quadrilátero Ferrífero. (2006). HC – Hematita Compacta; HF – Hematita Friável; IC – Itabirito Compacto; IF – Itabirito Friável; CG – Canga; SO – Solo; XIC– Xisto Compacto; XI – Xisto.

Tabela 2.4 – Valores de densidade das hematitas, dos itabiritos, das coberturas e dos materiais estéreis nas áreas de minério de ferro da Vale na porção central do QF (2006).

Porção Central do Quadrilátero Ferrífero	HEMATITAS		ITABIRITOS		COBERTURAS		ESTEREIS	
	HC	HF	IC	IF	CG	SO	XIC	XI
Média	4,13	3,01	3,10	2,47	2,77	1,76	2,36	1,84
Máximo	4,44	3,27	3,17	2,56	2,89	1,98	2,43	2,01
Mínimo	3,67	2,86	3,00	2,44	2,66	1,53	2,25	1,61

## 2.4 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 do parâmetro desejado, conferindo-se a integridade do furo e sua profundidade total. Posteriormente, a sonda é içada até a superfície a uma determinada velocidade efetuando o registro dos parâmetros referentes ao sensor usado (Webber, 2008).

Sondas 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 esta radiação sozinha 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 a 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 (densidade) 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 na indústria mineral.

#### **2.4.1 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 de densidade quantitativa foram desenhadas com uma fonte colimada e um único detector colimado, sendo maioria das ferramentas equipadas com um mecanismo que prensava a fonte e o detector contra a parede do furo para minimizar o “gap” entre a parede do furo e a

sonda. O objetivo de minimizar este “gap” era de reduzir os erros causados pela presença de fluidos de perfuração entre a sonda e a parede da rocha.

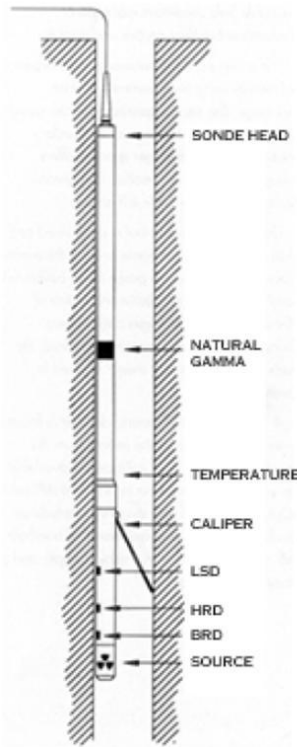
Conforme Nery (2003), o Perfil de Densidade registra continuamente as variações das massas específicas das rochas atravessadas por um poço e expressa suas medições em  $\text{g/cm}^3$ . No caso de rochas porosas, a medição realizada pelo perfil ( $\rho_B$ ) inclui tanto a densidade da matriz ( $\rho_m$ ) que constitui a rocha, como a do fluido contido no espaço poroso ( $\rho_f$ ).

A medição da densidade total ( $\rho_B$ ) 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 SWDS (Sidewall Density Gama), produzida pela Robertson Geologging Limited e constitui-se de uma fonte de Césio 137 de 3,7 GBq de atividade e 3 detectores de Na (Tl) cintilômetros, 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 2.13. Esta sonda utiliza detectores múltiplos que fornecem uma medida de densidade compensada acurada dentro de furos de sondagem.





Especificações	Dimensão
Diâmetro	50 mm
Comprimento	2.88 m
Peso	20 kg
Max. temperature	70°C
Max. pressure	20 MPa
Densidade	Tipo de detectores: NaI(Tl) cintilômetros
	Espaçamento entre detectores: 48cm (LSD) 24cm (HRD) 14 cm (BRD); Faixa de calibração de densidade (LSD): 1 a 3.0g/cc
Gama Natural	Detector: 50mm x 25mm NaI (Tl) cintilômetros
Caliper	Raio: 50 mm to 300 mm

\* A sonda adquirida pela UFRGS não apresenta o dispositivo para medição de temperatura.

Figura 2.13 – Sonda e componetes do equipamento de perfilagem gama-gama.

Na interpretação dos dados de perfilagem deste estudo foram utilizados apenas os resultados do detector HRD, devido aos dados deste detector terem a melhor resolução após vários testes de campo e escritório. Porém, para aplicações e trabalhos futuros, deve-se estudar melhor as influências e resultados nos outros detectores, a fim de ser obter verificações e correções de dados finais ainda mais precisos.

A seguir serão apresentadas algumas considerações teóricas sobre as partículas gama ( $\gamma$ ).

#### 2.4.1.1 Considerações Teóricas Sobre As Partículas Gama ( $\gamma$ )

Sabe-se que interações de dois tipos de radiação, raios gama ( $\gamma$ ) 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 densidade de rocha nos furos de sondagem.

Conforme Hearst, Nelson & Paillet (2000), o número de raios gama transmitidos no meio natural é função da densidade, da energia  $\gamma$  e do número atômico do meio. Conseqüentemente, o número de raios gama de diferentes energias detectados há uma certa distância por uma fonte artificial pode ser utilizado para inferir tais propriedades, caracterizando o método chamado de lagagem de densidade ou perfilagem gama-gama ( $\gamma$ - $\gamma$ ).

As partículas gama são emitidas quando um nuclídeo muda de um estado para outro com baixa energia. Depois que partícula ou raio foi emitida, ela interage com a 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  $\alpha$  e  $\beta$ . 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  $\alpha$  e  $\beta$  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.

#### **2.4.1.2 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, Nelson & Paillet, 2000). A energia em que cada interação destas é dominante depende não somente da energia, 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 2.14 ilustra estas relações.

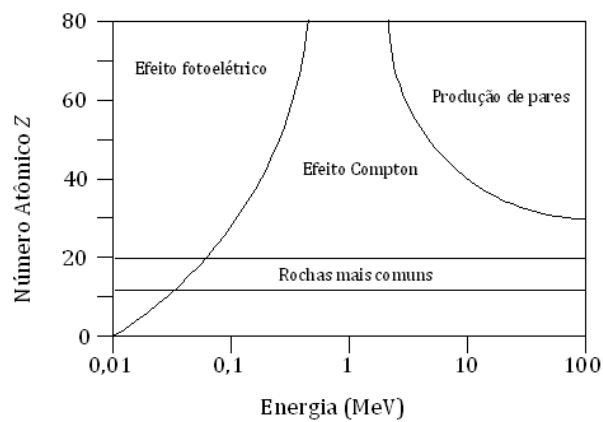


Figura 2.14 – Interações dos raios gama com o meio.

Conforme Webber (2008), o efeito fotoelétrico resulta da interação de um raio gama com um átomo do material (Figura 2.15). 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 100 keV) que é dependente do número atômico do material.

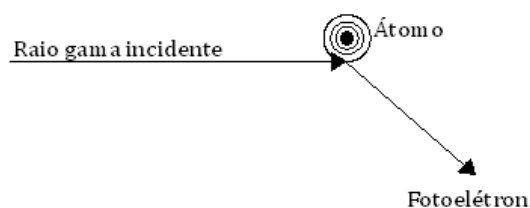


Figura 2.15 – Interações dos raios gama com o meio – efeito fotoelétrico.

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 1,3 MeV) e as rochas. Daí a preferência pela fonte de Césio 137 de 0,667 MeV 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 2.16). 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.

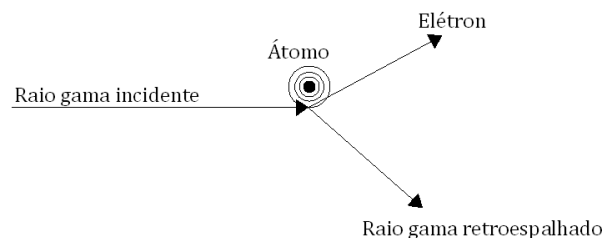


Figura 2.16 – Interações dos raios gama com o meio – efeito Compton.

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 2.17).

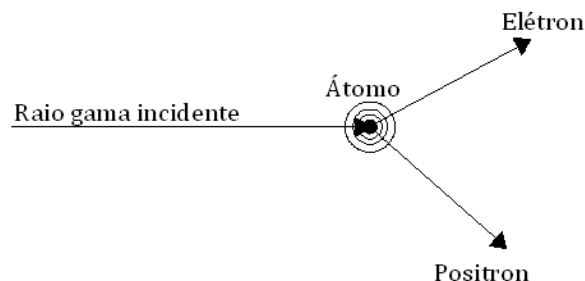


Figura 2.17 – Interações dos raios gama com o meio – produção de pares.

### 2.4.1.3 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 :

$$I_f = I_o . e^{-\mu . x . \rho e}$$

sendo,  $I_f$  a intensidade do feixe radioativo a ser registrada no detector,  $I_o$  a Intensidade do feixe radioativo na fonte,  $\mu$  é o coeficiente de absorção de massa do meio onde ocorre a interação,  $x$  a distância entre a fonte e o detector; e,  $\rho e$  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,  $\rho e$ , 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.

A Figura 2.18 ilustra a função resposta usual para a utilização em 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 (A). Conforme a densidade do material aumenta, a contagem registrada também aumenta até um valor máximo (de A para B), a partir do qual haverá redução da contagem retro-espalhada (de B para C), já que existe grande quantidade de matéria entre a fonte e sensor impedindo que parte da radiação atinja o cintilômetro (leitura do equipamento).

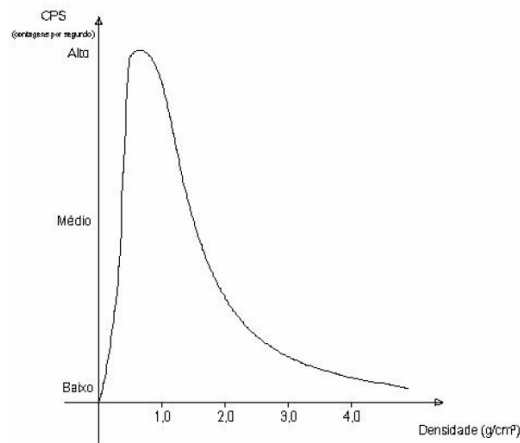


Figura 2.18 – Função resposta usual para a utilização em perfilagem geofísica gama-gama.

Para que este relacionamento seja 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 da Figura 2.18, pode-se estimar as densidades dos materiais atravessados pela sonda. A melhor forma de definir a função de resposta da sonda de densidade é em laboratório, utilizando-se corpos de prova com densidade conhecida 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 de 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 utilizado foi gerada com base nos valores de densidade das rochas perfiladas nos testes nos furos de sondagem.

## 2.5 Fatores Que Influenciam Os Dados De Perfilagem Gama-Gama

Entre os fatores mais importantes que podem causar erros significativos na medida e estimativa de densidade de um furo de sondagem estão o decaimento radioativo da fonte, o efeito Z/A, o efeito da lama/reboco e da rugosidade da parede do furo, efeitos da água, efeito da argilosidade, velocidade de aquisição dos dados, radiação natural de fundo, entre outros. Conforme dito anteriormente, estes erros poderão ser melhor estudados, conhecidos, minimizados e corrigidos com base na construção de curvas de calibração (ábacos) a partir dos dados gerados em uma campo de calibração controlado.

### 2.5.1 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  $\lambda \cdot t$  onde  $\lambda$  é conhecida por constante de decaimento do nuclídeo.

Podemos calcular a atividade de uma amostra, ou o número de decaimentos por unidade de tempo de acordo com:

$$\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N_i \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Portanto, a atividade de uma fonte radiativa decai exponencialmente com o passar do tempo.

Conforme Scott (1977), uma correção de intensidade da fonte deve ser feita se a intensidade da fonte de raios gama se modificar 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.

### 2.5.2 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 pesos atômicos (A) dos elementos constituintes das rochas. 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 ( $\rho_e$ ) e a densidade natural da rocha ( $\rho_B$ ) é dada por:

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

Na Tabela 2.5 são ilustrados diversos valores de C para alguns elementos mais comuns.

Tabela 2.5 – Diversos valores de C para alguns elementos mais comuns.

ELEMENTO	A	Z	C
H	1,01	1,00	1,9841
C	12,00	6,00	0,9999
O	16,00	8,00	1,0000
Na	22,99	11,00	0,9569
Mg	24,32	12,00	0,9868
Al	26,98	13,00	0,9637
Si	28,09	14,00	0,9968
S	32,07	16,00	0,9978
Cl	35,46	17,00	0,9588
K	39,10	19,00	0,9719
Ca	40,08	20,00	0,9980

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 ( $\rho$ ) seja aproximadamente igual a  $\rho_B$ . No entanto, outros materiais (saís, carvão ou mesmo gás) fazem com que os valores medidos  $\rho$  se afastem bastante de  $\rho_B$ , 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.

### 2.5.3 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 calíper, 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 lama/reboco logo após à saída da fonte, iniciam atecipadamente 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 3,00 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente (Figura 2.19) e diâmetros de furos nestes blocos de 5,08, 7,62, 12,70 e 20,32 cm. 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 gap (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 1,3 cm foram instaladas nos furos e medidas foram tomadas com e sem água.

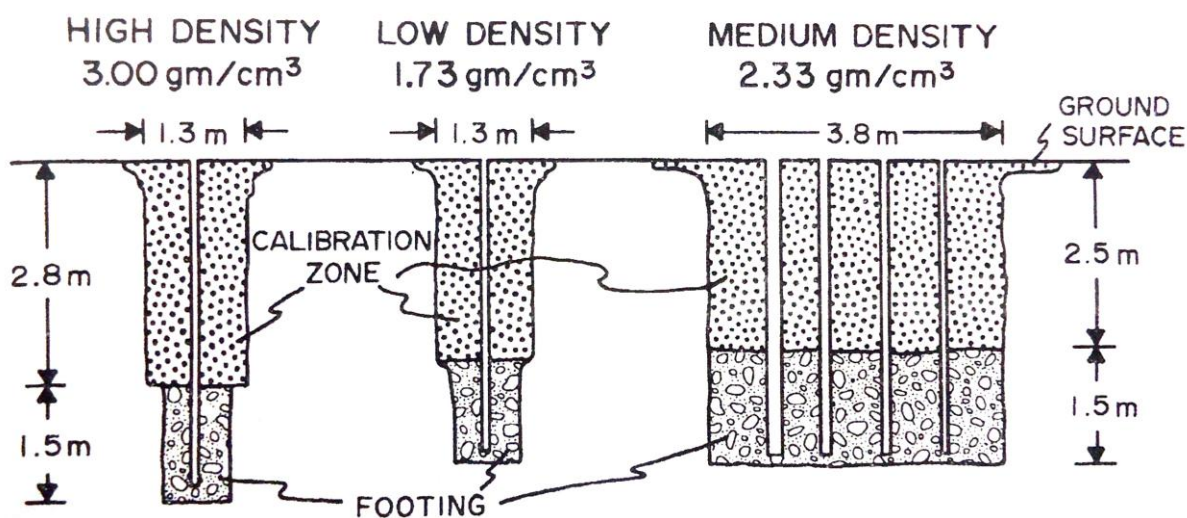


Figura 2.19 – Campo de calibração no U.S Bureau of Mines, no Colorado.

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 (gap), 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 correções 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 (near detector) foi mais influenciado pela presença da rugosidade da parede e reboco de lama do que o detector mais distante da fonte (far detector). Conforme Nery (2003), o detector mais distante da fonte é mais afetado pelos elétrons das rochas.

As rochas estão caracterizadas por sua  $\rho_B$  e ZB (média do número atômico). O reboco que se interpõe na trajetória fonte-rocha-detector introduz os parâmetros  $\rho_{mc}$  (densidade do reboco),  $Z_{mc}$  (número atômico do reboco) e  $t_{mc}$  (ou  $h_{mc}$  a 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, gaps e espessura de lama/reboco.

Nos gráficos de “espinha e costela” (Figura 2.20), a linha entre os pontos diagonais representa zero de gap 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 gaps e espessura de lama para densidades específicas, sendo chamadas costelas (*ribs*).

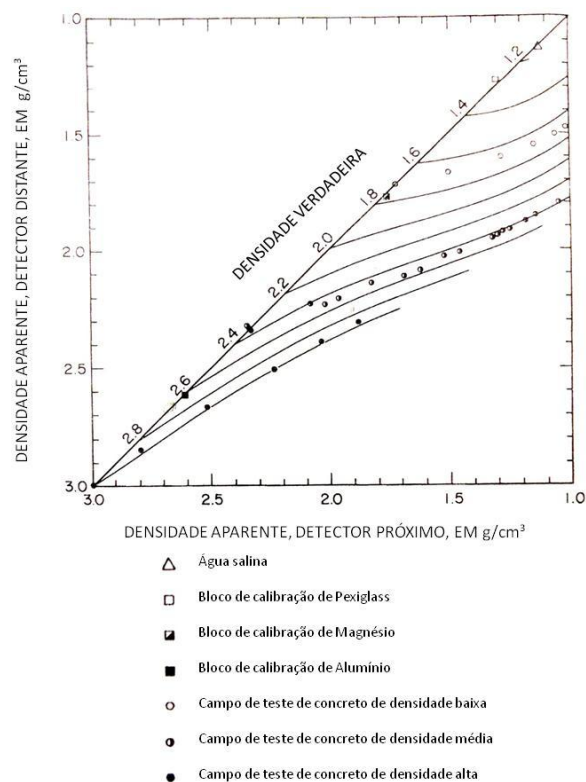


Figura 2.20 – Exemplo de gráfico de espina e costela (modificado Scott, 1977).

Conforme Nery (2003), com a calibração em diferentes pontos e com diferentes materiais que se interpoem entre a fonte e os detectores, cada detector mostra uma razão de crescimento/decaimento da leitura dependendo do material que está interposto, que é diferente de sua razão de crescimento/decaimento somente em função de  $\rho_B$ .

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 gaps para um valor máximo de  $0,22 \text{ g/cm}^3$  para rochas com densidade alta e valores de gaps maiores.

Em se tratando dos 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 necessário 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.

#### **2.5.4 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 medidos 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.

Em futuros trabalhos, deve-se estudar mais detalhadamente os efeitos da água dentro do furo de sondagem, com medições do nível d'água nos furos.

#### **2.5.5 Argilosidade**

O último problema a ser discutido é o da 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  $\rho_B$  (Nery, 2003).

Tais efeitos serão corrigidos facilmente através dos métodos modernos de interpretação quantitativa, principalmente quando usamos 2 ou 3 perfis de porosidade ao mesmo tempo.

### **2.5.6 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 (ou tempo constante), a 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.

### **2.5.7 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 em futuros trabalhos. 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.

## 2.6 Volume De Investigação, Resolução Horizontal/Vertical e Penetração Dos Raios Gama No Meio Natural

Conforme Webber (2008), o desenvolvimento de sondas leva em consideração diversos conceitos, sendo os mais importantes o volume de investigação, a resolução vertical e a profundidade de investigação (Figura 2.21). Esses conceitos estão interligados, sendo que a mudança do valor de um afeta os outros.

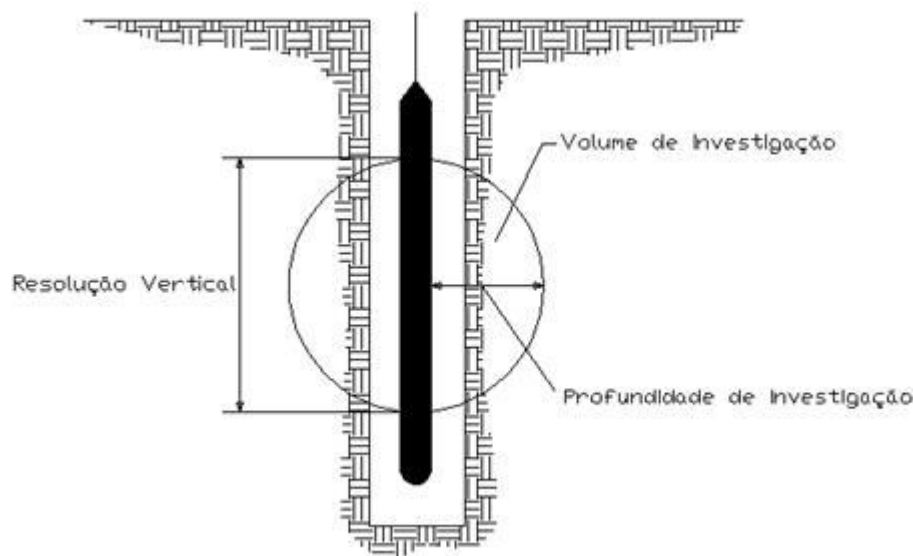


Figura 2.21 - Três importantes conceitos da perfilagem geofísica (Oliveira, 2005).

Alguns autores estudaram a resposta espacial de ferramentas de densidade compensada, como os exemplos dos trabalhos de Petler (1990) e Mendoza (2006). Os trabalhos descrevem métodos para melhorar a resolução vertical para ferramentas compensadas, porém assumem necessariamente uma continuidade horizontal na profundidade de cada detector e características dos efeitos constantes no furo (não levam em conta os efeitos de rugosidade e lama/reboco). Muitas técnicas não levam em consideração, por exemplo, o ângulo entre o furo de sondagem com grande desvio e as camadas naturais das rochas.

A colimação é uma ferramenta para direcionar o fluxo de algum feixe radioativo para algum local específico das formações ou para captar alguma informação de algum local específico. A Figura 2.22 mostra como diferentes colimações afetam a forma do volume de investigação e o alcance da profundidade de investigação. Esse é um conceito



que não afeta todas as sondas de perfilagem geofísica, pois muitas delas não precisam de nenhum tipo de colimação, porém, a sonda usada neste trabalho depende da colimação.

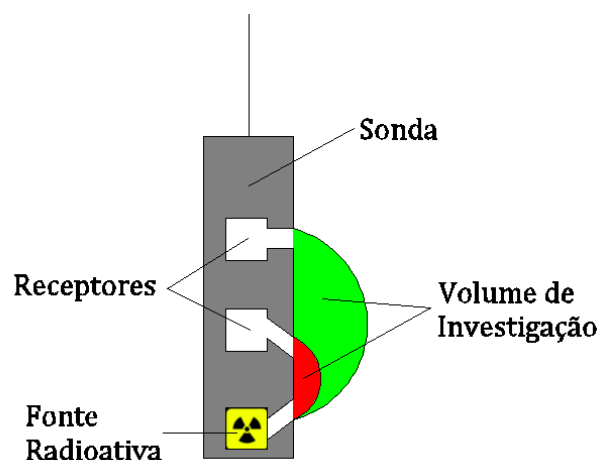


Figura 2.22 – Efeito de diferentes colimações no volume de investigação e profundidade de investigação (Webber, 2008).

Na Figura 2.22 pode-se notar que a colimação da fonte radioativa (que serve para emitir um feixe radioativo na direção das formações) e a colimação do receptor mais próximo da fonte (cuja função é medir o resultado da interação entre a radiação da fonte e as formações) fizeram com que o formato do volume de investigação fosse elipsoidal, enquanto que a colimação do receptor mais afastado da fonte gerou um volume de investigação mais próximo do esférico (Webber, 2008).

Com base nos conceitos ilustrados anteriormente, Petler (1990) estudou os efeitos relacionados à profundidade de investigação, a resolução vertical e aos contatos litológicos no Modelo de Monte Carlo, que simula as interações e padrões seguidos por fótons individuais a partir da fonte até o detector. As simulações mostram que o caminho percorrido pelos fótons individuais pode evidenciar a profundidade de investigação no meio, porém estatisticamente é necessário uma amostragem maior para representar uma resposta mais precisa. A Figura 2.23 ilustra o padrão bidimensional dos fótons alcançando o detector mais longe da fonte para uma formação homogênea com  $2,5 \text{ g/cm}^3$  de  $\text{CaCO}_3$ . Nota-se que uma profundidade menor que 10 cm é investigada neste caso.

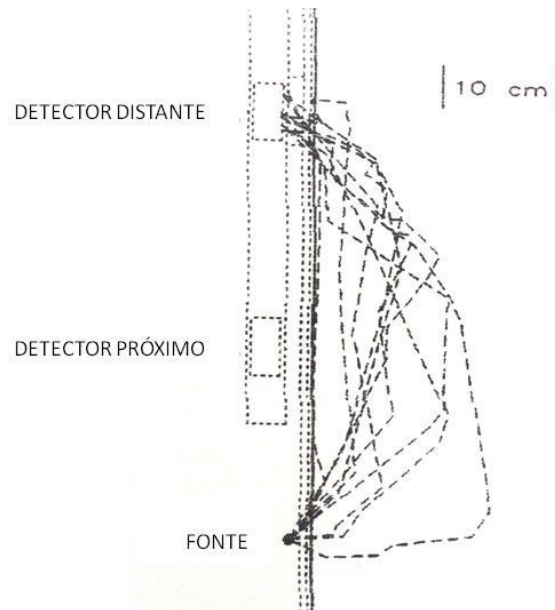


Figura 2.23 – Padrão bidimensional dos fótons alcançando o detector mais longe da fonte para uma formação homogênea com  $2,5 \text{ g/cm}^3$  de  $\text{CaCO}_3$  (modificado de Petler, 1990).

Também neste estudo e com o mesmo tipo de material, Petler (1990) (Figura 2.24) verificou uma tendência geral de aumento de interações com o decaimento da energia nos dois detectores, sendo que os fótons que atingem o detector mais longe da fonte também tendem a gerarem um maior número de colisões. Ou seja, no detector mais longe da fonte tem-se uma amostragem do fenômeno um pouco melhor.

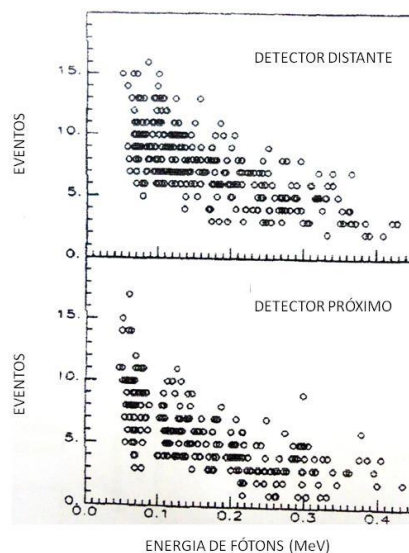


Figura 2.24 – Número de interações de fótons nos detectores (modificado de Petler, 1990).

A Figura 2.25 ilustra a média do número de interações por fóton detectado em diferentes níveis energéticos, evidenciando que se tem uma diminuição do número de interações à medida que a densidade diminui. Isto mostra que quanto maior a densidade do meio, mais interações deve-se esperar e menor deverá ser a resposta no detector (retroespalhamento baixo), e vice-versa.

FORMAÇÃO	ENERGIA (keV)	TODOS EVENTOS	COMPTON NA FORMAÇÃO
CaCO <sub>3</sub> 2.71	>150	5.7±.2	5.0±.2
	<100	10.0±.3	8.3±.3
CaCO <sub>3</sub> 2.23	>150	5.3±.1	4.6±.1
	<100	9.7±.2	7.8±.2
20pu SiO <sub>2</sub> (2.32g/cc)	>150	5.3±.3	4.6±.3
	<100	11.8±.5	9.7±.4

Figura 2.25 – Número médio de interações por fóton detectado em diferentes intervalos de energia (modificado de Petler, 1990).

Petler (1990) também utilizou o número total de colisões Compton entre vários pontos há várias distâncias da parede do furo para definir a profundidade de investigação. A Figura 2.26 ilustra os limites de 50% e 90% no detector mais distante da fonte e alcance nas diversas densidades. Os resultados mostram que, dependendo da densidade, 50% do sinal que volta ao detector penetra no máximo de 8 cm no meio investigado e que 90% penetra no máximo de 12 cm no meio investigado.

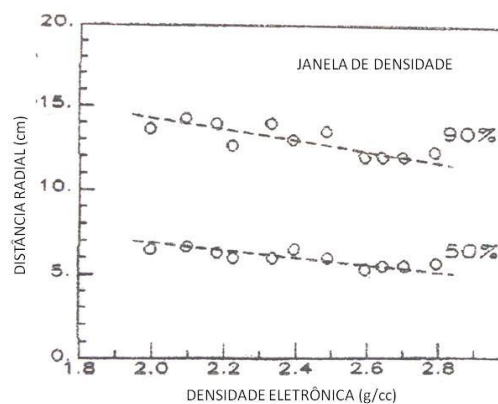


Figura 2.26 – Profundidade das respostas radiais (modificado de Petler, 1990).

Em se tratando do mapeamento de contatos e interfaces litológicas, Petler

(1990) mostrou que a resposta fotoelétrica em contatos horizontais de areia e calcário diferem conforme a direção de perfilagem, devido à dependência do fenômeno no número atômico. A Figura 2.27 ilustra este comportamento. Nota-se que a aquisição da informação na perfilagem gera uma morfologia diferente no contato quando o perfil passa de um meio mais denso para um menos denso, e vice-versa.

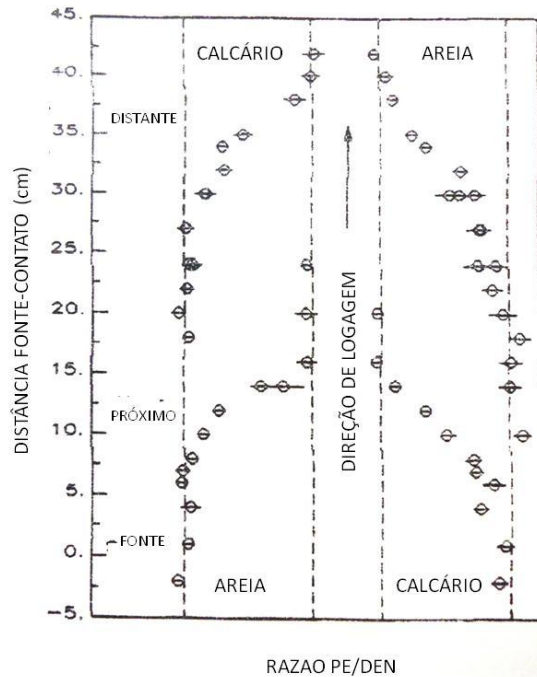


Figura 2.27 – Resposta fotoelétrica no contato horizontal (modificado de Petler, 1990).

Os resultados nos estudos de Petler (1990) fornecem uma boa resolução da resposta espacial para os fenômenos medidos no perfil de densidade. Um estudo similar deverá ser desenvolvido no minério de ferro, para melhor compreender os efeitos citados anteriormente nos dados provenientes das mineralizações ferríferas.

## 2.7 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 do furo, 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 de qualidade visual onde zonas de extrema rugosidade são identificadas e retiradas dos cálculos de densidade, já que, conforme já 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, 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 scatterplot 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 20 Mt de minério, o que implica, obviamente, no planejamento de mina e no lucro.

Alguns problemas existem nas medidas de densidade para as formações ferríferas com densidades altas, em torno de 4 - 5 g/cm<sup>3</sup>, que resultam em retroespalhamento baixo no detector. Nestes casos deve-se ter uma calibração perfeita da ferramenta de densidade, inclusive utilizando um caliper de 3 braços para melhorar a informação sobre a rugosidade do furo e a validação dos dados de densidade. O mais importante em utilizar um caliper de 3 braços seria no cálculo e aplicação da curva de regressão para correção de todos os dados de densidade coletados. Estas correções incluem a eliminação dos valores de densidade nos locais onde a condição das paredes dos furos seja extremamente ruim.

Já o trabalho de Butt e Fullagar (2001) foi realizado no Yandicoogina Channel Iron Deposit (CID) na Austrália. É um depósito de estrutura simples, caracterizado por um placer de pisolitos de goethita-hematita, com extensão lateral e cerca de 75m de espessura.

O depósito é avaliado por descrição geológica, amostragem de furos de sondagem e perfilagem geofísica, onde uma grande quantidade de informações geológicas, geoquímicas e geofísicas são acumuladas rapidamente. A interpretação dos dados é lenta, subjetiva e não explora bem todos os dados e a reinterpretação dos dados também se provou extremamente lenta.

O software LogTrans foi utilizado para aumentar a velocidade, a objetividade, a consistência, a exploração total da informação e a flexibilidade na avaliação. Este software utiliza a interpretação automatizada baseada na análise multivariada e foi usado na fase de reinterpretação dos dados. O algoritmo do LogTrans pode ser descrito como uma generalização da análise de scatterplot para dimensões múltiplas.

Conforme a classificação geológica do depósito de CID, o mesmo inicia com material bastante intemperizado até aproximadamente 10m de profundidade (estéril). A zona mineralizada é dividida em uma zona mais hematítica no topo (aproximadamente 20m de espessura) e uma zona mais goetítica na base (aproximadamente 25m de espessura). Na base do pacote, ocorre uma zona mais pobre classificada como estéril.

Na avaliação de recursos, os furos de sondagem são realizados em malha de 50m x 50m para a definição do recurso medido, sendo todos os furos perfilados rotineiramente com gama natural, susceptibilidade magnética, caliper e densidade. A razão entre densidade e gama natural é utilizada para facilitar a discriminação das zonas de alto teor, pois nestes locais a densidade tende a aumentar e gama natural tende a diminuir.

Os resultados de densidade ilustram uma boa separação entre os materiais de 1 a 4 (estéril), os materiais intermediários ricos de 5 a 14, com densidade de 3,2 a 3,4 g/cm<sup>3</sup> e os materiais da base do pacote de 15 a 17 (estéril), com densidade de 2,8 a 3,0 g/cm<sup>3</sup>. Porém, não ocorre boa discriminação dentro dos pacotes.

## **Capítulo 3**

### **Geologia Regional e Local**

O trabalho de geofísica aplicada aqui desenvolvido foi realizado no Sinclinal Gandarela no Quadrilátero Ferrífero (QF), estado de Minas Gerais, Brasil, nos Alvos Dois Irmãos e Maquiné. O Supergrupo Minas é a porção estratigráfica do QF onde foram testados os métodos de perfilagem geofísica gama-gama.

A geologia regional e geologia local da área serão abordadas neste capítulo.



### **3.1 Geologia Regional**

Do ponto de vista geotectônico, o Quadrilátero Ferrífero está inserido na Província São Francisco, como pode ser observado na Figura 3.1, situando-se no extremo sul da área ocupada pelo Cráton de mesmo nome (Almeida 1977, Almeida & Hassuy 1984) e corresponde a um fragmento crustal poupado, em parte, da Orogênese Brasileira, a qual abriga em seus domínios jazidas de ferro, ouro e outros recursos minerais.

#### **3.1.1 Trabalhos Anteriores**

Desde os estudos pioneiros de Eschwege (1822, 1832, 1833), Gorceix (1881, 1884) e Derby (1881, 1906), o Quadrilátero Ferrífero tem sido alvo de estudos geológicos dos mais variados. Na primeira metade do século XX, surgiu uma série de publicações que, entre outras contribuições, terminou por estabelecer uma primeira coluna estratigráfica para a região, sendo que o avanço mais considerável para o conhecimento geológico da região foi atingido durante as atividades do convênio USGS-DNPM, nas décadas de 50 e 60. Este trabalho permitiu a cartografia da região na escala 1:25.000 e levou a consolidação de um modelo da evolução geológica compilado por Dorr (1969), que serviu de ponto de partida para todos os estudos posteriores.

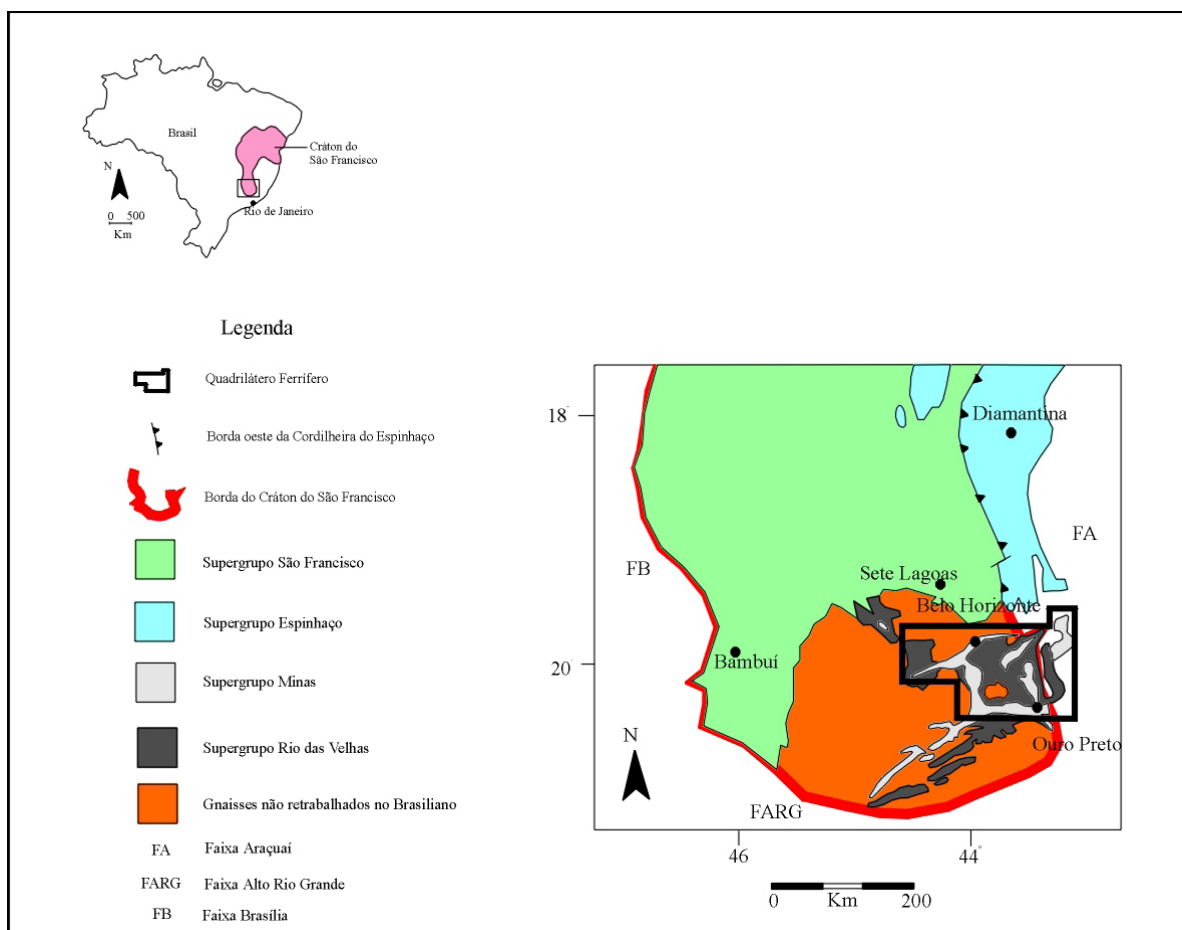


Figura 3.1 - Mapa de localização, mostrando a inserção do Quadrilátero Ferrífero na porção meridional do Cráton do São Francisco. ( Marshak e Alkmim, 1989).

Informações a cerca da evolução do conhecimento geológico do Quadrilátero Ferrífero, de sua estratigrafia e do arranjo estrutural das unidades rochosas que o compõem, podem ser buscadas, a partir dos trabalhos de Dorr II et al.(1957), nas sínteses elaboradas por Dorr (1969), Ladeira & Viveiros (1984), Marshak & Alkmim (1989) e Chemale Jr. et al.(1994), entre outros.

Segundo Dorr (1959), o Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais foi assim denominado por Gonzaga de Campos, devido aos vastos depósitos de minério de ferro que ocorrem numa área limitada aproximadamente pelas linhas que ligam Itabira, Rio Piracicaba, Mariana, Congonhas do Campo, Casa Branca e Itaúna, englobando unidades litoestratigráficas cujas idades estendem-se do Arqueano ao Proterozóico Superior, ocupando uma superfície de 7000 km<sup>2</sup>.

A geologia do Quadrilátero Ferrífero (QF) é bastante complexa. Há no mínimo três séries de rochas sedimentares separadas por discordâncias principais. As rochas da área encontram-se dobradas, falhadas e foram metamorfasadas em graus variáveis (Dorr, 1959).

O Cráton do São Francisco é, em grande parte, resultado do retrabalhamento em eventos posteriores de um maior e mais antigo núcleo estável, denominado Cráton Paramirim, de idade pré-transamazônica (Almeida 1981). Durante o Evento Brasileiro (640-450 Ma), foram geradas faixas de dobramento que hoje margeiam e definem a forma do Cráton do São Francisco.

### 3.1.2 Estratigrafia

As unidades litoestratigráficas que compõem o Quadrilátero Ferrífero são: o Embasamento Cristalino (Complexos Metamórficos com idades de 3,2-2,9 Ga), o Supergrupo Rio das Velhas (rochas metavulcânicas e metassedimentares), o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi. Localmente, são observadas bacias terciárias como Fonseca e Gandarela.

A Figura 3.2 ilustra a coluna estratigráfica do QF.

O **Supergrupo Minas**, o qual hospeda as rochas perfiladas neste estudo, representa uma seqüência metassedimentar de idade paleoproterozóica constituída por filitos, xistos, quartzitos, dolomitos e itabiritos, assentada discordantemente sobre rochas do embasamento ou do Supergrupo Rio das Velhas (Derby, 1906, Harder & Chamberlin, 1915; Guimarães, 1931 e 1951; Lacourt, 1936; Dorr, 1969; Ladeira, 1980; Chemale Jr. et al., 1991; Marshak & Alkmim, 1989; Alkmim & Marshak, 1998).

O Grupo Caraça representa a seqüência clástica basal e é dividido em duas formações: Moeda e Batatal. A Formação Moeda está na base e é formada por metaconglomerados, filitos, quartzitos de grão fino a grosso com conteúdos variáveis de sericita, organizados em três unidades informais. A Formação Batatal é constituída majoritariamente por filito sericítico e também por metachert, formação ferrífera e filito grafitoso.

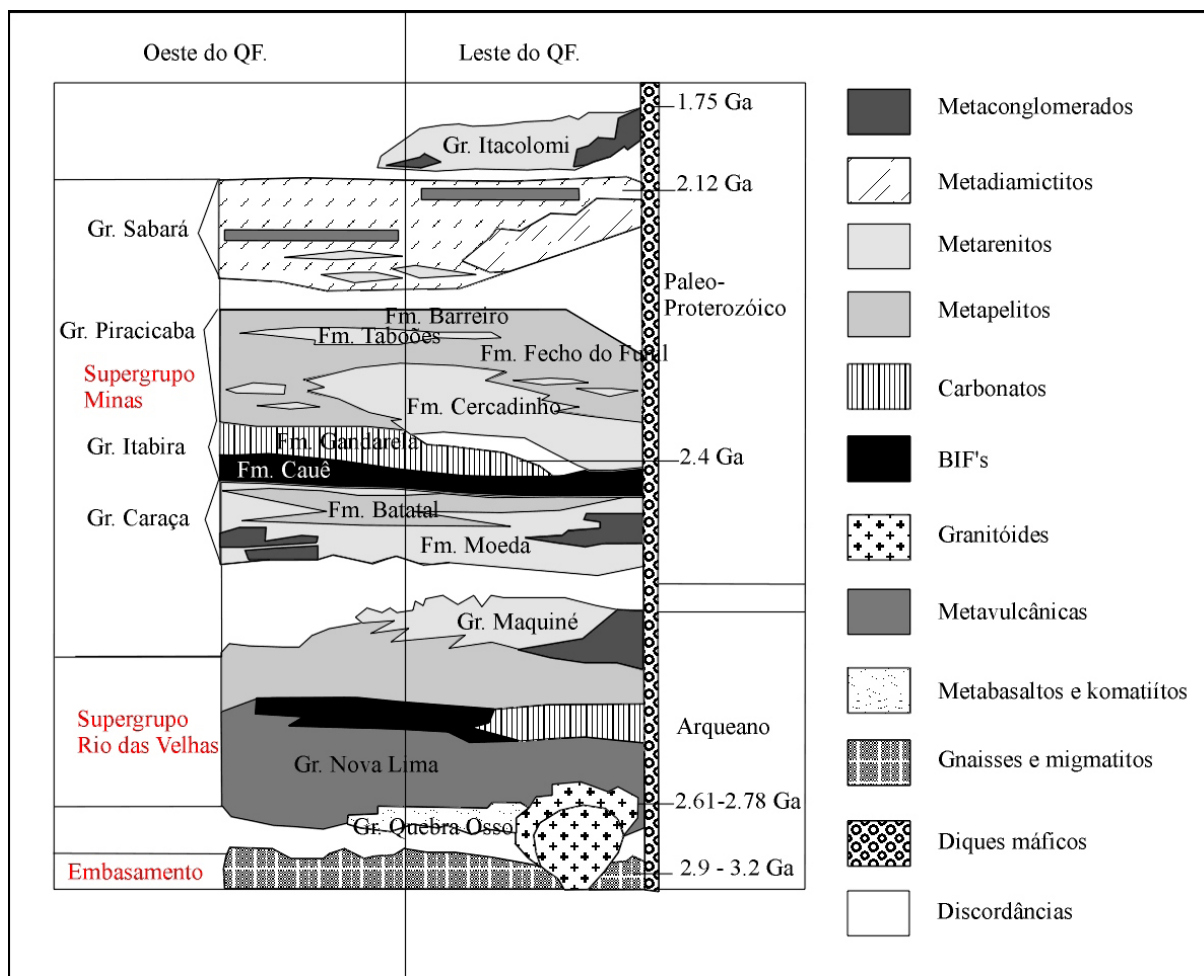


Figura 3.2 - Coluna estratigráfica proposta para o Quadrilátero Ferrífero, modificada. (Alkmin & Marshak, 1998).

O Grupo Itabira constitui a seqüência química intermediária, sendo também dividido em duas formações: Cauê e Gandarela. A Formação Cauê está na base do grupo e é formada quase que exclusivamente por itabiritos e corpos ricos em hematita, sendo explorada como minério de ferro. Estes itabiritos podem ser diferenciados pela mineralogia, granulometria e composição química. Na borda leste do Quadrilátero Ferrífero, devido aos dobramentos e falhamentos, em regime de encurtamento crustal, os itabiritos têm grande potencial, e.g., mina de Alegria - VALE. Acima e em contato gradacional está a Formação Gandarela constituída por dolomito, formação ferrífera, marga, filito dolomítico e filito.

O Grupo Piracicaba é a seqüência clástica de topo, sendo dividido em quatro formações, da base para o topo: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A

Formação Cercadinho é composta por quartzitos, quartzitos ferruginosos, metaconglomerado basal com fragmentos subarredondados, filitos ferruginosos, filitos prateados, filitos dolomíticos e dolomitos que têm como característica a intercalação em estratos métricos a centimétricos. A Formação Fecho do Funil é constituída por filitos dolomíticos, filitos, itabiritos e dolomitos impuros. A Formação Taboões consiste, essencialmente, de ortoquartzitos finos e equigranulares. A Formação Barreiro é composta, predominantemente, por filitos e filitos grafitosos.

O Grupo Sabará, topo do Supergrupo Minas (Figura 3.2), é constituído de clorita-xistos, biotita-xistos, metagrauvas, quartzitos, quartzitos feldspáticos, formações ferríferas, itabiritos e metaconglomerados com matacões e seixos de dolomito (Barbosa, 1968), representando uma seqüência de rochas imaturas com contribuição vulcanogênica (Renger et al., 1994). As rochas deste grupo afloram em quase todo o Quadrilátero Ferrífero. Repousam diretamente sobre as diferentes formações do Grupo Piracicaba e têm espessura máxima de 3700 m (Dorr, 1969).

## **3.2 Geologia Local**

Seguem as descrições da geologia local dos alvos onde foram realizadas as campanhas de perfilagem geofísica gama-gama. Os estudos foram executados no Sinclinal Gandarela (Figura 1.3), na porção nordeste (Alvo Dois Irmãos) e na porção sudoeste (Alvo Maquiné).

### **3.2.1 Sinclinal Gandarela**

O Sinclinal Gandarela (Dorr 1969) é definido pelas unidades do Supergrupo Minas, em contato com as sequências do Supergrupo Rio das Velhas e sua porção norte, com o complexo metamórfico Caeté (Figura 3.3).

O Sinclinal Gandarela se orienta segundo a direção NE-SW, com estilos estruturais distintos a sudoeste e a nordeste. No segmento sudoeste, o eixo se bifurca para sul, com caimento para norte e para oeste, com caimento para ENE. No outro segmento, o caimento é para SW.

As áreas do levantamento de perfilagem geofísica gama-gama (Figura 1.3) recobrem rochas mapeadas como sendo do Supergrupo Minas e do Supergrupo Rio das Velhas no Sinclinal Gandarela, tendo sua estratigrafia detalhada na Figura 3.4.

O Supergrupo Minas é o alvo principal deste estudo, pois nele se encontram as hematitas e itabiritos da Formação Cauê do Grupo Itabira.

Os mapas geológicos da região do Alvo Dois Irmãos (Figura 3.12) e do Alvo Maquiné (Figura 3.13) contém o detalhamento das litologias que compõem os Grupos Itabira, Piracicaba e Caraça, e as litologias do Supergrupo Rio das Velhas, onde foi realizado o levantamento de perfilagem geofísica gama-gama (Dorr, 1969).

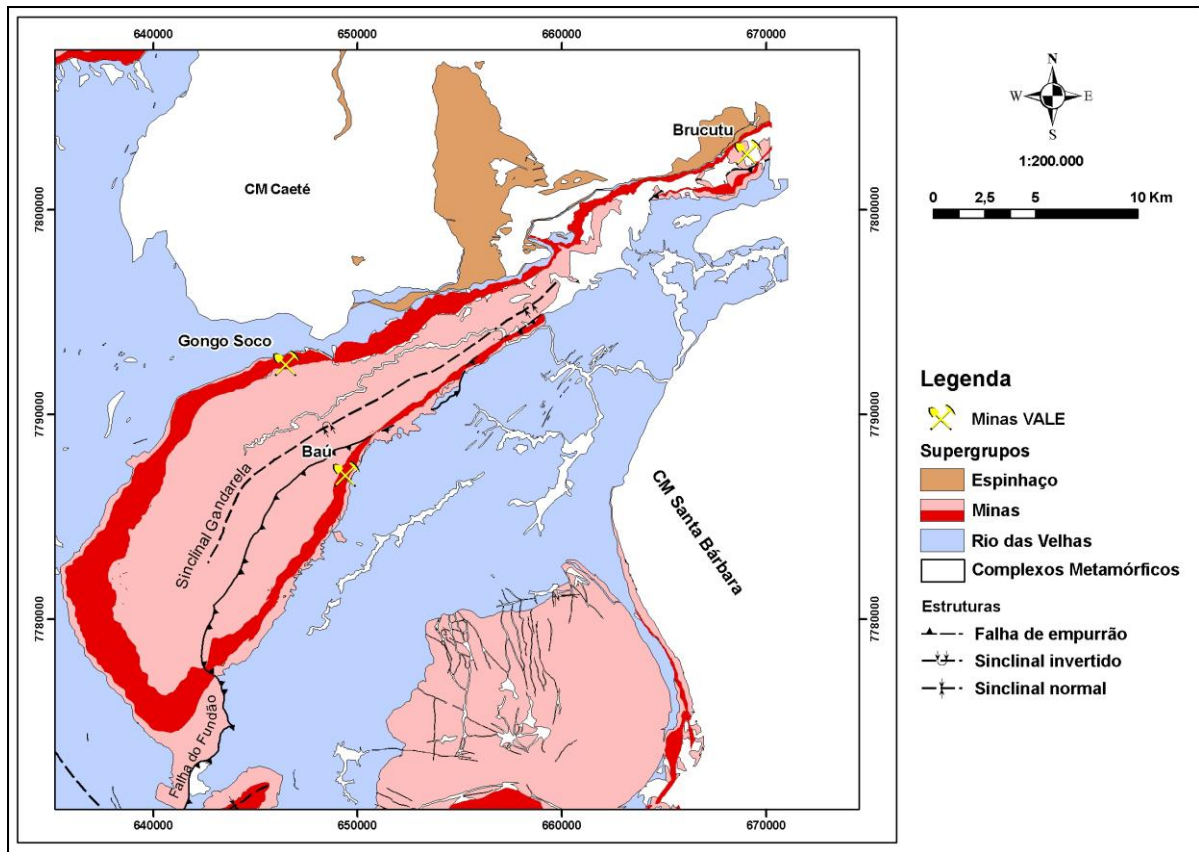


Figura 3.3: Mapa geológico da região do Sinclinal Gandarela, Modelo de Dorr (1969).(Braga, 2009).

Idade	Supergrupo	Grupo	Formação	Tipo de rocha
Quaternário			Canga	Hematita cimentada limonitizada e itabirito fragmentados.
		Grupo Piracicaba	Indefinida	Quartzitos, filitos a filitos silicosos
Proterozóico	Supergrupo Minas	Grupo Itabira	Formação Cauê	Formação ferrífera (itabiritos duros, fráveis, pulverulentos e corpos de hematita compacta)
			Formação Batatal	Filitos carbonosos
		Grupo Caraça	Formação Moeda	Quartzitos, Sericita-quartzito com lentes de conglomerados e quartzitos sericiticos
Arqueano	Supergrupo Rio das Velhas/Embasamento Cristalino			Leucognaises, biotita-gnaisses, muscovita-gnaisses, termolita-xistos e granitóides Predominantemente talco xisto, clonita xistos e quartzo-clonita xisto

Figura 3.4: Estratigrafia da região do levantamento por perfilagem geofísica gama-gama.

### 3.2.2 Principais Tipos De Materiais Ricos Em Ferro

Os principais tipos de materiais ricos em ferro encontrados na região do Sinclinal Gandarela onde foram realizados o levantamento de perfilagem geofísica gama-gama são:

**Hematita Friável (HF):** os corpos de hematita friável ocorrem como corpos lenticulares, com espessura variando de alguns metros a dezenas de metros (Figura 3.5 a e b). Contêm aproximadamente 65% de Fe, densidade de  $3.1 \text{ g/cm}^3$  e são ricos em especularita. Seus contatos com os outros tipos são bruscos e marcados por discontinuidades nos teores de ferro e de contaminantes.



(a)



(b)

Figura 3.5: Corpos de hematita friável (a), ricos em especularita (b) na região do Baú Gandarela (Braga, 2009).

**Hematita Compacta (HC):** possui estrutura maciça ou foliada e contém aproximadamente 93% de partículas acima de 8mm. A espessura dos corpos varia de poucos metros até cerca de 50 m, o teor médio de Fe é de cerca de 67%, e possui



densidade de  $4.7 \text{ g/cm}^3$  (Figura 3.6 a e b). Seus contatos com os outros tipos são abruptos. Não ocorre nos furos perfilados.



(a)

(b)

Figura 3.6: Corpos de hematita compacta (a e b), na região do Baú - Gandarela (Braga, 2009).

**Hematita Goethítica (HGO):** hematita hidratada, rica em goethita, que ocorre, geralmente, associada com os itabiritos goethíticos. Pode ter sido gerada pela concentração supergênica do IGO, embora os contatos com estes sejam marcados pela variação abrupta no teor de ferro. É friável e tem, em média, 64% de Fe, possui densidade de  $3.1 \text{ g/cm}^3$  e altos teores de fósforo (Figura 3.7).



Figura 3.7: Corpo de hematita goethitica, na região do Baú - Gandarela (Braga, 2009).

**Itabirito Goethítico (IGO):** itabirito hidratado, rico em goethita. Possui teor médio de Fe em torno de 52%, possui densidade de  $2.59 \text{ g/cm}^3$  e altos valores de fósforo (Figura 3.8). Apresentam-se friáveis e possuem espessura que varia de poucos metros a até mais de 100 metros. Podem representar antigos itabiritos carbonáticos ou anfibolíticos, já totalmente decompostos pela ação do intemperismo;



Figura 3.8: Corpo de itabirito goethítico, na região do Baú – Gandarela (Braga, 2009).

**Itabirito Friável (IF):** com teores baixos de ferro (em torno de 47%), possui densidade de  $2.68 \text{ g/cm}^3$  (Figura 3.9 a e b). É constituído, principalmente, por especularita e quartzo e foi formado pela desagregação supergênica de itabiritos compactos;



(a)



(b)

Figura 3.9: Corpos de itabirito friável (a e b), na região do Baú - Gandarela (Braga, 2009).



**Itabirito Compacto (IC):** corpos pequenos a médios, métricos e decamétricos podem ser encontrados em meio ao IF. O teor de Fe é baixo (em torno de 40%,) possui densidade de  $3.1 \text{ g/cm}^3$  e possui aproximadamente 90% de partículas acima de 8mm (Figura 3.10 a e b).

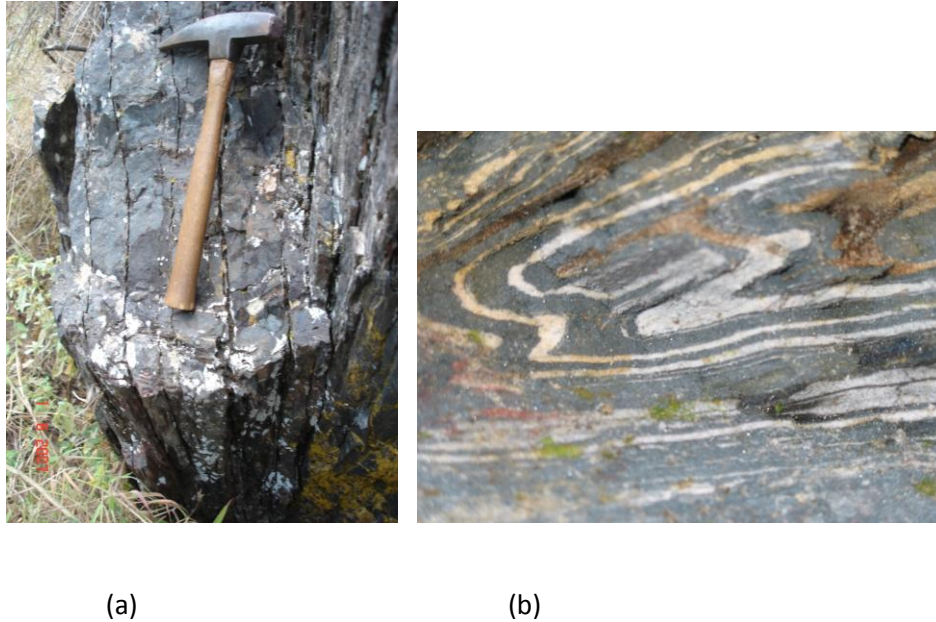


Figura 3.10: Corpos de itabirito compacto (a e b), na região do Baú –Gandarela (Braga, 2009).

**Canga (CG):** constituída por fragmentos de hematita e itabirito cimentados por goethita. Ocorre na superfície recobrindo a formação ferrífera e apresentando espessura que varia de poucos decímetros a cerca de 30 m. Tem alto teor de Fe (~58%), mas também altos teores de P e Al, possui densidade de  $3.2 \text{ g/cm}^3$  (Figura 3.11 a e b).

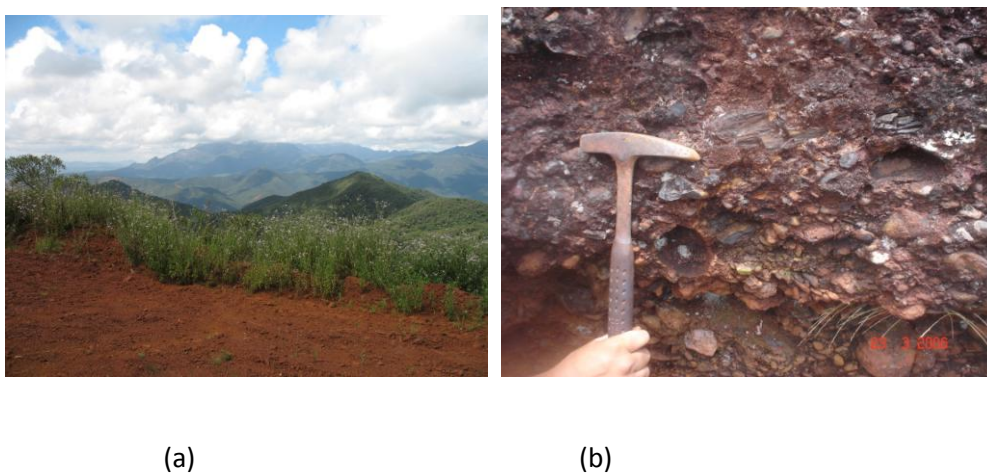


Figura 3.11: Cobertura de Canga (a e b), na região do Baú – Gandarela (Braga, 2009).

### 3.2.3 Geologia Local Do Alvo Dois Irmãos

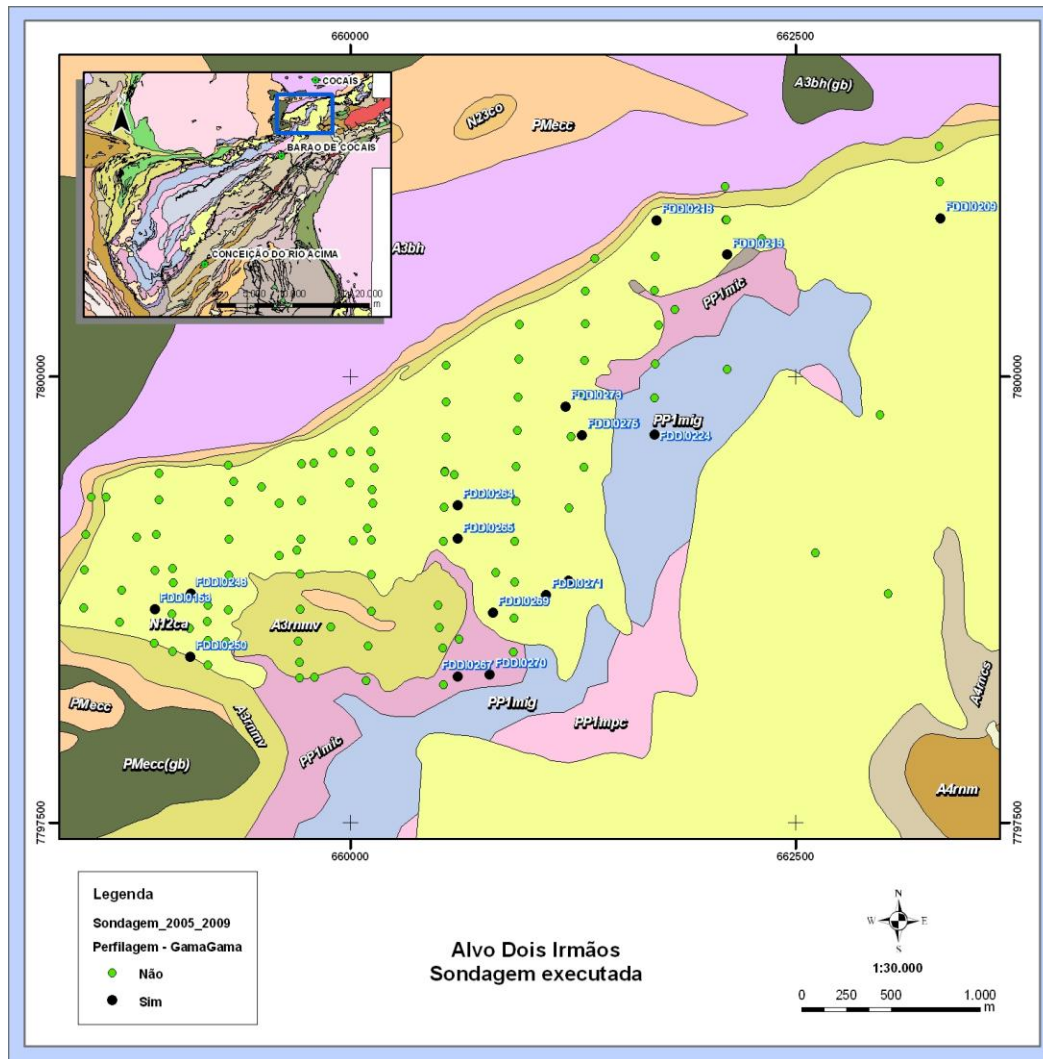
A jazida de Dois Irmãos está geologicamente localizada a nordeste do Quadrilátero Ferrífero, a nordeste do Sinclinal Gandarela (Figura 3.12).

A orientação média do acamamento é 112/18 com dispersão baixa em torno do valor médio. A xistosidade S2 é definida pela orientação preferencial de cristais de hematita e quartzo cuja atitude média é 126/32. A lineação de interseção entre o bandamento composicional e a xistosidade S2 forma uma proeminente estrutura linear, inclusive nos corpos de hematita xistosa. Esta lineação é paralela a subparalela aos eixos de dobra B2 cuja orientação média é 095/18. As orientações destas feições sofrem suaves perturbações em torno do eixo B3 de atitude geral ESE-WNW.

A seqüência estratigráfica da base para o topo é constituída por seis unidades geológicas bem distribuídas e individualizadas, sendo elas: i- gnaisses e migmatitos do embasamento cristalino; ii- seqüência meta-vulcano-sedimentar do Supergrupo Rio das Velhas (Grupo Nova Lima); iii- rochas metassedimentares do Supergrupo Minas (grupos Caraça, Itabira e Piracicaba); iv- rochas metassedimentares do Grupo Tamanduá; v- enxames de diques máficos e vi- coberturas recentes (principalmente canga e solo).

Segundo Endo et al (2008) as unidades da Formação Cauê, que possuem a formação ferrífera, orientam-se segundo a direção NE-SW, com alargamento na porção central da área e um afinamento para sudoeste a partir da vertente oeste da serra de Dois Irmãos. Constitui-se basicamente de itabiritos silicosos com rara presença de hematita compacta em corpos de espessura métrica. Normalmente possuem uma textura finamente foliada, sendo definida como hematita xistosa. Itabiritos anfíbolíticos de espessura de alguns metros podem ser observados na base da formação.

Na região do levantamento com perfilagem geofísica gama-gama, a Formação Cauê possui direção NE-SW, mergulho médio de 30° p/SE e espessura média de 130m, sendo caracterizada por dois grandes grupos mineralizados: hematitas (alto teor de ferro – FEGL>60%) e itabiritos (FEGL<60%).



**Litologia**

A3bh(gb)	- Diques, stocks, plugs e sills de gabro e gabro pórfiro
A3bh	- Gnaise granítico, granito, biotita gnaise, biotita-hornblenda gnaise, migmatito e pegmatito
A3rnmv	- Xisto, quartzito xisto, quartzito e filito; formação ferrífera
A4rncs	- Quartzito-carbonato-mica-clorita xisto, quartzito-mica xisto, filito carbonoso; formação ferrífera subordinada.
A4rnm	- Plagioclásio-clorita-mica-quartzito xisto, quartzito-clorita-mica xisto; xisto carbono e formação ferrífera subordinados.
N12ca	- Canga: com laterita e, localmente, com fragmentos rolados de rocha
N23co	- Colúvio: Blocos, matacoes e seixos de quartzito, itabirito e canga em solo aluvial
N34al	- Aluvião: areia, argila e cascalho
PMecc(gb)	- Diques e plutons de diabásio e gabro
PMecc	- Quartzito, quartzito sercítico
PP1mc	- Quartzito fino, quartzito filítico, filito e conglomerado
PP1mic	- Itabirito, itabirito dolomítico e filito
PP1mig	- Dolomito, filito dolomítico e ferruginoso, itabirito, itabirito dolomítico, itabirito anfíbólico e calcário.
PP1mpc	- Filito e quartzito ferruginosos; filito e xisto

Figura 3.12: Mapa geológico da região do Baú - Gandarela, contendo o detalhamento das litologias que compõem as Formações dos Grupos Itabira, Piracicaba e Caraça, e as litologias do Supergrupo Rio das Velhas, onde foi realizado o levantamento por perfilagem geofísica gama-gama, Modelo de Dorr (1969).

Além do teor de ferro, a presença de contaminantes (principalmente fósforo e alumina) permite subdividir estes dois grupos em goethítico e aluminoso. A fração granulométrica (G1) ainda permite separar em friável e compacto.

De acordo com os critérios acima descritos e utilizando os dados as amostras de furos de sondagem foi possível determinar sete litotipos mineralizados para a Jazida de Dois Irmãos, sendo eles:

**Hematita Goethítica (HGO):** a hematita goethítica é resultado do enriquecimento supergênico dos itabiritos com altos teores contaminantes. Ocorre na maioria das vezes próximo a superfície, mas também em raras lentes dispersas em profundidade, geralmente associada à hematita friável. A espessura das camadas ou lentes é de aproximadamente 10 metros, porém ocorrendo de maneira descontínua no horizonte das camadas. Suas principais características químicas são altos teores de fósforo e alumina bem com elevados valores de perda ao fogo devido ao alto grau de hidratação. O teor médio de ferro é de 61,67%.

**Hematita Friável (HF):** a hematita friável também é resultado do enriquecimento supergênico dos itabiritos, mas se difere da hematita goethítica devido à ausência de elementos contaminantes como fósforo e alumina e principalmente por menores valores de perda ao fogo. Sua forma de ocorrência é em camadas e lentes dispersas com espessura média de 10 metros. Os contatos com os itabiritos são marcados por descontinuidades no teor de ferro. A maior quantidade de material está na fração granulométrica G4 e o teor médio é de 63,18%.

**Itabirito Goethítico (IGO):** assim como a hematita goethítica, o itabirito goethítico é caracterizado por elevados teores de contaminantes. Ocorre de maneira constante em toda a jazida geralmente em camadas contínuas e alternadas com o itabirito aluminoso ou friável. Possui altos teores de fósforo e alumina bem com elevados valores de perda ao fogo. A maior quantidade de material está na fração granulométrica G1 e teor médio de ferro é de 48,08%.

**Itabirito Aluminoso (IAL):** o itabirito aluminoso é o tipo predominante na jazida de Dois Irmãos, ocorrendo em camadas constantes em toda a extensão lateral mas interdigitalizado ao itabirito goethítico ou friável em perfil vertical. Assemelha-se ao itabirito goethítico na presença de contaminantes, mas possui menores teores de

fósforo ( $P < 0,1\%$ ) e maiores teores de alumina (geralmente  $Al > 2,0\%$ ). Seu teor de ferro também é um pouco menor, com média em torno de  $44\%$  e a maior parte do material retido na fração granulométrica G4.

**Itabirito Friável (IF):** o itabirito friável é o tipo associado aos itabiritos goethítico e aluminoso, mas quimicamente caracterizado por baixos teores de contaminantes. Também ocorre em toda a extensão da jazida intercalado com os itabiritos goethítico e aluminoso. Seu teor médio de ferro é de  $45,75\%$  e a fração granulométrica G4 é a predominante. (cerca de  $43\%$ ).

**Itabirito Compacto (IC):** o itabirito compacto ocorre de forma quase constante na base da formação ferrífera em contato com o xisto / quartzito e em algumas lentes irregulares dentro da formação ferrífera. São corpos maciços e sua principal característica é possuir o maior percentual de material (cerca de  $97,57\%$ ) na fração granulométrica G1. O teor de ferro também é baixo, na faixa dos  $40\%$ .

**Itabirito Dolomítico (IDO):** o itabirito dolomítico também ocorre na base da formação ferrífera em contato com o xisto/quartzito. Sua presença está restrita a pequenas lentes no centro da jazida e outra ocorrência associada a uma lente de dolomito na porção NE da área. O teor médio de ferro é de  $32\%$  mas com altos valores de perda ao fogo (média de  $8,5\%$ ), MgO e CaO (média de  $3,5\%$  e  $4,9\%$  respectivamente) com quase todo material ( $97\%$ ) retido na fração granulométrica G1 ( $>8\text{mm}$ ).

Além destes tipos mineralizados, grande parte da área é recoberta por uma camada de canga, de espessura média de 10 metros, gerada pela erosão da camada de formação ferrífera. Quimicamente, esta canga tem altos teores médios de Fe ( $56,8\%$ ), P ( $0,13\%$ ), Al ( $3,8\%$ ) e PF ( $7,3\%$ ). Diques máficos intrusivos também estão presentes em toda a área de Dois Irmãos. Esses diques ocorrem de maneira descontínua tanto em extensão lateral como em seção vertical.

### 3.2.4 Geologia Local Do Alvo Maquiné

A área de Maquiné está geologicamente situada na porção central do Quadrilátero Ferrífero, no flanco oeste do Sinclinal do Gandarela (Figura 3.13).

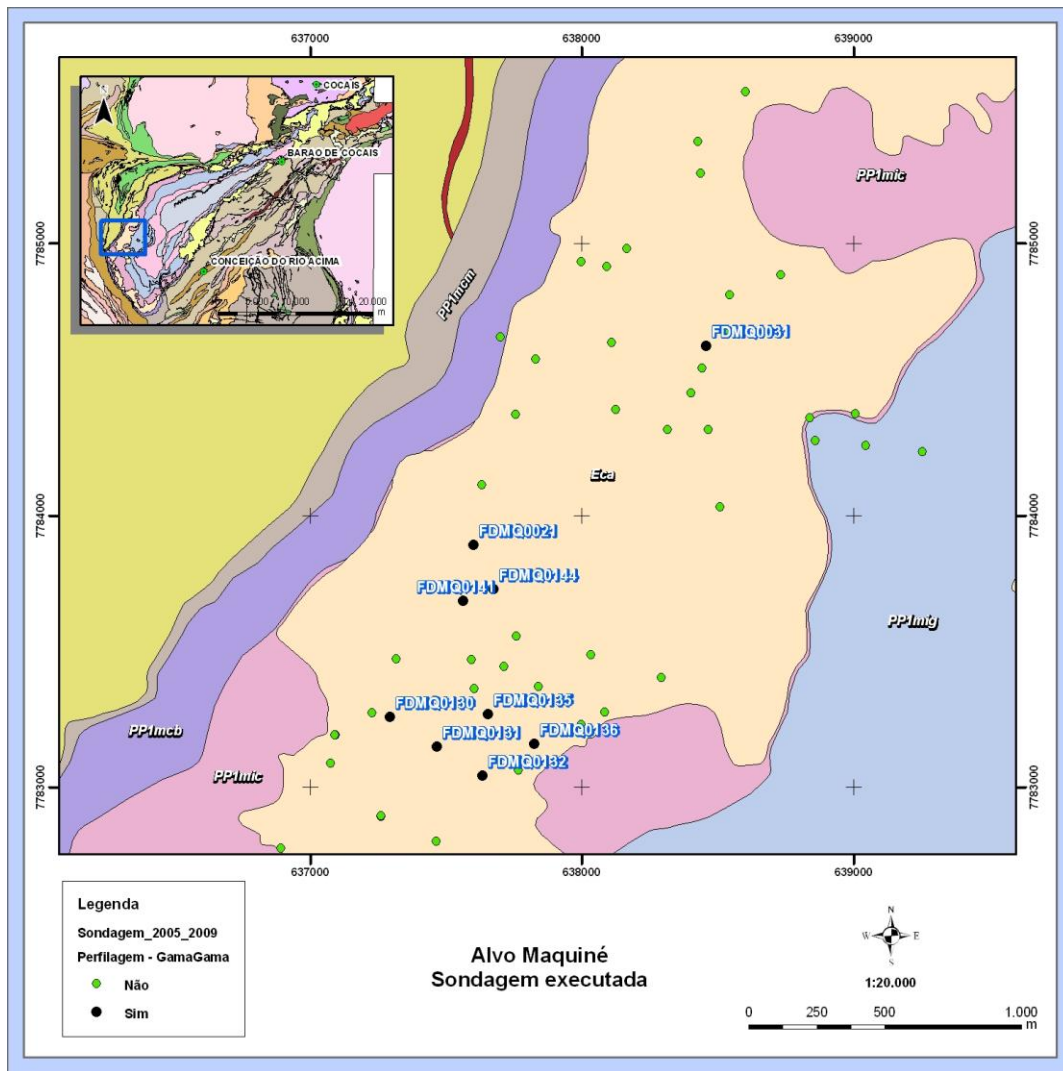
A jazida de Maquiné situa-se na porção basal dos itabiritos da Formação Cauê que estão sotopostos aos filitos e quartzitos do Grupo Caraça. Na base, o Grupo Caraça está em contato com os xistos do Grupo Nova Lima. No topo, a formação Cauê encontra-se em contato com a formação Gandarela, que por sua vez faz contato com as rochas do Grupo Piracicaba, no eixo do Sinclinal do Gandarela. A espessura total da Formação Cauê, no Sinclinal do Gandarela pode chegar a cerca de 800 metros.

A sequência estratigráfica da região, da base para o topo, compreende quatro unidades geológicas: i) gnaisses e migmatitos do embasamento cristalino Arqueano, representado pelo Complexo Caeté; ii) sequência meta-vulcano-sedimentar do Grupo Nova Lima, parte do Greenstone Belt Rio da Velhas; iii) rochas metasedimentares de origem clástica e clásto-químicas do Supergrupo Minas, representadas pelos Grupos Caraça, Itabira e Piracicaba; iv) enxames de diques máficos a intermediários metamorfisados; v) coberturas recentes, incluindo canga, laterita e rolados.

Localmente, a estrutura pode ser vista como um homoclinal de direção SW-NE, com mergulhos em torno de 35° com caimento para SE. (Endo et al, 2008).

Não existem muitos afloramentos na área de Maquiné Norte, sendo a maior parte dela coberta por canga ou lateritas. Alguns tipos de materiais somente podem ser vistos em galerias ou testemunhos de sondagem.





**Litologia**









	A3rnmv(ff) - Formação Ferrífera
	A3rnmv - Metabasalto toleítico e komatiítico, formação ferrífera e metachert; xisto epiclástico e metavulcânica félsica subordinada
	Eca - Canga: fragmentos de formação ferrífera cimentados por limonita
	PP1mcb - Filito sericítico, filito carbonoso, lente de quartzito fino e de formação ferrífera
	PP1mcm - Quartzito cinza, conglomerado, quartzo-sericita xisto com lentes de filito intercaladas; quartzito filítico, quartzo mica xisto.
	PP1mic - Itabirito e itabirito dolomítico, com lentes de dolomito
	PP1mig(it) - Itabirito
	PP1mig - Dolomito, itabirito dolomítico, calcário e filito

Figura 3.13: Mapa geológico da região de Maquiné, contendo o detalhamento das litologias que compõem as Formações dos Grupos Itabira, Piracicaba e Caraça, e as litologias do Supergrupo Rio das Velhas, onde foi realizado o levantamento geofísico 3D-FTG, Modelo de Dorr (1969).

Os principais tipos de materiais ricos em ferro da jazida de Maquiné são:

**Hematita Friável (HF):** formadas predominantemente pelo enriquecimento supergênico dos itabiritos friáveis, os corpos de hematita friável ocorrem próximo à superfície e apresentam teores de Fe de cerca de 64% . Possui teores relativamente baixos de fósforo, o que o distingue quimicamente dos itabiritos goethíticos (IGO). Nos contatos com o itabirito friável ocorre uma quebra brusca no teor de ferro, embora, localmente, observa-se contato gradacional. Contém aproximadamente 27% das partículas acima de 6,3mm. A espessura varia de poucos metros a até mais de 120 metros.

**Hematita Compacta (HC):** restritas à região norte da área modelada. Possui estrutura maciça ou foliada e é rica em goethita. Contém aproximadamente 90% das partículas acima de 6,3mm. A espessura dos corpos varia de poucos metros a até 60m e o teor médio de Fe é de cerca de 65 %, com altos teores de P. Seus contatos com os outros tipos são abruptos;

**Itabirito Goethítico (IGO):** itabirito hidratado, rico em goethita, com teores médios de Fe em torno de 56% e altos valores de Perda ao Fogo (~7%). Apresentam-se friáveis, com aproximadamente 24% das partículas acima de 6,3mm. A espessura varia de poucos metros até mais que 200 metros. Podem representar antigos itabiritos carbonáticos, já totalmente decompostos pela ação do intemperismo;

**Itabirito Friável (IF):** Distingue dos IGO pelos teores bem mais baixos de Fe, P e PF. Contém aproximadamente 28% de partículas acima de 6,3mm. O teor médio de Fe é de aproximadamente 48.0%;

**Itabirito Compacto (IC):** Formações ferríferas bandadas predominantemente compactas com alternância de bandas quartzosas e de hematita. Contém, na média, aproximadamente 70% do material > 6,3mm. A espessura não é bem conhecida já que estas rochas encontram-se em regiões profundas e com pouca informação. O teor médio deste tipo é de 41.0% de Fe.

**Canga (CG):** Rochas de natureza detrítica e geradas pela erosão da camada de formação ferrífera. Recobre praticamente toda a extensão da área de Maquiné. A espessura média gira em torno de 8m podendo atingir 35 metros. O teor médio de Fe é de cerca de 57% e possui altos teores de P, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e PF.

A Figura 3.14 mostra fotos com os principais litotipos.

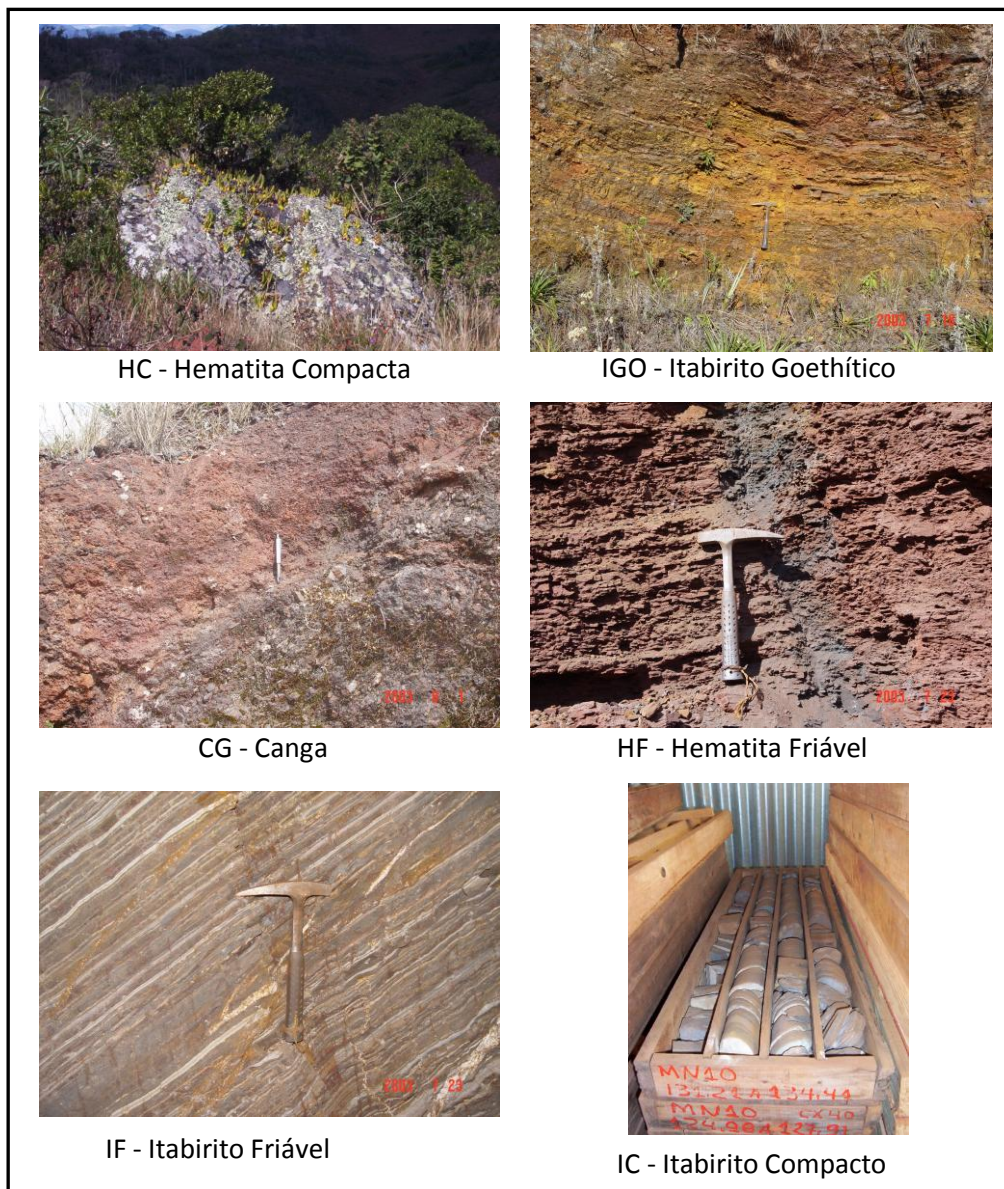


Figura 3.14 – Tipos de rochas ricas em ferro encontradas na jazida de Maquiné Norte

## **Capítulo 4**

### **Aquisição dos Dados Geofísicos**

A campanha integral de aquisição de dados de perfilagem geofísica gama-gama desenvolveu-se entre 16/março/2007 e 29/abril/2007, quando foram investigados 27 furos de sondagem rotativa nos alvos Dois Irmãos e Maquiné. Foram utilizados 5 métodos diferentes na campanha de perfilagem (gama-gama, gama natural, resistividade, sônico e caliper), porém são analisados aqui somente gama-gama e caliper, este último diretamente relacionado a qualidade dos dados gama-gama.

Na atual campanha foram perfilados 18 furos no Alvo Dois Irmãos e 9 furos no Alvo Maquiné. A listagem completa dos furos com os perfis executados e profundidades atingidas é ilustrada na Tabela 4.1.

Os furos de sondagem apresentaram-se dispostos diferentemente em cada alvo. A malha executada para o alvo Dois Irmãos foi de 200 metros x 400 metros, enquanto que para o alvo Maquiné foi de aproximadamente 200 metros x 200 metros. As Figuras 3.12 e 3.13 mostram a distribuição espacial das sondagens nos referidos alvos, onde os furos perfilados estão marcados em cor preta.

Tabela 4.1: Listagem dos furos perfilados nos alvos Dois Irmãos (código FDDI) e Maquiné (código FDMQ), com as respectivas datas, coordenadas UTM (SAD69), parâmetro medido e profundidades.

Data	Furo	Coord. Leste (m)	Coord. Norte (m)	Profundidade perfilada com Densidade (m)	Profundidade total do furo (m)
17/3/2007	FDDI-0202	663.707,057	7.801.092,446	100,06	224,90
	FDDI-0209	663.309,829	7.800.889,017	176,12	270,40
18/3/2007	FDDI-0275	661.299,896	7.799.671,699	140,10	148,50
20/3/2007	FDDI-0201	663.702,813	7.801.291,569	62,12	165,80
	FDDI-0273	661.205,815	7.799.832,225	99,20	94,18
22/3/2007	FDMQ-0141	659.795,585	7.799.514,671	171,93	320,00
23/3/2007	FDMQ-0130	637.292,333	7.783.259,614	50,11	133,55
	FDMQ-0031	638.456,140	7.784.624,306	114,44	251,20
26/3/2007	FDDI-0140	661.222,124	7.798.856,062	58,84	160,90
	FDDI-0218	661.717,436	7.800.875,738	39,29	150,95
27/3/2007	FDDI-0213	662.113,808	7.800.683,918	58,23	140,45
29/3/2007	FDMQ-0144	637.672,793	7.783.729,433	172,14	350,50
30/3/2007	FDDI-0224	661.706,934	7.799.677,508	177,25	244,00
31/3/2007	FDDI-0265	660.600,061	7.799.091,432	173,16	228,40
	FDDI-0271	660.602,800	7.798.319,620	82,30	156,70
2/4/2007	FDDI-0153	658.902,637	7.798.697,202	12,21	189,65
3/4/2007	FDDI-0269	660.800,153	7.798.677,126	45,56	149,30
4/4/2007	FDMQ-0131	637.464,602	7.783.151,223	169,84	171,75
11/4/2007	FDDI-0270	660.782,456	7.798.331,672	84,91	85,30
12/4/2007	FDDI-0267	660.602,800	7.798.319,620	72,97	72,85
13/4/2007	FDMQ-0135	637.652,872	7.783.269,161	176,86	200,00
15/4/2007	FDDI-0219	661.711,812	7.800.674,963	120,00	204,00
15/4/2007	FDDI-0220	661.706,041	7.800.482,864	160,00	169,30
19/4/2007	FDDI-0250	659.101,501	7.798.432,129	72,19	76,70
23/4/2007	FDMQ-0136	637.822,495	7.783.160,491	90,57	171,65
24/4/2007	FDDI-0248	659.103,075	7.798.784,834	80,76	88,15
25/4/2007	FDMQ-0021	637.599,550	7.783.892,549	78,34	299,75
	FDMQ-0132	637.633,605	7.783.044,909	102,42	155,25
26/4/2007	FDDI-0264	660.599,945	7.799.278,964	106,52	185,35

#### 4.1 Procedimentos Na 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 (RGWinLogger®) 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.

#### **4.1.1 Dificuldades Encontradas Na Aquisição Dos Dados Geofísicos**

Durante a execução de coleta de dados em campo, a equipe se defrontou com dois ambientes distintos de trabalho.

Em furos mais recentes, com a perfuração em fase de conclusão ou recém concluída, o equipamento de perfuração e outros materiais de sondagem ainda estavam presentes no local, dificultando o acesso da equipe de perfilagem. Muitas vezes, a presença do equipamento de perfuração obrigou a montagem do equipamento de perfilagem sobre cavaletes próximos à boca do furo e não dentro do veículo, como seria preferível (Figura 4.1). Porém, a presença do equipamento de perfuração no local de sondagem permitiu, muitas vezes, a limpeza/lavagem do furo de sondagem que encontrava-se obstruído para a realização da perfilagem.



Figura 4.1 – Montagem improvisada do equipamento de perfilagem logo após o furo ser finalizado.

O segundo ambiente de trabalho foi encontrado em furos onde a sondagem já havia sido concluída e todo o equipamento de sondagem havia sido recolhido, sobrando

uma grande área de trabalho para a equipe de perfilagem efetuar a coleta de dados. Nestes casos, todas as perfilagens foram realizadas com a montagem do equipamento no interior do veículo.

#### **4.1.2 Tempo Para Aquisição Dos Dados Geofísicos**

Sob o ponto de vista operacional, a sonda de gama-gama (densidade) toma mais tempo para ser preparada, pois além de seu elevado peso, existem procedimentos de radioproteção que devem ser respeitados.

Desconsiderando-se o tempo de montagem e desmontagem da sonda, o tempo de perfilagem é essencialmente função da profundidade do furo. As velocidades de movimentação das sondas são limitadas em até 10 m/minuto, na descida, e até 5 m/min., na subida. Desta forma, o tempo para perfilar um furo de 100 m é de aproximadamente 50 minutos, caso não haja nenhum imprevisto.

Para a execução da perfilagem com a sonda de densidade é necessário executar um teste inicial que é feito passando a própria sonda de densidade ao longo de todo furo, porém sem o acoplamento da fonte radioativa. Este teste inicial serve para garantir que não há risco de trancamento da sonda com fonte radioativa durante o deslocamento ao longo do furo. O tempo gasto para o teste aproxima-se do tempo de perfilagem normal.

Considerando-se, agora, todos os procedimentos necessários, estima-se que o tempo médio para a perfilagem de densidade esteja em torno de 3 horas, para um furo com 100 metros de profundidade.



## **4.2 Aspectos Da Execução Do Furo Que Influenciam Na Perfilagem Gama-Gama**

Na seqüência do texto, serão apresentadas algumas das condições de trabalho que a equipe de perfilagem se deparou durante a atual campanha de coleta de dados, fatores que tiveram uma influência significativa na qualidade dos registros de perfilagem geofísica. Estes fatores são citados a seguir.

### **4.2.1 Inclinação**

A maioria dos furos de sondagem feitos nos alvos apresenta uma inclinação intencional de 80° com o plano horizontal, com objetivo de permitir a medida de inclinação do furo, feita pela ferramenta MaxiBore®. O fato de o furo ser inclinado dificultou a movimentação das sondas de perfilagem, pois o equipamento de investigação geofísica desce somente por efeito da gravidade. Como o furo apresenta-se inclinado, a ferramenta de perfilagem desce em atrito com a parede interna, dificultando a sua movimentação (Figuras 4.2 e 4.3).

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 fluido de 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 de fluido de perfuração, 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 sonda e parede do furo na aquisição de dados. A Figura 4.3 ilustra o problema ocasionado devido às irregularidades do furo.

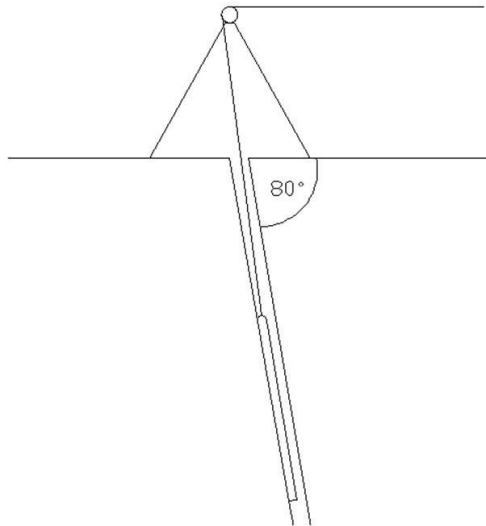


Figura 4.2 - Ferramenta descendo no furo de sondagem, sofrendo atrito com a parede devido à inclinação de 80°.

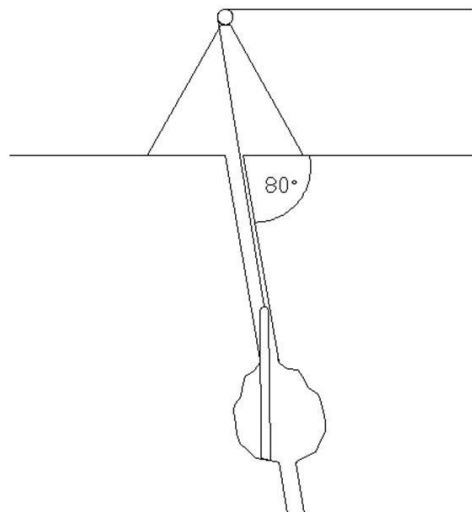


Figura 4.3 - Descida da sonda impedida devido às irregularidades da parede do furo.

#### **4.2.2 Tempo De Espera Para a Execução Da Perfilagem Gama-Gama**

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

Na tabela 4.2, faz-se um comparativo entre data de sondagem e de perfilagem, para uma parcela dos furos investigados por geofísica. A tabela 4.2 indica que existem

furos que foram perfilados com mais de três meses de espera após a sua confecção. Há situações opostas, como o furo FDMQ-0141, por exemplo, perfilado durante o processo de perfuração, sendo que a equipe de sondagem interrompeu momentaneamente suas atividades para a execução da perfilagem.

Embora não seja uma regra geral, nota-se que a profundidade perfilada se aproxima da profundidade sondada (dentro do limite de 175 m, máximo para o equipamento de perfilagem utilizado neste trabalho) quanto mais recente for o furo. A foto da figura 4.4 mostra a boca de um furo após 60 dias de sua conclusão. Notam-se algumas imperfeições na parte mais inicial, o que pode se agravar em profundidade.



Figura 4.4 – Aspecto da boca de furo de sondagem com aproximadamente um mês de conclusão, onde ocorrem irregularidades externas que podem se agravar em profundidade.

Tabela 4.2: Comparativo entre a data da sondagem e da perfilagem, juntamente com o comprimento perfilado.

<b>Furo</b>	<b>Data Término de Sondagem</b>	<b>Data de Perfilagem</b>	<b>Profundidade Sondagem (m)</b>	<b>Profundidade Perfilagem (m)</b>
FDDI-0140	14/11/2006	26/3/2007	160,90	58,84
FDDI-0201	13/2/2007	20/3/2007	165,80	62,12
FDDI-0213	28/9/2006	27/3/2007	129,00	58,23
FDDI-0218	6/10/2006	27/3/2007	150,95	39,29
FDMQ-0031	9/1/2007	18/3/2007	251,20	114,44
FDDI-0202	15/2/2007	17/3/2007	224,90	99,5
FDDI-0224	27/2/2007	24/3/2007	244,00	177,25
FDDI-0271	23/3/2007	11/4/2007	156,70	100,06
FDDI-0273	28/2/2007	11/4/2007	134,95	99,20
FDDI-0275	27/2/2007	18/3/2007	148,50	140,10
FDMQ-0130	20/3/2007	23/3/2007	133,55	50,11
FDMQ-0141	30/3/2007	22/3/2007	320,00	171,93

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. 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. Após, recolhia-se à 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.

Já a perfilagem de furos incompletos ou recém terminados era mais segura e, eventualmente, não exigia o teste da competência do furo, reduzindo o tempo de perfilagem. A perfilagem de furos recentes foi mais proveitosa, pois na grande maioria dos furos a ferramenta desceu até o fundo ou até o limite do cabo. Além disso, o perfil foi de melhor qualidade, pois as paredes do furo ainda não haviam sofrido com as várias manobras e movimentação de fluidos (“lavagens”).

Em suma, o melhor momento para efetuar a perfilagem geofísica gama-gama e obter um dado proveitoso é logo após a perfuração alcançar a profundidade de 180 m e

antes de ser efetuada a “lavagem” para a medida da inclinação do furo. Salienta-se que os maiores problemas de desmoronamento estão relacionados aos materiais friáveis.

#### **4.2.3 Presença De Lama E/Ou Água No Furo De Sondagem**

A presença de lama no furo em geral dificultou o trabalho, pois se somando ao fato que a ferramenta de perfilagem desce sofrendo atrito com a parede do furo, a presença de lama faz com que o peso aparente da sonda seja menor, tornando mais difícil a descida ao fundo do furo. Além disso, as lamas de perfuração são, geralmente, compostas por material a base de bário que tem alta densidade, podendo interferir nos resultados finais de densidade quando a lama fica colada na parede do furo.

O conhecimento da presença ou não de água no furo é um dado importante, pois a água afeta diretamente o dado coletado pela sonda, diminuindo o valor da densidade no local (a água possui densidade em torno de  $1 \text{ g/cm}^3$ ). Logo, a situação ideal é manter o furo completamente cheio de água ou completamente seco.

Neste estudo, porém, não foi medida a profundidade do nível de água (NA) ou quantidade de lama dentro do furo de sondagem.

#### **4.2.4 Aproveitamento dos Perfis de Perfilagem Gama-Gama**

Este item trata do aproveitamento dos perfis, sob o ponto de vista da qualidade do sinal medido ou ainda da qualidade do furo conforme observado pelo caliper.

O critério principal para o aproveitamento dos perfis de densidade foi através do registro do caliper, ou seja, zonas com variações bruscas de diâmetro (presença de excessiva rugosidade na parede do furo) foram consideradas inapropriadas para gerar boas estimativas de densidade. Na prática, as variações no diâmetro de furo também são aproveitadas como indicativo de tipos litológicos, pois se verifica maior diâmetro de caliper na presença de materiais friáveis ou fraturados. A Figura 4.5 exemplifica o

critério adotado, mostrando uma zona cuja estimativa de densidade é considerada não confiável devido às variações bruscas no diâmetro do furo, registradas pelo caliper.

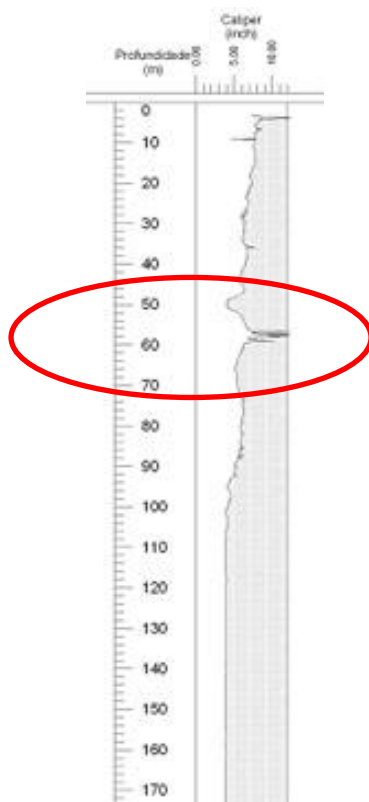


Figura 4.5: Perfil geofísico referente ao diâmetro do furo FDDI-0209. A elipse em vermelho mostra uma zona não aproveitável (baixa qualidade do registro de densidade).

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam, em relação à profundidade total perfilada, a qualidade dos perfis realizados nos alvos Dois Irmãos e Maquiné, cuja estimativa de densidade pode ser considerada aproveitável, com base na avaliação visual do comportamento do caliper. Assim, trechos onde o caliper apresenta abertura máxima (> 12 polegadas), grande rugosidade ou presença de revestimento não são considerados aproveitáveis.

O aproveitamento dos perfis em relação a profundidade total do furo é, em média, de 69% no Alvo Dois Irmãos e de 74% no Alvo Maquiné. Este aproveitamento é considerado excelente, pois atualmente e na maioria dos casos, o minério de ferro apresenta-se friável na quase totalidade do furo, não sendo possível a retirada de amostras íntegras e ensaio de densidade em laboratório.

Tabela 4.3: Aproveitamento dos perfis referente ao Alvo Dois Irmãos.

Nome do furo	Profundidade total (m)	Trechos aproveitáveis		Aproveitamento no trecho (m)	Aproveitamento total (m)	Aproveitamento (%)
		De (m)	Até (m)			
FDDI-0140	160,9	14	20	6	27	16
		26	30	4		
		39	44	5		
		48	60	12		
FDDI-0201	61,5	3	20	17	41	67
		28	36	8		
		44	60	16		
FDDI-0202	99,5	17	34	17	37	37
		58	78	20		
FDDI-0209	175,5	10	38	28	138	79
		40	45	5		
		61	80	27		
		95	173	78		
FDDI-0213	57,6	16	28	4,5	35,5	62
		30	49	19		
		50,5	55	4,5		
FDDI-0218	38,8	3	32	29	31	80
		35	37	2		
FDDI-0219	120	25	117	92	92	78
		15	57	42		
FDDI-0220	160	61	143	82	138	86
		146	160	14		
FDDI-0224	177,25	17	33	16	122,25	68
		38	82	44		
		100	145	45		
		160	177,25	17,25		
FDDI-0248	80,2	3	63	60	70	87
		70	80	10		
FDDI-0250	71,6	16	50	34	50	70
		54	70	16		
FDDI-0264	105,9	22	32	10	56	62
		38	44	6		
		53	103	50		
FDDI-0265	173,5	46	76	30	117	67
		79	88	9		
		92	170	78		
FDDI-0267	72,6	10	31	21	56	77
		35	70	35		
FDDI-0269	45	5	9	4	29	64
		10,5	13	2,5		
		17,5	26	8,5		
		26	40	14		
FDDI-0270	84,3	11	15,5	4,5	61,5	73
		17	41	24		
		43	57	14		
		63	82	19		
FDDI-271	81,7	5	80	75	75	92
FDDI-273	98,6	19	24	5	68	69
		34	97	63		
FDDI-275	139,5	14	58	44	111	80
		60	69	9		
		71	101	30		
		111	139	28		

Tabela 4.4: Aproveitamento dos perfis referente ao Alvo Maquiné.

Nome do furo	Profundidade total (m)	Trechos aproveitáveis		Aproveitamento (m)	Aproveitamento total (m)	Aproveitamento (%)
		De (m)	Até (m)			
FDMQ-0021	77,7	27	35	8	29	37
		46	56	10		
		59	63	4		
		70	77	7		
FDMQ-0031	113,8	28	99	71	80	70
		102	111	9		
FDMQ-0130	49,5	9	17	8	29	74
		17	39	22		
		40	47	7		
FDMQ-0131	168,2	8	17	9	152	90
		23	138,5	115,5		
		139,5	167	27,5		
FDMQ-0132	101,8	10	15	5	84	83
		21	100	79		
FDMQ-0135	176,3	74,5	176	101,5	101,5	58
FDMQ-0136	90	3	87	84	84	93
FDMQ-0141	171,4	3	25	22	143	83
		26	44	18		
		60	72	12		
		72	108	36		
		114	132	18		
		134	171	37		
FDMQ-0144	171,5	3	27	24	139,5	81
		27,5	34	6,5		
		38	54	16		
		58	70	12		
		74	88	16		
		95	104	9		
		115	171	56		



## **Capítulo 5**

### **Análise dos Resultados**

A aquisição de dados consistiu na perfilagem geofísica gama-gama de furos de sonda com diâmetro nominal de 98 mm, apresentando comprimentos variados (de poucas dezenas de metros até mais de 300m de profundidade) e atravessando diversas litologias. A perfilagem geofísica gama-gama, principal interesse no presente estudo, foi executada em todos os furos acessados e que se encontravam desobstruídos ao tempo dos levantamentos.

## 5.1 Perfil Geofísico Gama-Gama

A análise dos registros de densidade para alvos de Dois Irmãos e Maquiné foi efetuada separadamente, na expectativa de que um comportamento diferenciado pudesse ser observado em qualquer das litologias investigadas.

A partir dos registros de campo, foram geradas equações de ajuste relacionando as contagens de CPS medidas no cintilômetro HRD e a densidade natural ( $\rho$ ) obtida por análise de laboratório, para amostras de testemunhos de sondagem em cada alvo. Estas equações obedecem a fórmula geral:

$$CPS = a \cdot \exp^{-b \cdot \rho}$$

, onde CPS é a contagem por segundo medido no equipamento, “a e b” são constantes obtidas com base nos dados de ajuste da curva e  $\rho$  é a densidade do meio.

Diversos fatores podem acarretar erros na curva final de ajuste e nos dados medidos pelo perfil gama-gama. Estes fatores geram ruídos nas leituras obtidas. Conseqüentemente causariam erros na medida de densidade por perfilagem geofísica gama-gama e comparações com dados de laboratório.

Os fatores que podem acarretar os erros de medida são a variação no diâmetro do furo, o preenchimento parcial ou total do furo por fluidos, a capacidade de discriminação vertical do equipamento, o volume de investigação da sonda gama-gama e a baixa recuperação dos testemunhos de sondagem.

A curva de resposta é influenciada pela **variação no diâmetro do furo**. Esta variação, medida pelo perfil caliper, é grande em alguns trechos dos furos perfilados, como resultado de vários fatores locais de caráter geológico e operacional, provocando alterações (erros) nas estimativas de densidade. A magnitude dos erros deve ser estudada em maior detalhe em futuros trabalhos, bem como o desenvolvimento de correções para as medidas. De qualquer forma, na interpretação descartaram-se os registros onde o caliper mede uma rugosidade muito acentuada da parede do furo.

A literatura relativa ao perfil de densidade apresenta a possibilidade de correções nas medidas de densidade quando o furo apresenta diâmetros variados com

transição suave entre os diâmetros. Porém, não há alternativa quando a parede do furo mostra rugosidade excessiva.

Em algumas situações neste estudo, o caliper excedeu o seu limite de abertura para além de 12" (doze polegadas). Nestes casos, também, foi necessário o descarte dos registros, uma vez que diâmetro do furo tornou-se indeterminado.

Outro fator importante é **a presença de água/fluido de perfuração nos furos**. Durante a perfilagem geofísica gama-gama, não foi possível garantir o preenchimento completo de todos os furos com água/fluido de perfuração. O preenchimento com fluido, na maioria dos casos, foi parcial e sua presença registrada nas anotações de campo, porém o nível do fluido dentro dos furos não foi medido. Como a presença de fluido altera a estimativa de densidade, há um erro presente não quantificado que também deve ser estudado nos trabalhos futuros.

É bem conhecido o fato de que a **capacidade de discriminação vertical** das sondas de perfilagem é limitada, entre outros fatores, pelo espaçamento entre fonte e receptor. No presente caso, avaliaram-se densidades através do sensor HRD, cuja distância da fonte é de 21 cm. Em termos práticos, para amostras representativas de intervalos muito limitados em espessura (inferiores a 21 cm), a sonda de perfilagem geofísica gama-gama obteve sinal não apenas da amostra em si, mas também da vizinhança desta amostra cuja densidade varia e é diferente. O resultado é uma densidade ponderada, obviamente diferente da densidade de laboratório que se refere somente à amostra coletada para as análises em laboratório.

**O volume de investigação da sonda de perfilagem geofísica gama-gama** é diferente do volume amostrado pela sondagem, pois a penetração do raio gama é de aproximadamente 12-15 cm de rocha além da parede do furo (Petler, 1990), sendo essa uma das vantagens do perfil gama-gama, freqüentemente mencionada na literatura. Ou seja, a análise de laboratório não se refere ao mesmo volume de material investigado na perfilagem geofísica gama-gama, já que um testemunho de sondagem tem aproximadamente 6,6cm de diâmetro.

A **baixa recuperação dos testemunhos** na sondagem dificulta bastante o exato posicionamento em profundidade das amostras de sondagem coletadas para análise. Este fator, juntamente com as variações bruscas de caliper, é o que causa os

maiores problemas na construção da curva de ajuste e estimativa dos dados, sendo analisado em maior detalhe no item 5.1.1 a seguir.

### 5.1.1 Equações de Ajuste para o Perfil Gama-Gama

A tentativa de obter equações de ajuste relacionando as contagens medidas em CPS no cintilômetro HRD e a densidade natural ( $\rho$ ), obtida por análise de laboratório em amostras de testemunhos de sondagem, é vista a seguir.

Como um teste inicial, levando em conta o grande número de perfis a serem analisados, plotou-se diretamente o conjunto de leituras (contagens em CPS) de perfilagem geofísica gama-gama contra as densidades naturais obtidas por análise de laboratório, para os dados de Dois Irmãos e Maquiné combinados na Figura 5.1.



Figura 5.1 - Plotagem de contagens (CPS) para o sensor HRD versus densidades naturais, obtidas por análises de laboratório, para o conjunto completo de amostras de testemunhos de sondagem (dados de Dois Irmãos e Maquiné).

A observação da Figura 5.1 mostra que, além da já esperada tendência dos pontos a se distribuírem aproximadamente de acordo com uma função exponencial negativa, a dispersão ao redor da curva de ajuste é alta. A função de ajuste para estes

dados ( $CPS = 4289 \cdot \exp(-0,4926 \cdot \rho)$ ) foi usada para estimar a densidade justamente nos trechos nos quais amostras foram coletadas e analisadas em laboratório.

A comparação entre as densidades estimadas pela curva de ajuste e as densidades determinadas por análise de laboratório forneceu valores pouco satisfatórios. Para algumas amostras, as diferenças (erros) entre as densidades obtidas pelos dois métodos foram superiores a 30%. A apreciação destas diferenças em cada furo de sondagem mostrou que as comparações não foram favoráveis em uma parte significativa dos furos. Pode-se dizer que, do total de perfis coletados, em aproximadamente 50% dos casos houve boa correlação entre densidades obtidas por perfilagem e por análise de laboratório. Nos demais, ou as correlações são fracas ou não há análises de laboratório suficientes para a comparação.

Aceitando-se o fato de que as comparações não produziram o efeito desejado, quando analisado todos os perfis grupados em dois depósitos distintos, resta explicar os motivos pelos quais as divergências entre os valores foram geradas, além das considerações já relacionadas na parte inicial do tópico 5.1.

Foram verificados diversos trechos com baixa recuperação de sondagem nos furos perfilados. A baixa recuperação dificulta bastante o exato posicionamento em profundidade das amostras de sondagem coletadas para análise. Este fato, somado ao pequeno tamanho de amostras selecionadas nos furos para testes de laboratório (20 cm de comprimento), explica boa parte das divergências entre as estimativas de densidades. A análise dos dados mostrou que, onde o trecho escolhido para a comparação é longo, de densidade aproximadamente constante e apresentando material compacto (o caliper é melhor!), as correlações são melhores. Nesta situação, podem-se ignorar os erros de posicionamento, pois as leituras referem-se a um trecho de mesma densidade.

De modo inverso, furos com baixas recuperações apresentaram tendência a fornecer correlações mais fracas entre densidade obtida em laboratório e densidade obtida por perfilagem. Em vários perfis com baixa recuperação, verifica-se que o registro de perfilagem geofísica gama-gama não apresenta densidade semelhante à amostra de uma dada profundidade, mas nas vizinhanças (por exemplo, a um ou dois metros de distância do furo) há um registro geofísico compatível, dando a impressão de

que houve um deslocamento vertical da amostra. Infelizmente, este deslocamento não é constante ao longo do perfil para todas as amostras, ou seja, no mesmo perfil geofísico é possível encontrar-se uma determinada interface litológica em profundidade superior à registrada na sondagem, enquanto o inverso ocorre com outra interface. Assim, não é possível ajustar facilmente todo o perfil geofísico com um único deslocamento vertical.

A primeira situação clara foi verificada no perfil do furo FDDI-0275 (Figura 5.2), em profundidades próximas a 40 metros. Uma visão geral do perfil FDDI-0275 mostra que o caliper no trecho em destaque da Figura 5.2, assinalado por uma linha horizontal próxima a marca dos 40m, apresenta-se constante e com um diâmetro próximo ao diâmetro da sondagem, o que sinaliza boa confiabilidade no registro geofísico gama-gama. Visualizando-se, porém, as amostras de testemunhos de sondagem coletas do furo FDDI-0275, observa-se que entre as profundidades 38,8 m e 38,9 m, conforme o controle da equipe de sondagem, há uma amostra com densidade laboratorial de 3,47 g/cm<sup>3</sup>. Vale ressaltar que essas amostras foram escolhidas, nas caixas de testemunhos, em trechos onde havia contrastes de densidades, justamente para facilitar a localização da respectiva amostra no registro geofísico. Ou seja, a amostra de densidade mais alta (hematita compacta) estava posicionada em meio a itabirito friável, que está presente acima e abaixo.

Uma visão mais detalhada de parte do perfil gama-gama, ilustrada na Figura 5.3, apresenta na profundidade de 44,2m uma zona de alta densidade (em torno de 3,5 g/cm<sup>3</sup>), nitidamente destacada em relação ao seu entorno acima e abaixo. Esta amostra é bastante contrastante com sua vizinhança, ou seja, há um material de alta densidade entre materiais de densidades inferiores. Isto foi verificado tanto na caixa de sondagem quanto no perfil geofísico. Assim, concluiu-se que a amostra selecionada tem seu registro definido no perfil geofísico, porém em uma profundidade deslocada.

Deslocamentos deste tipo foram observados em diversos trechos e em diferentes furos. Uma característica marcante é que os trechos com maior deslocamento se encontram em furos que atingiram formações de itabirito friável, litologia que apresenta em geral baixa recuperação. Nos casos em que foram observados discrepâncias entre os valores de densidade de laboratório e os do perfil geofísico (deslocamentos), os mesmos foram analisados separadamente e ajustados um a um.

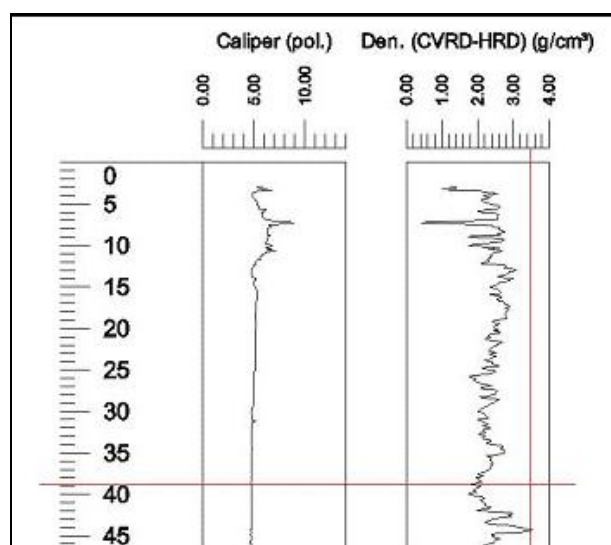


Figura 5.2 - Perfil FDDI-0275 ilustrando diferenças de posicionamento, em profundidade, de amostras extraídas de testemunhos de sondagem.

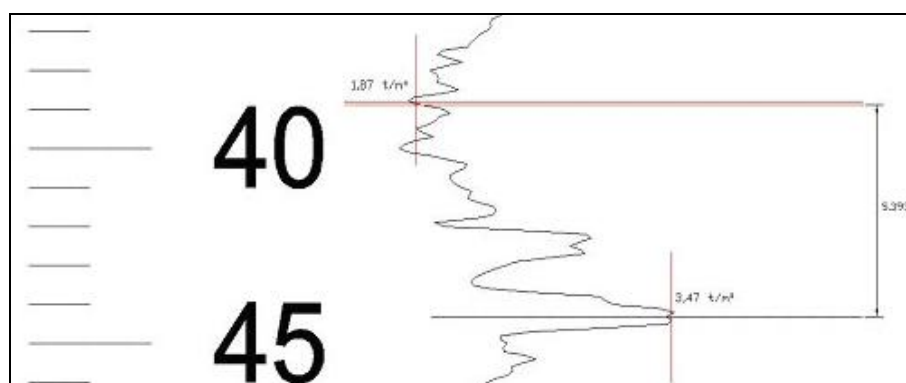


Figura 5.3 - Trecho em detalhe do perfil FDDI-0275, mostrando alta densidade em torno de 44 metros de profundidade, deslocada em relação ao ponto de coleta da amostra para teste de laboratório.

Outro exemplo de diferença em profundidade ocorreu no perfil FDDI-0220 com a litologia xisto, posicionada entre 35m e 50m de profundidade (Figura 5.4), limitada acima por um trecho sem recuperação de testemunho (SR) e abaixo por itabirito friável. No perfil, o xisto apresentou densidade inferior às litologias vizinhas. Pode-se observar, no perfil geofísico, que o contato inferior e superior do xisto aparece com nitidez, porém o contato superior entre xisto e o trecho de material não recuperado (provavelmente

itabirito friável) não coincide com o contato definido na descrição geológica, ou seja, a descrição geológica apresenta maior espessura de xisto do que a perfilagem geofísica gama-gama. A Figura 5.5 apresenta o trecho de xisto em destaque, mostrando que a descrição geológica atribuiu uma espessura 3,26m maior ao xisto em relação ao inferido por perfilagem.

Se este tipo de erro ocorrer em uma parte significativa de furos de um depósito mineral estudado, pode ocorrer uma grande perda/ganho de minério na descrição geológica dos furos de sondagem e, conseqüentemente, nos modelos geológicos desenhados com base apenas nas informações da sondagem, gerando perdas ou ganhos nas estimativas e cálculo finais de recursos/reservas.

Estes resultados mostram a perfilagem geofísica alertando para uma possível discrepância (erro) entre o perfil descrito (assumido como conhecido) e a realidade física em furos de baixa recuperação.

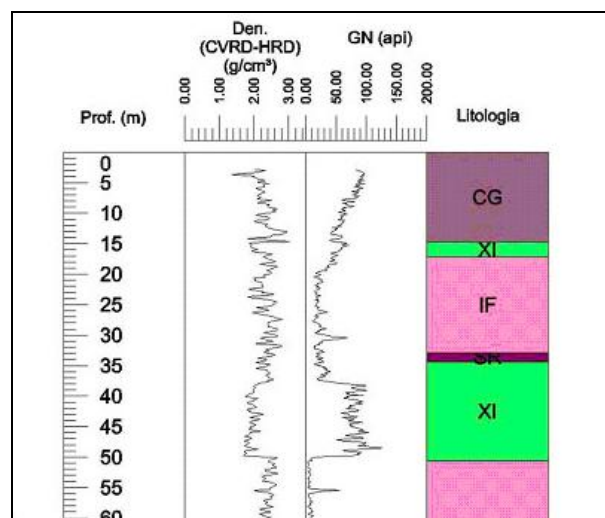


Figura 5.4 - Perfil FDDI-0220 mostrando contatos entre xisto e materiais friáveis entre 35 e 50 metros de profundidade.



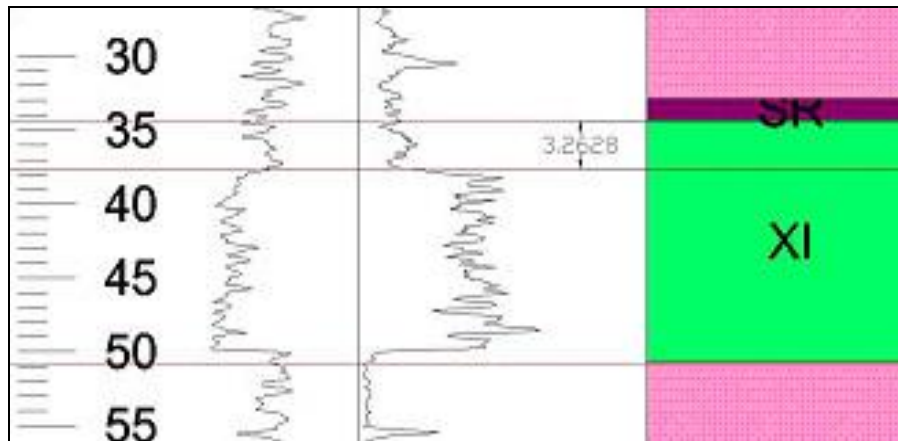


Figura 5.5 - Destaque para o intervalo contendo xisto no perfil FDDI-0220, apresentando uma diferença de aproximadamente 3,3 m entre a interpretação geológica e a determinação por perfilagem geofísica gama-gama. Neste caso, o contato superior visualizado na caixa de testemunho entre o itabirito friável e o xisto foi modificado em relação a realidade, sendo puxado para cima, devido a perda de itabirito na sondagem (trecho sem recuperação). Neste caso, perdeu-se itabirito friável na descrição geológica com base somente no testemunho de sondagem.

Como uma observação final a respeito das divergências em profundidade, foi efetuado um perfil de teste em um furo apresentando 87 metros de revestimento metálico, no alvo Maquiné (sondagem FDMQ-0136). A profundidade do revestimento pode ser observada exatamente no perfil do caliper e no perfil geofísico, coincidindo com o valor esperado.

Conforme ilustrado no Anexo 1, referente ao perfil do furo FDMQ-0136, nota-se que o caliper torna-se sem rugosidades acima dos 87m de profundidade, marcando exatamente nesta profundidade a presença do revestimento metálico e permanecendo assim até o topo do furo. Também notou-se que, na comparação entre os perfis geofísicos do mesmo furo revestido e do sem revestimento, ocorre uma atenuação do sinal do CPS (mais baixo) causado pela presença do revestimento. Isto se deve ao fato do aumento da densidade aparente devido a presença do revestimento metálico mais denso que a formação rochosa, interpondo-se entre o a fonte e a litologia investigada.

Porém, as medidas de densidade no furo com revestimento foi desprezada e os valores não foram aproveitados neste trabalho, servirão apenas para marcar a profundidade do revestimento. Ou seja, os problemas de posicionamento das amostras

não se referem à sonda de perfilagem geofísica gama-gama, mas sim as descrições e posicionamento em profundidade das litologias nos furos de sondagem.

### **5.1.2 Perfil Gama-Gama no Alvo Dois Irmãos**

O conjunto completo de amostras de densidade obtidas a partir de testemunhos de sondagem no Alvo Dois Irmãos encontra-se especificado na Tabela A.1, Anexo 1. Um total de 163 amostras está disponível para utilização na construção da curva de ajuste no Alvo Dois Irmãos, boa parte das quais apresentando análises de parâmetros químicos. Deste conjunto de amostras, 28 não puderam ser aproveitadas no ajuste da função CPS versus densidade devido ao comportamento irregular das paredes do furo, conforme indicado pelo perfil de caliper.

A Tabela A.2, Anexo 1, especifica o conjunto de amostras realmente usadas na obtenção da curva de ajuste de densidade, inclusive indicando os intervalos testemunhados cuja profundidade precisou ser corrigida para haver compatibilidade entre as informações de sondagem e de perfilagem. A curva final de ajuste, para o sensor HRD, encontra-se na Figura 5.6, apresentando boa aderência dos pontos em relação à tendência principal (função exponencial com expoente negativo).



Figura 5.6 - Curva de ajuste obtida para o cintilômetro HRD com dados válidos de furos de sondagem do Alvo Dois Irmãos (Tabela A.2, Anexo 1). Coeficientes para a função de densidade:  $a=11861,823$  e  $b=0,91501066$ .

Nota-se, que o Coeficiente de Determinação  $r^2$  ilustra uma correlação elevada de 0,9522 entre os dados de densidade de laboratório e de CPS.

### 5.1.3 Perfil Gama-Gama no Alvo Maquiné

O conjunto de amostras analisadas quanto à densidade e obtidas a partir de testemunhos de sondagem do Alvo Maquiné encontra-se na Tabela A.3, Anexo 1. Um total de 90 amostras está disponível para utilização na construção da curva de ajuste no Alvo Maquiné, parte das quais apresentando análises de parâmetros químicos. Deste conjunto total de amostras, 20 não puderam ser aproveitadas no ajuste da função CPS versus densidade natural devido ao comportamento irregular das paredes do furo, conforme indicado pelo perfil caliper.

A Tabela A.4, Anexo 1, especifica o conjunto de amostras realmente usadas na obtenção da curva de ajuste de densidade, indicando os intervalos testemunhados cuja profundidade precisou ser corrigida para haver compatibilidade entre as informações

de sondagem e de perfilagem. A curva final de ajuste, para o sensor HRD, encontra-se ilustrada na Figura 5.7.

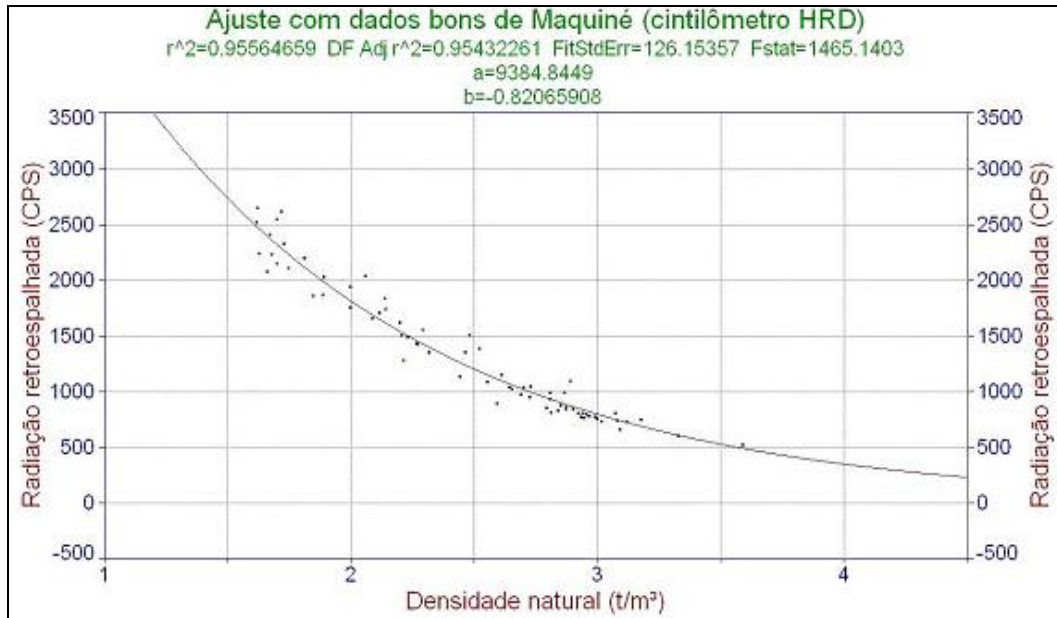


Figura 5.7 - Curva de ajuste obtida para o cintilômetro HRD com dados válidos de furos de sondagem do Alvo Maquiné (Tabela A.3, ANEXO 1). Coeficientes para a função de densidade: a=9384,8449 e b=0,82065908.

Nota-se, que o Coeficiente de Determinação  $r^2$  ilustra uma correlação elevada de 0,9556 entre os dados de densidade de laboratório e de CPS.

## **5.2 Análises de Densidades Estimadas por Perfilagem Geofísica Gama-Gama**

As análises de acuracidade das densidades estimadas por perfilagem geofísica gama-gama foram feitas a partir de comparações. Primeiramente, fez-se a comparação entre densidade estimada por perfilagem geofísica gama-gama e densidade determinada por análise de laboratório, para amostras retiradas de furos de sondagem do Alvo Dois Irmãos e a comparação entre densidade estimada por perfilagem geofísica gama-gama e densidade determinada por análise de laboratório, para amostras retiradas de furos de sondagem do Alvo Maquiné. No final, fizeram-se estimativas de densidade para uso geral, usando a curva de ajuste derivada do conjunto completo de dados.

Estas comparações entre densidades determinadas por perfilagem geofísica gama-gama e por análise de laboratório permitem observar a sensibilidade das estimativas quando os parâmetros da curva de ajuste são variados. A observação direta da semelhança dos parâmetros (ver legendas das Figuras 5.6 e 5.7) já indica que ambas as curvas de ajuste, para Dois Irmãos ou Maquiné, apresentam estimativas de densidade bastante próximas.

A forma mais comum de apresentar e comparar dados bivariados é no gráfico de dispersão, um gráfico do tipo  $x-y$  no qual o eixo  $x$  corresponde aos valores de uma variável independente e a ordenada  $y$  aos valores da outra variável dependente da primeira. O gráfico de dispersão é útil para chamar atenção sobre a presença de valores discrepantes no conjunto de dados, além de fornecer uma idéia qualitativa de como as duas distribuições estão relacionadas nos alvos.

Para que não ocorreram tendências nas comparações, os parâmetros da curva de ajuste do Alvo Dois Irmãos foram utilizados para estimar a densidade por perfilagem geofísica gama-gama no Alvo Máquiné, e vice-versa. Após a estimativa dos valores de densidade nos dois Alvos, os mesmos foram comparados com as densidades analisadas em laboratório, por meio de um gráfico de dispersão.

Na primeira comparação, apresentada na Tabela A.5, Anexo 1, usou - se a densidade determinada em laboratório para amostras obtidas no Alvo Dois Irmãos e a

estimativa de densidade por perfilagem geofísica gama-gama a partir da curva de ajuste obtida na área do Alvo Maquiné (parâmetros da curva de ajuste derivados dos registros do sensor HRD: coeficientes  $a=9384,8449$  e  $b=0,82065908$ )

A observação direta da Tabela A.5, Anexo 1, revela que o erro médio percentual para a estimativa de densidade, em relação às análises de laboratório, foi de 0,50%, desvio padrão percentual de 4,53%, com o erro máximo percentual igual a 14,85%, ocorrido no furo FDDI-0275, na litologia itabirito friável (IF). Um gráfico do tipo *scatterplot* da densidade natural versus densidade estimada por perfilagem, para cada amostra do Alvo Dois Irmãos, aparece na Figura 5.8.

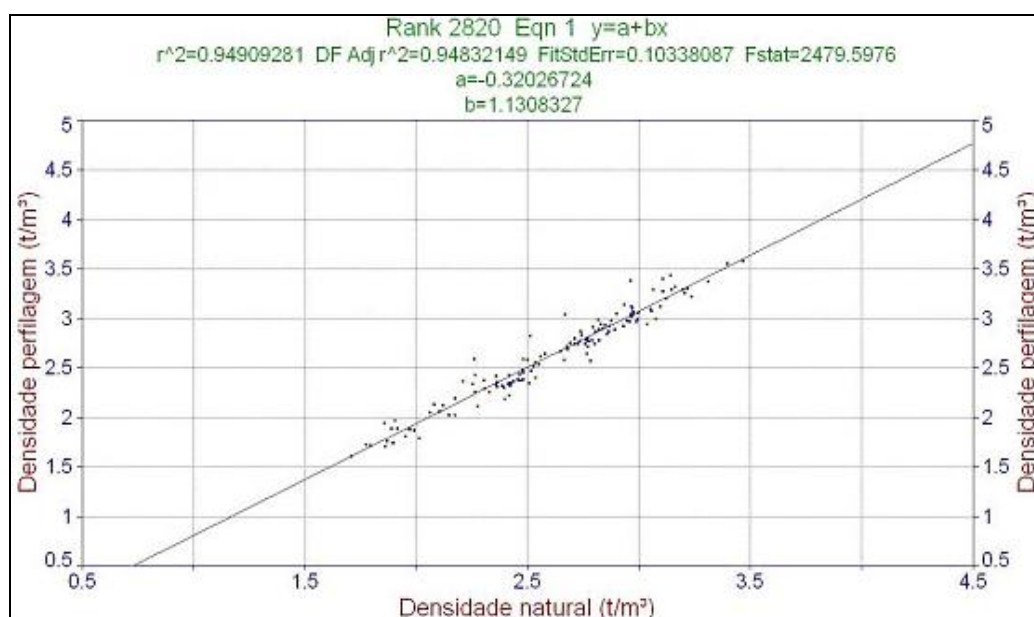


Figura 5.8 - Scatterplot dos dados de densidade natural versus densidade estimada por perfilagem geofísica gama-gama, no Alvo Dois Irmãos.

Na segunda comparação (Tabela A.6, Anexo 1), usou-se a densidade determinada em laboratório para amostras obtidas no Alvo Maquiné e a estimativa de densidade por perfilagem geofísica gama-gama a partir da curva de ajuste obtida na área do Alvo Dois Irmãos (parâmetros da curva de ajuste derivados dos registros do sensor HRD: coeficientes  $a=11861,823$  e  $b=0,91501066$ ).

A Tabela A.6, Anexo 1 mostra que o erro médio percentual para a estimativa de densidade, em relação às análises de laboratório, foi de 0,81%, desvio padrão

percentual de 4,69%, com o máximo erro percentual igual a 14,46%, ocorrido no furo FDMQ-0131, na litologia itabirito friável (IF).

Um gráfico do tipo *scatterplot* da densidade natural versus densidade estimada por perfilagem, para cada amostra do Alvo Maquiné, aparece na Figura 5.9.

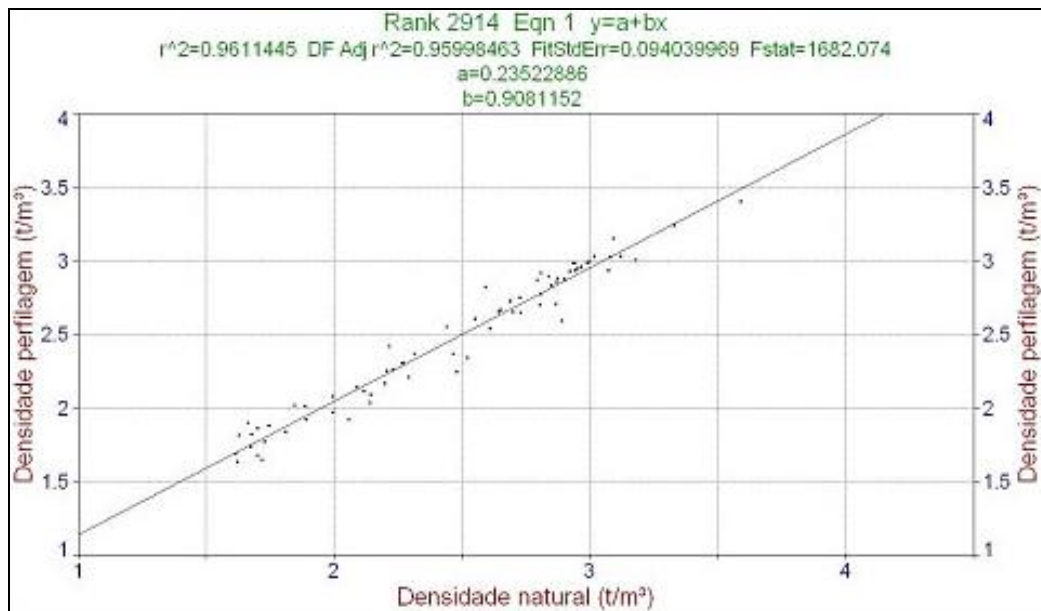


Figura 5.9 - Scatterplot dos dados de densidade natural versus densidade estimada por perfilagem geofísica gama-gama, no Alvo Maquiné.

Finalmente, uma curva de ajuste com todos os dados disponíveis foi determinada, usando-se as amostras que possuem análise de densidade feita em laboratório, considerando, naturalmente, os intervalos válidos nos perfis geofísicos. A Figura 5.10 apresenta a curva de ajuste CPS *versus* densidade natural para esta situação. Nota-se uma boa aderência de todos os pontos em relação à tendência principal, da mesma forma como ocorreu quando os dados de Dois Irmãos e Maquiné foram investigados isoladamente (Figuras 5.7 e 5.8).

A comparação, para todas as amostras das áreas alvo, entre densidades estimadas por perfilagem e densidades determinadas em laboratório é apresentada no *scatterplot* da Figura 5.11. O alinhamento de pontos segundo uma reta, com declividade muito próxima a 45°, além da pequena dispersão de pontos em torno da linha de tendência central, comprova a boa concordância entre análises de laboratório e estimativas de perfilagem. Os resultados numéricos da comparação, de modo similar ao

que foi determinado nas tabelas A.5 e A.6, Anexo 1, mostram um erro médio percentual de 0,3 %, com o maior desvio assumindo um valor de 14,52 %.

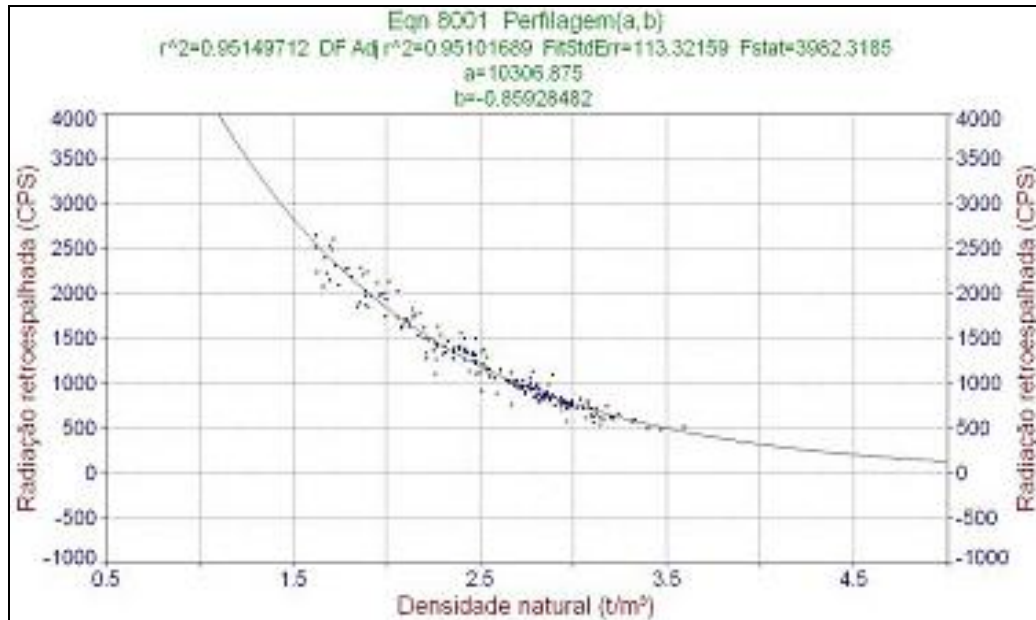


Figura 5.10 - Curva de ajuste CPS versus densidade natural (sensor HRD) obtida com todos os dados válidos (Dois Irmãos e Maquine, simultaneamente). Coeficientes para a função de densidade:  $A=10306,875$  e  $B=0,8598482$ .

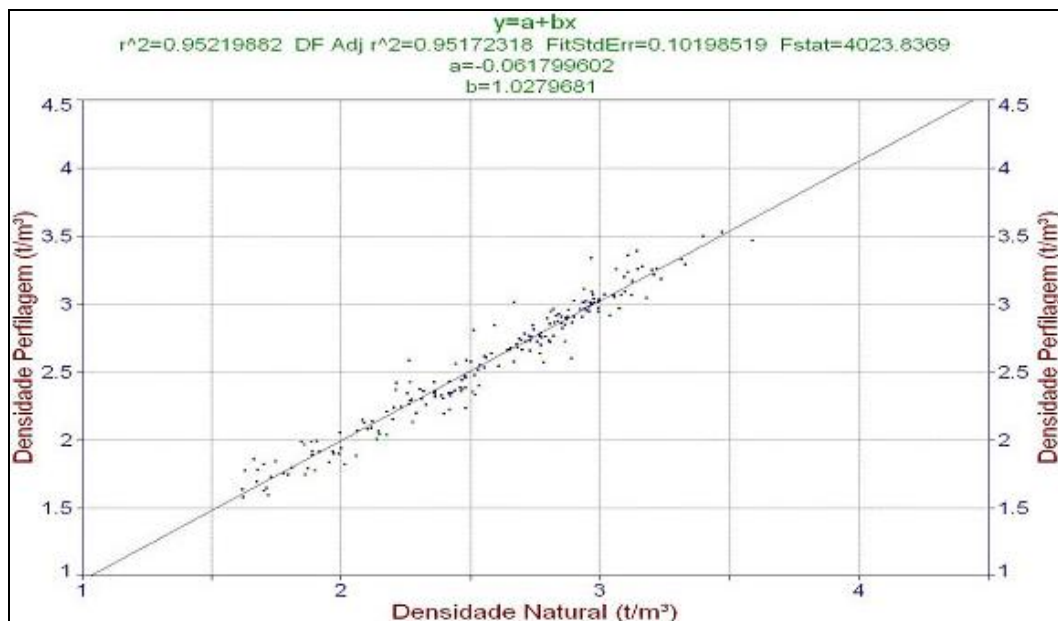


Figura 5.11 - Scatterplot (plotagem de espalhamento) de densidade natural versus densidade obtida por perfilagem geofísica gama-gama, usando a curva de ajuste do conjunto de dados dos dois alvos.



### 5.3 Densidades Estimadas por Litotipos

Os parâmetros da curva de ajuste com todos os dados disponíveis foram usados para definir estimativas de densidade em cada uma das litologias presente nos furos de sondagem dos alvos sob estudo. Neste caso, o procedimento de cálculo consiste em definir o limite superior e inferior de cada estrato, computando sua densidade média a partir do registro geofísico, que apresenta um dado de densidade para cada centímetro de comprimento ao longo do furo de sondagem (a densidade média de um estrato de 1 metro de espessura é a média aritmética de 100 registros colhidos durante a etapa de aquisição, pelo perfil geofísico).

A Tabela 5.1 apresenta os valores médios de densidade para cada tipo litológico acrescidos de limites de variação definidos por {média  $\pm$  desvio padrão}. Naturalmente, as amostras de uma litologia específica apresentam certa variabilidade. Na Figura 5.12 estão relacionadas as litologias encontradas nos perfis, com as respectivas médias e faixas de variação da densidade. É possível observar diferenciação entre as litologias, mas há também uma faixa razoavelmente grande de superposição. Em termos das densidades médias, OC (Ocre), XI (Xisto), IAF (Itabirito Anfibolítico Friável), ISC (Itabirito Semi-compacto) e QT (Quartzito) apresentam densidades abaixo de 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Os materiais CG (Canga), DO (Dolomito), IAS (Itabirito Anfibolítico Semi-compacto), IC (Itabirito Compacto), IF (Itabirito Friável), IS (Itabirito Semi-compacto) e QF (Quartzito Ferruginoso) mostram densidades iguais ou superiores a 2,5 g/cm<sup>3</sup>.

Vale lembrar que a variabilidade dos tipos litológicos impede que a comparação entre diferentes materiais seja feita sem o auxílio de um teste estatístico. Por exemplo, uma amostra de itabirito friável, pela grande variabilidade desta litologia, pode apresentar densidade similar a amostras de CG, DO, IAS ou outras litologias.

Tabela 5.1 - Densidade média e número de amostras envolvidas nas estimadas por perfilagem geofísica gama-gama para os tipos litológicos encontrados nas áreas de Dois Irmãos e Maquiné.

Litologia	Densidade Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio-padrão amostral (g/cm <sup>3</sup> )	Número de Amostras
CG	2,81	0,37	4
DO	2,61	0,26	12
IAF	2,33	-	1
IAS	2,89	0,35	4
IC	2,78	0,3	6
IF	2,59	0,4	69
IS	2,86	0,25	52
ISC	2,38	0,14	2
OC	1,99	0,3	18
QF	3,14	0,13	7
QT	2,37	0,04	5
XI	2,05	0,25	27

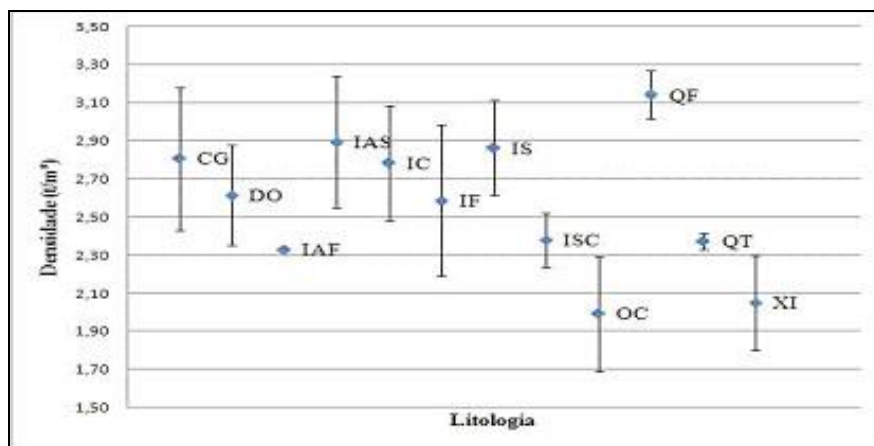


Figura 5.12 - Valores médios de densidade e variabilidade (+/- um desvio padrão) das diferentes litologias encontradas nos alvos Dois Irmãos e Maquiné, de acordo com as estimativas feitas por perfilagem geofísica gama-gama.

Uma forma de reduzir as várias incertezas existentes nas estimativas de densidade por tipo litológico obtidas via perfilagem geofísica gama-gama é aumentando o volume das amostras a serem comparadas. Para volumes maiores de amostras, as incertezas existentes nas análises laboratoriais também devem diminuir.

#### **5.4 Comparativo Entre Densidades Obtidas por Perfilagem Gama-Gama e Densidades Estabelecidas pela VALE**

O objetivo agora é comparar diretamente as densidades usadas pela Vale, por litologia, com as estimativas de perfilagem geofísica gama-gama. A densidade estabelecida pela empresa para cada litologia, na sistemática atual, é resultante de um número significativo de amostras (em geral, dezenas de amostras), coletas em diferentes furos de sondagem e afloramentos, na mesma área. O valor médio destas amostras analisadas em laboratório é tomado como representativo da litologia. Naturalmente, há uma variabilidade associada a estas análises de laboratório, mas o valor médio das amostras tenderá para um valor característico representativo da litologia, desde que tenha sido analisado um número suficientemente grande de amostras. Considera-se que as coletas de amostras e as análises de laboratório não contêm erros sistemáticos, o que é um pressuposto a ser averiguado.

Nas descrições das sondagens, verifica-se que cada litologia específica costuma apresentar-se com espessuras de vários metros, embora com variações significativas de densidade na curta distância ao longo do furo. Diante disto, optou-se por comparar uma densidade média calculada a partir de registros geofísicos com o valor de densidade estimada por análises de laboratório, para cada litologia pertencente a uma mesma área.

Estas comparações foram feitas em relação a todos os perfis geofísicos coletados nos alvos Dois Irmãos e Maquiné. Em termos das densidades médias determinadas em laboratório e adotadas pela empresa, a Tabela 5.2 especifica os valores (aplicados igualmente em Dois Irmãos e Maquiné), individualizando-os por litologia. A título de exemplo, o perfil do Figura 5.13 mostra, lado-a-lado, os valores de densidade obtidos por perfilagem e por análise de laboratório, para o furo FDDI-0224.

Tabela 5.2 - Valores médios de densidade por litologia usados na avaliação do alvo Dois Irmãos, definidos pela Vale em ensaios de laboratório de testemunhos de sondagem e ensaios em afloramentos (dados de 2007).

Litologia	Densidade Média
<b>Alvo Dois Irmãos e Maquiné</b>	<b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>CG</b>	<b>3,000</b>
<b>SO</b>	<b>2,000</b>
<b>LT</b>	<b>1,990</b>
<b>IF</b>	<b>2,280</b>
<b>IS</b>	<b>2,785</b>
<b>IAS</b>	<b>2,785</b>
<b>IAF</b>	<b>2,280</b>
<b>ICT</b>	<b>2,280</b>
<b>QT</b>	<b>1,990</b>
<b>XI</b>	<b>1,990</b>

Percebe-se, em geral, significativa semelhança entre as densidades obtidas pelas duas metodologias nos trechos considerados aproveitáveis com relação ao caliper. Há, inclusive, para os materiais friáveis, uma tendência do perfil geofísico, em pequenas profundidades, a apresentar densidades menores que as determinadas em laboratório, ocorrendo o inverso em profundidades maiores. Isto seria indicativo do efeito de compactação aparecendo nos registros geofísicos.

Esta variação de densidade ao longo da vertical, e ignorada quando se usa valores médios por litologias, leva a diminuição de acuracidade na estimativa da massa do minério. O uso da média pode levar a uma sistemática subestimativa das massas nos níveis iniciais do depósito e uma inversão nos níveis mais inferiores da mesma litologia. O uso de valores variáveis para densidade de cada composta permite corrigir este viés de estimativa da massa dos recursos e reservas.

Somente como comparação, com base nos valores entre as tabelas 5.1 e 5.2, o valor médio de densidade do Itabirito Friável (IF) obtido na perfilagem geofísica é de 2,59 g/cm<sup>3</sup> e o valor médio utilizado pela Vale é de 2,28 g/cm<sup>3</sup>. Nota-se que, mesmo em valores médios, os valores de densidade de uma mesma litologia difere bastante.

Porém, tem-se uma quantidade muito maior de dados de densidade medidos por perfilagem geofísica gama-gama por furo de sondagem, com informação contínua ao

longo do furo. Sendo assim, evita-se a utilização de médias de densidades com a perfilagem geofísica.

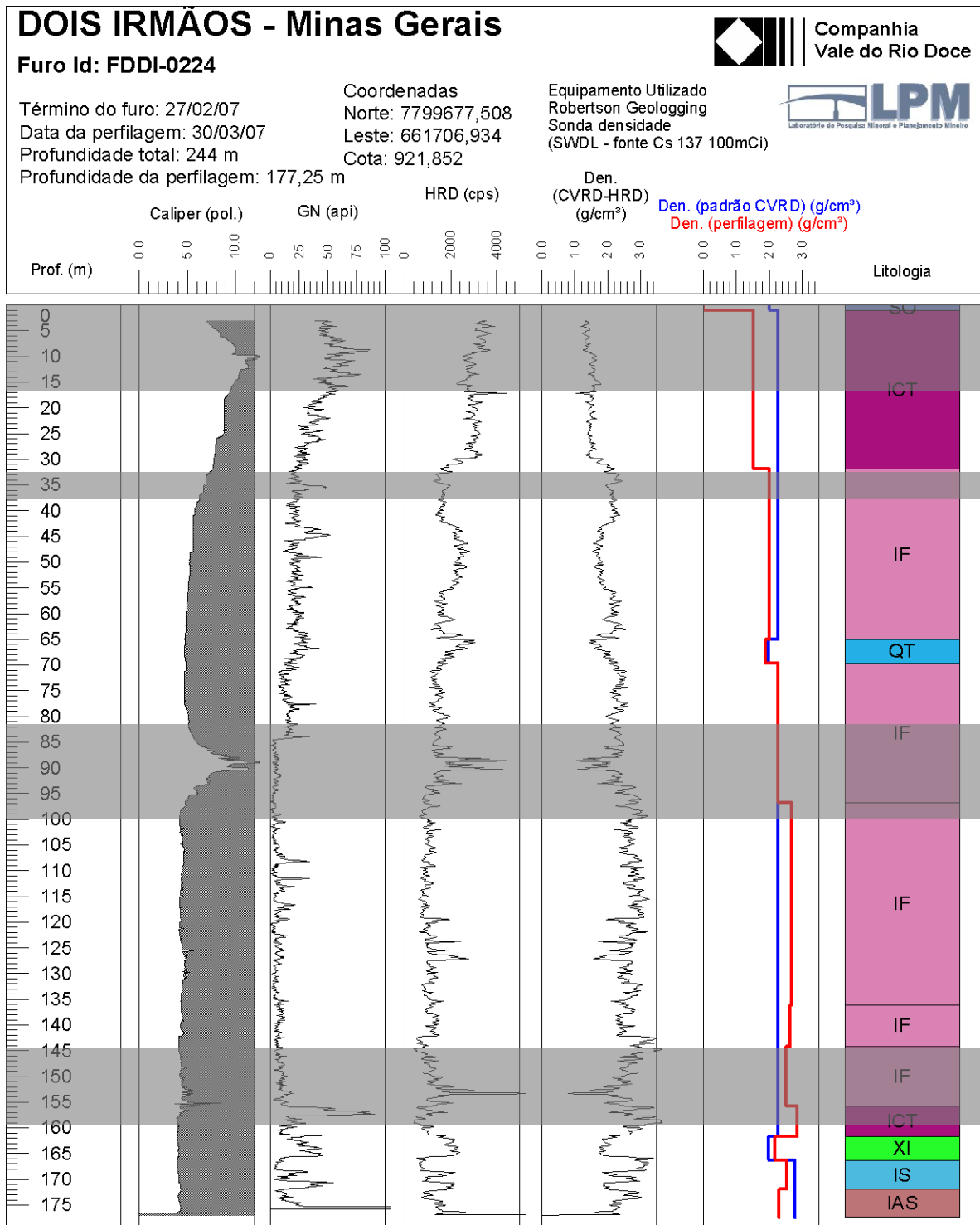


Figura 5.13 - Perfis geofísicos do furo FDDI-0224, comparando (segunda coluna, da direita para a esquerda) densidades estimadas por perfilagem geofísica gama-gama (linha vermelha) e por análise laboratorial (linha azul). A tarja cinza representa trechos não confiáveis para estimativa de densidade.

# Capítulo 6

## Conclusões e Recomendações

Neste Capítulo, são apresentadas conclusões e considerações finais sobre os trabalhos apresentados nesta dissertação. E por fim, serão feitas recomendações para trabalhos futuros.

### 6.1 Conclusões

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 este parâmetro *in situ* irá minimizar 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). Atualmente, isso não é possível, devido às dificuldades operacionais e do próprio minério (friável) encontradas pela Vale para a medida direta da densidade nos testemunhos de sondagem rotativa.

Os testes de utilização da técnica de perfilagem geofísica gama-gama em furos de sondagem realizados nos Alvos Dois Irmãos e Maquiné indicam os seguintes resultados:

- ✓ O método geofísico se mostrou aplicável, principalmente, quando não existe material íntegro para medidas de densidade de laboratório, uma vez que com a perfilagem é possível medir a densidade da rocha in situ. Porém, tem-se a necessidade de maior amostragem e melhor calibração do método geofísico em um campo de calibração controlado;
- ✓ O método se mostrou aplicável, também, quando a recuperação do testemunho é baixa ou inexistente, ou seja, a perfilagem gama-gama recupera a informação perdida pelo método convencional (sondagem testemunhada);
- ✓ 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;
- ✓ A perfilagem gama-gama é mais precisa no controle do posicionamento das amostras/contatos e da profundidade real no furo de sondagem do que a sondagem testemunhada, sendo que, em geral, os métodos de perfilagem são utilizados corriqueiramente para isso na indústria do petróleo. Isto foi testado e comprovado com base em um perfil em um furo com 87 m com revestimento metálico, pois a profundidade do revestimento foi observada exatamente no perfil geofísico, coincidindo com o valor esperado. Ou seja, os problemas de posicionamento das amostras/contatos não se referem à sonda de perfilagem geofísica gama-gama;
- ✓ Ocorrem deslocamentos dos contatos geológicos em vários furos, onde as espessuras dos materiais descritos pela geologia são diferentes das espessuras perfiladas. Se este tipo de erro ocorrer em uma parte significativa de furos de um depósito mineral estudado, pode-se ter uma grande perda/ganho de minério na descrição geológica dos furos de sondagem e, conseqüentemente, nos modelos geológicos desenhados com base apenas nas informações da sondagem. Isto vai gerar perdas ou ganhos nas estimativas e cálculo finais de recursos/reservas. Os resultados deste estudo mostram a perfilagem geofísica alertando para uma

possível discrepância (erro) entre o perfil descrito (assumido como conhecido) e a realidade física em furos de baixa recuperação;

- ✓ O perfil de densidade apresenta, em furos não-revestidos, bons resultados quando se verifica um comportamento aproximadamente constante para o diâmetro do furo de sondagem. Os testes mostraram que é possível obter estimativas de densidade das litologias com diferenças inferiores a 15% em relação aos resultados de análises de laboratório feitas em testemunhos de sondagem;
- ✓ As variações graduais no diâmetro dos furos podem ser tratadas obtendo-se fatores de correção para a função de resposta da ferramenta;
- ✓ Nota-se, claramente, que a qualidade das estimativas de densidade obtidas por perfilagem depende da manutenção de furos com mínima rugosidade;
- ✓ Na construção da curva de ajuste, os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) ilustram correlações elevadas de 0,9522 e de 0,9556 entre os dados de densidade de laboratório e de CPS, para os Alvos Dois Irmãos e Máquina, respectivamente;
- ✓ Para o Alvo Dois Irmãos, o erro médio percentual para a estimativa de densidade ( $r^2=0,949$ ), em relação às análises de laboratório, foi de 0,5%, com o máximo erro percentual igual a 14,85%, ocorrido no furo FDDI-0275, na litologia itabirito friável (IF);
- ✓ Para o Alvo Maquiné, o erro médio percentual para a estimativa de densidade ( $r^2=0,961$ ), em relação às análises de laboratório, foi de 0,81%, com o máximo erro percentual igual a 14,46%, ocorrido no furo FDMQ-0131, na litologia itabirito friável (IF);
- ✓ Assumindo-se todo o conjunto de dados, o erro médio percentual para a estimativa de densidade foi de 0,3 %, com o maior desvio assumindo um valor de 14,52 %;

Em se tratando da operação da perfilagem, pode-se notar que:



- ✓ Durante a execução e coleta de dados em campo, a equipe se defrontou com dois ambientes distintos de trabalho. Em furos mais recentes, com a perfuração em fase de conclusão ou recém concluída, o equipamento de perfuração e outros materiais de sondagem ainda estavam presentes no local, dificultando o acesso da equipe de perfilagem. Muitas vezes, a presença do equipamento de perfuração obrigou a montagem do equipamento de perfilagem sobre cavaletes próximos à boca do furo e não dentro do veículo, como seria preferível;
- ✓ Estima-se que o tempo médio para a execução do procedimento completo de perfilagem de densidade esteja em torno de 3 h, para um furo com 100 m de profundidade, respeitando-se todos os procedimentos operacionais;
- ✓ O fato do furo ser inclinado dificultou a movimentação da sonda de perfilagem, pois o equipamento de investigação geofísica desce somente por efeito da gravidade. Como o furo apresenta-se inclinado, a ferramenta de perfilagem desce em atrito com a parede interna, dificultando a sua movimentação;
- ✓ Embora não seja uma regra geral, nota-se que a profundidade perfilada se aproxima da profundidade sondada (dentro do limite de 175 m, máximo para o equipamento de perfilagem) quanto mais recente for o furo. Sendo assim, o melhor momento para efetuar a perfilagem geofísica gama-gama e obter um dado proveitoso é logo após a perfuração alcançar a profundidade de 180 m e antes de ser efetuada a “lavagem” para a medida da inclinação do furo;
- ✓ O aproveitamento dos perfis é, em média, de 69% no Alvo Dois Irmãos e de 74% no Alvo Maquiné;
- ✓ O maior índice de desmoronamento nos furos ocorre nos materiais friáveis, como pode ser verificado nos perfis de caliper;
- ✓ O volume de investigação da sonda de perfilagem geofísica gama-gama é diferente do volume amostrado pela sondagem, pois a penetração do raio gama no meio é de aproximadamente 12cm além da parede do furo. A análise de laboratório não se refere ao mesmo volume de material investigado na perfilagem geofísica gama-gama, já que os testemunhos de sondagem perfilados têm 6,6 cm de diâmetro;

Em relação à comparação dos valores de densidade utilizados na Vale e os obtidos neste trabalho, conclui-se:

- ✓ Para os materiais friáveis ocorre uma tendência do perfil geofísico, em pequenas profundidades, a apresentar densidades menores que as médias determinadas pela Vale em laboratório e usadas nas estimativas, ocorrendo o inverso em profundidades maiores. Esta variação de densidade ao longo da vertical é ignorada quando se usa valores médios por litologias e leva a diminuição de acuracidade na estimativa da massa do minério;
- ✓ O uso da média pode levar a uma sistemática subestimativa das massas nos níveis iniciais do depósito e uma inversão nos níveis mais profundos da mesma litologia. O uso de valores variáveis para densidade de cada composta permite corrigir este viés de estimativa da massa dos recursos e reservas;
- ✓ Através da perfilagem gama-gama, tem-se uma quantidade muito maior de dados de densidade medidos por furo de sondagem, com informação contínua ao longo do furo. Sendo assim, evita-se a utilização de médias de densidades com esta metodologia.

Em resumo, conclui-se que este trabalho cumpriu o objetivo principal do projeto, que foi de avaliar a aplicabilidade da ferramenta de perfilagem gama-gama para medir densidade *in situ* em furos de sondagem.

O método de perfilagem geofísica gama-gama deve ser utilizado nas avaliações de recursos e reservas nos depósitos minerais da Vale, principalmente no minério de ferro que é a maior commodity da companhia.

## 6.2 Recomendações para os Trabalhos Futuros

Em relação à aplicação da perfilagem geofísica gama-gama, recomenda-se construir um campo de calibração controlado para estudar todos os fatores que influenciam os dados de perfilagem gama-gama e que, conseqüentemente, causam erros significativos para as estimativas de densidade.

Ao longo do trabalho pode-se notar que as variações na rugosidade das paredes dos furos e no diâmetro afetaram significativamente a qualidade dos dados adquiridos em campo e aproveitamento dos perfis.

O problema da rugosidade da parede do furo e lama/reboco poderá ser estudado com maior detalhe através a utilização das informações de dois detectores. Com estas duas leituras em diferentes profundidades de investigação, acrescida da medida da espessura do reboco com a curva do calíper, a ferramenta pode realizar internamente correções ou compensações e apresentar valores bem mais realistas de densidade. Esta compensação deve ser realizada com base nos gráficos de “espinha e costela” (*spine and ribs*).

Para os futuros trabalhos de perfilagem gama-gama, pode-se, também, revestir os furos de sondagem com PVC, material que influencia pouco na penetração dos raios gama. Porém, este revestimento deverá ser realizado após uma leitura de calíper da parede do furo, para detecção de zonas com maior rugosidade no furo. O efeito do PVC pode ser estudado, também, no campo de calibração.

Nos trabalhos futuros pode-se, ainda:

- ✓ Aplicar a ferramenta em bancada nas minas, pois através destes dados pode-se fazer uma reconciliação mais precisa dos quantitativos estimados em modelos geológicos usando densidade média das litologias com os calculados com base nos dados de densidade obtidos na perfilagem;
- ✓ Aumentar a quantidade de amostras com a realização de mais perfis gama-gama no minério e estéril (pouco amostrado neste trabalho), pois uma forma de reduzir as várias incertezas existentes nas estimativas de densidade por tipo litológico obtidas via perfilagem geofísica gama-gama é aumentando o volume

das amostras a serem comparadas. Para volumes maiores de amostras, as incertezas existentes nas análises laboratoriais também devem diminuir;

- ✓ Medir o nível de água nos furos perfilados, estudando a influência da água/umidade nas estimativas de densidade.

## Capítulo 7

### Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, F.F.M. 1977. **O Cráton do São Francisco**. REVISTA BRASILEIRA DE GEOSCIÊNCIAS, 1977, 7(4): 349-364.
- ALMEIDA, F.F.M. & HASSUY, Y. (coords.) 1984. O Precambriano do Brasil. SÃO PAULO. EDGARD BLÜCHER, 542p.
- 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.
- BORSARU, M. & CHARBUCINSKI, J. **Nuclear Borehole Logging Techniques Developed by CSIRO Exploration and Mining for the Metalliferous Mining Industry**. CSIRO, Division of Exploration and Mining. To be published, Int. J. Appl. Rad. and Isot. <http://www.cat.csiro.au/dem/msg/scirev/sydnabs2.pdf>
- BORSARU, M.; CERAVOLO, C.; TCHEN, T. 1995. **The application of the low activity borehole logging tool to the iron ore mining industry**. NUCLEAR GEOPHYSICS 9, p.55-62.
- BORSARU, M.; ROJC, A.; RONASZEKI, J.; SMITH, C. 2002. **The determination of Fe, Si and Al content in iron ore blastholes by nuclear logging**. THE AUSTRALIAN INSTITUTE OF MINING AND METALURGY, PUBLICATION SERIES NO 7/2002, p.171-176.
- 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.
- 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.

- CHEMALE JR., F., ROSIERE, C.A. & ENDO, I. – 1994 – **The tectonic Evolution of the Quadrilátero Ferrífero , Minas Gerais, Brazil.** PRECAMBRIAN RESEARCH, 65: 25-54.
- CVRD, 2002. **Caraterização mineralógica de rochas.**
- DEUTSCH, C.V. & JOURNAL, A.G. 1998. **GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide.** 2ª ed., New York (US), Oxford University Press, 369 p.
- DORR, J.V.N. 1969. **Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** WASHINGTON, DNPM/USGS/ 109p. (Prof. Paper 641-A).
- ENDO I., SILVA L. G. & ZAVAGLIA G. 2004. **Estratigrafia e arcabouço estrutural do Complexo Ferrífero Brucutú-Dois Irmãos – segmento NE do Sinclinal Gandarela.** 20p. Relatório Interno.
- ESCHWEGE, W.L.VON. 1822. **Geognostisches Gemälde von Brasilien und wahrscheinliches Muttergestein der Diamanten.** BERLIN. WEIMER. 44p.
- ESCHWEGE, W.L.VON. 1832. **Beitraege zur gebirgskunde Brasiliens.** BERLIN. G. REIMER VERLAG. 488p.
- ESCHWEGE, W.L.VON. 1833. **Pluto Brasiliensis.** BERLIN. G. REIMER VERLAG. 622p.
- HART'S E&P. 2002. **Logging history rich with innovation.** IN [WWW.EANDPNET.COM](http://WWW.EANDPNET.COM), P. 52-55.
- HEARST, J.R. & NELSON, P.H. & PAILLETT, F.L. 2000. **Well Logging for Physical Properties.** 2ª ed., John Wiley and Sons, Ltd., 483 p.
- LADEIRA, E. A. & VIVEIROS, J.F.M. DE – 1984 – **Hipótese sobre a Estruturação do Quadrilátero Ferrífero com base nos dados disponíveis.** IN: SIMPÓSIO GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, SBG. NÚCLEO MINAS GERAIS., BELO HORIZONTE, Bol. 4, 19 p.
- MARSHAK, S. & ALKIMIN, F.F. 1989. **Proterozoic Contraction/Extension tectonics of The Southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brasil.** TECTONICS, v.8, no3, p. 555- 571.
- MENDOZA, A.; VERDIN, C.T; PREEG, W. 2006. **Environmental and Petrophysical Effects on Density and Neutron Porosity Logs Acquired in Highly Deviated Wells.** , SPWLA 47<sup>TH</sup> ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, JUNE 4-7, UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN, 11 p.
- NERY, G.G. 2003. **Perfil de densidade.** NOTAS DE AULA, 8 p.

- OLIVEIRA, L.J. de. 2005. **Avaliação do Uso da Perfilagem Geofísica para Obtenção de Informações Secundárias para Utilização em Co Estimativas de Variáveis Geológico - Mineiras**. Dissertação de Mestrado, PPGEM – EE – UFRGS, Porto Alegre (RS), 164 p. SILVA, W.P. da & SILVA, C.M.D.P.S. e. 1998. Tratamento de Dados Experimentais. 2ª ed., João Pessoa (PB), UFPB/Editora Universitária, 199 p. 213
- PETLER, J.S. 1990. **Modelling the spatial responde of a compensated density tool**. IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL 37, NO. 2, APRIL, 5 p.
- SANTOS, P.A. 2006. **Estudo de densidade de rocha e comparação de técnicas de medição, na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. ISEL, ITABIRA, 58 p.
- SAMWORTH, J.R. 1980. **Slimline Dual Detector Density Logging – A Semitheoretical but Practical Approach to Correction and Compensation**. JOURNAL OF PETROLEUM TECHNOLOGY, 7 p.
- SAMWORTH, J.R. 1992. **The Dual-Spaced Density Log – Characteristics, Calibration and Compensation**. THE LOG ANALYST, JANUARY-FEBRUARY, 8 p.
- 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.
- TEIXEIRA, W. 2009. **Decifrando a Terra**. EDITORA NACIONAL, 624 p.
- WAHL, J.S.; TITTMAN, J.; JOHNSTONE, C. W.; ALGER, R. P. 1964. **The dual spacing formation density log**. JOURNAL OF PET. TECH, V. 16, p. 1411-1416.
- 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.

# **ANEXO 1**



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0140

Término do furo: 14/11/06

Data da perfilagem: 26/03/07

Profundidade total: 160,90 m

Profundidade da perfilagem: 58,84 m

Coordenadas

Norte: 7798856,062

Leste: 661222,124

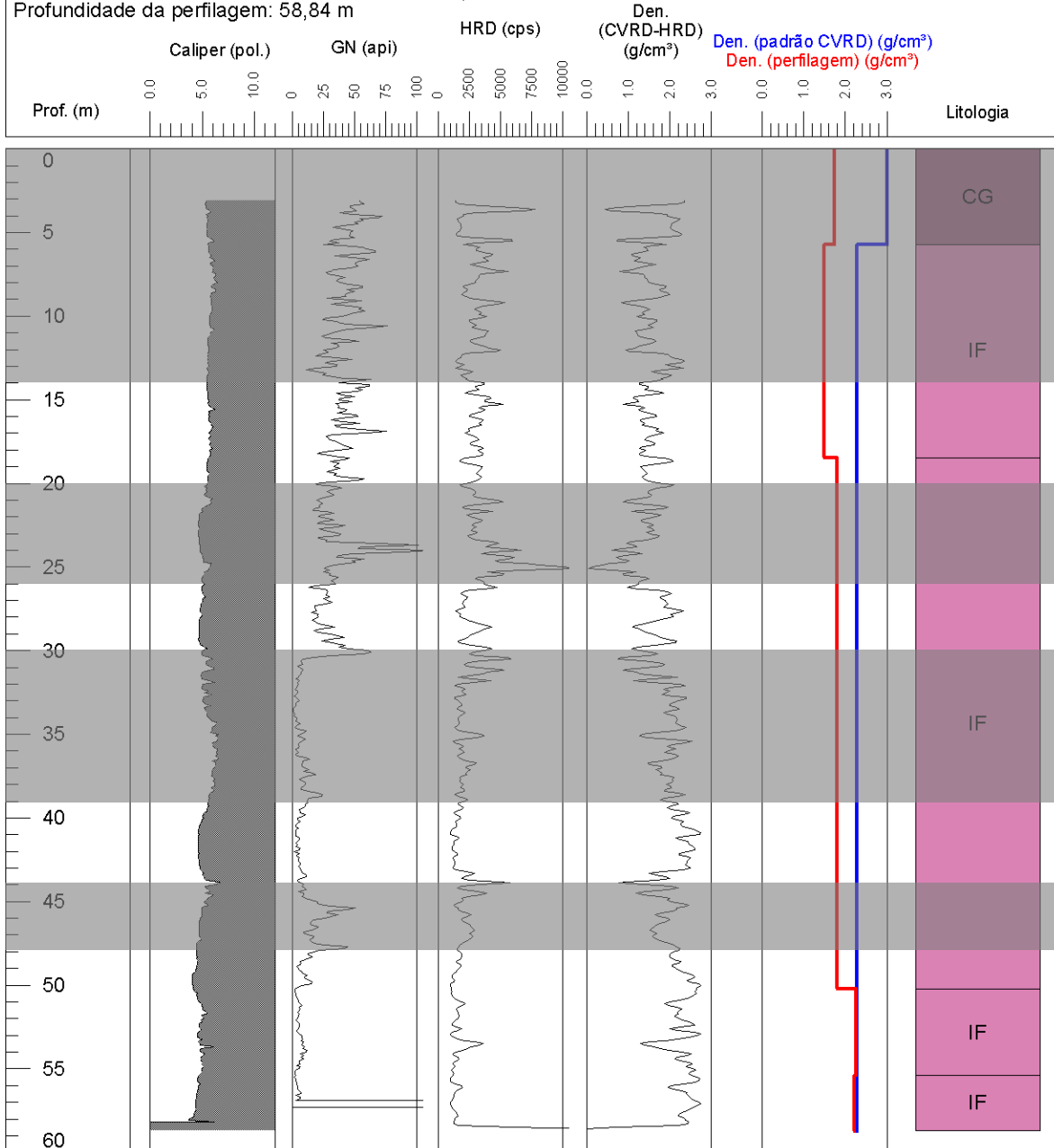
Cota: 874,754

Equipamento Utilizado

Robertson Geologging

Sonda densidade

(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0153

Término do furo: 12/09/07

Dara da perfilagem: 02/04/07

Profundidade total: 189,65 m

Profundidade da perfilagem: 12,21 m

Coordenadas

Norte: 7798697,202

Leste: 6589025,637

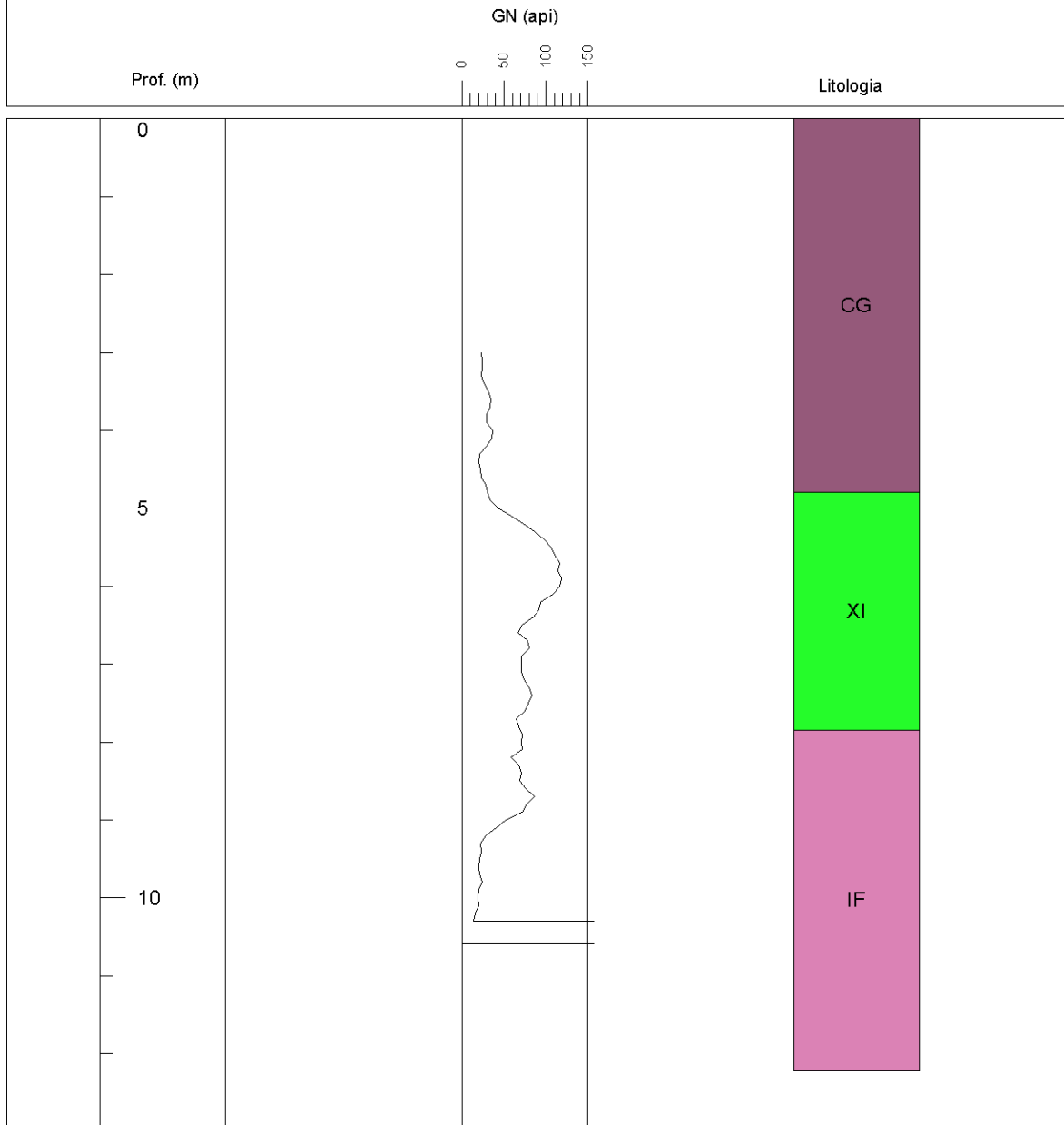
Cota: 1143,172

Equipamento Utilizado

Robertson Geologging

Sonda densidade

(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0201

Término do furo: 13/02/07

Data da perfilagem: 20/03/07

Profundidade total: 165,157 m

Profundidade da perfilagem: 62,12 m

Coordenadas

Norte: 7801291,569

Leste: 663702,813

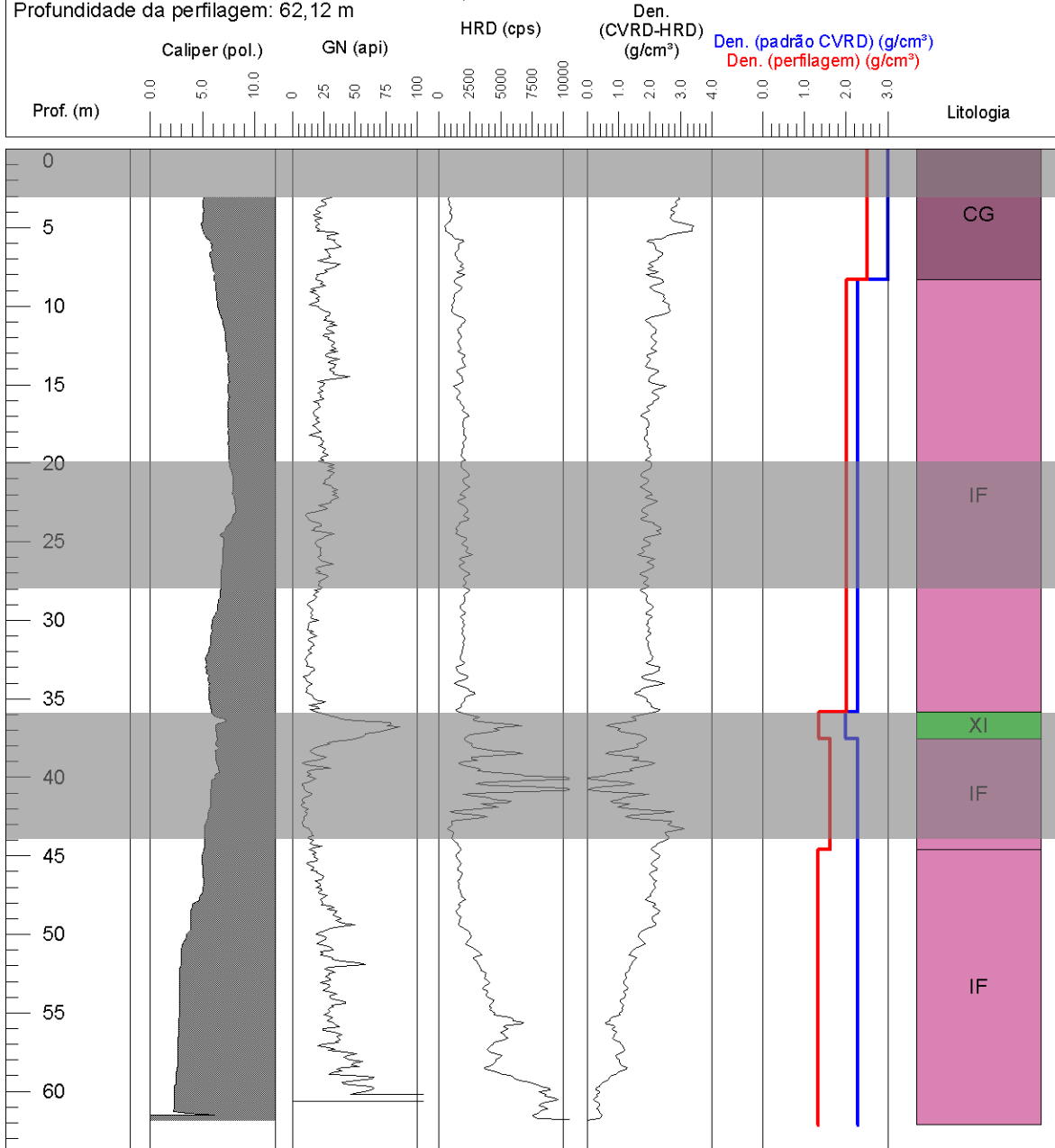
Cota: 998,157

Equipamento Utilizado

Robertson Geologging

Sonda densidade

(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



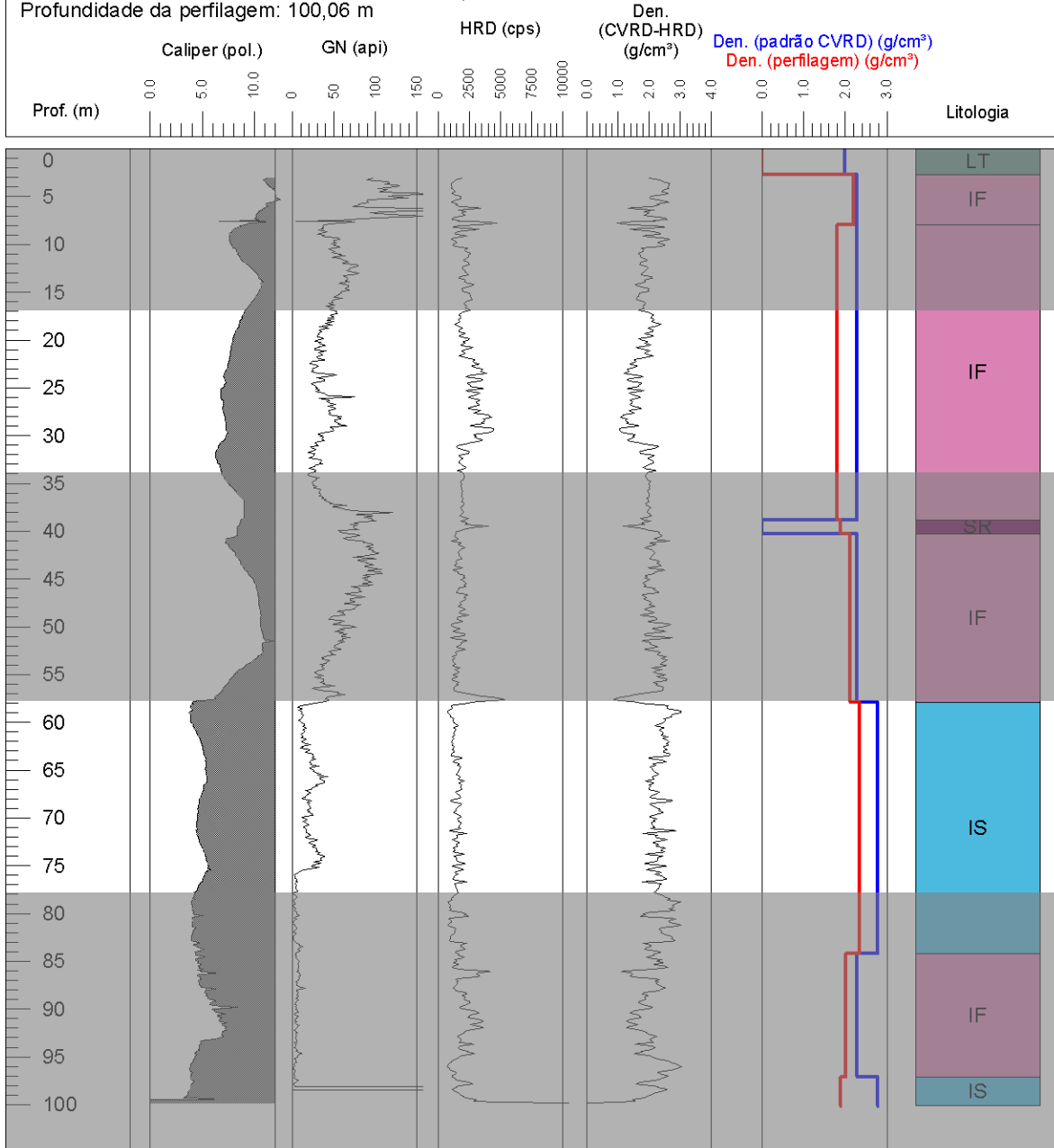
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0202

Término do furo: 15/02/07  
Data da perfilagem: 17/03/07  
Profundidade total: 224,90 m  
Profundidade da perfilagem: 100,06 m

Coordenadas  
Norte: 7801092,446  
Leste: 663707,057  
Cota: 949,90

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



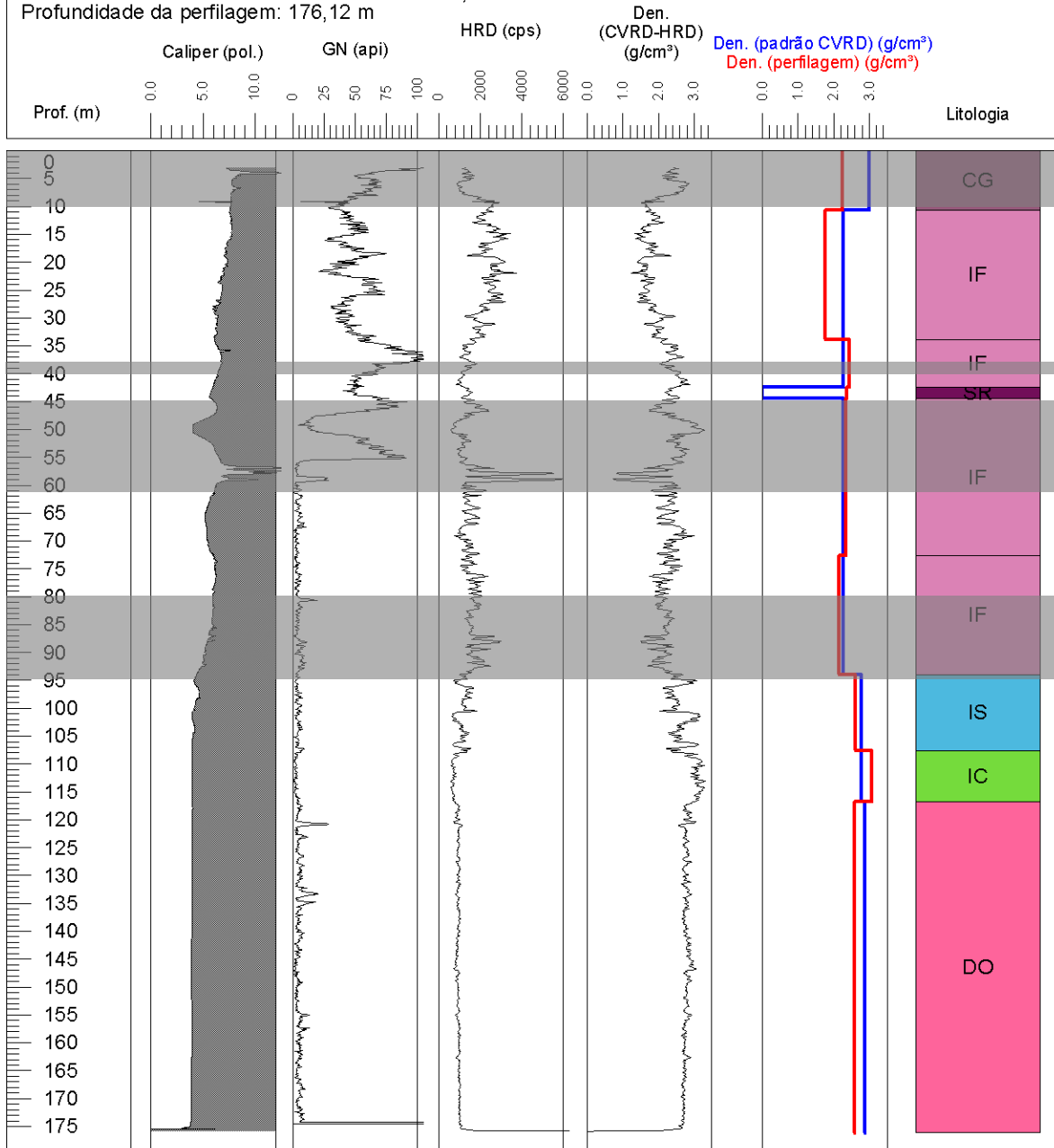
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0209

Término do furo: 17/04/07  
Data da perfilagem: 17/03/07  
Profundidade total: 270,40 m  
Profundidade da perfilagem: 176,12 m

Coordenadas  
Norte: 7800889,017  
Leste: 663309,829  
Cota: 916,409

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



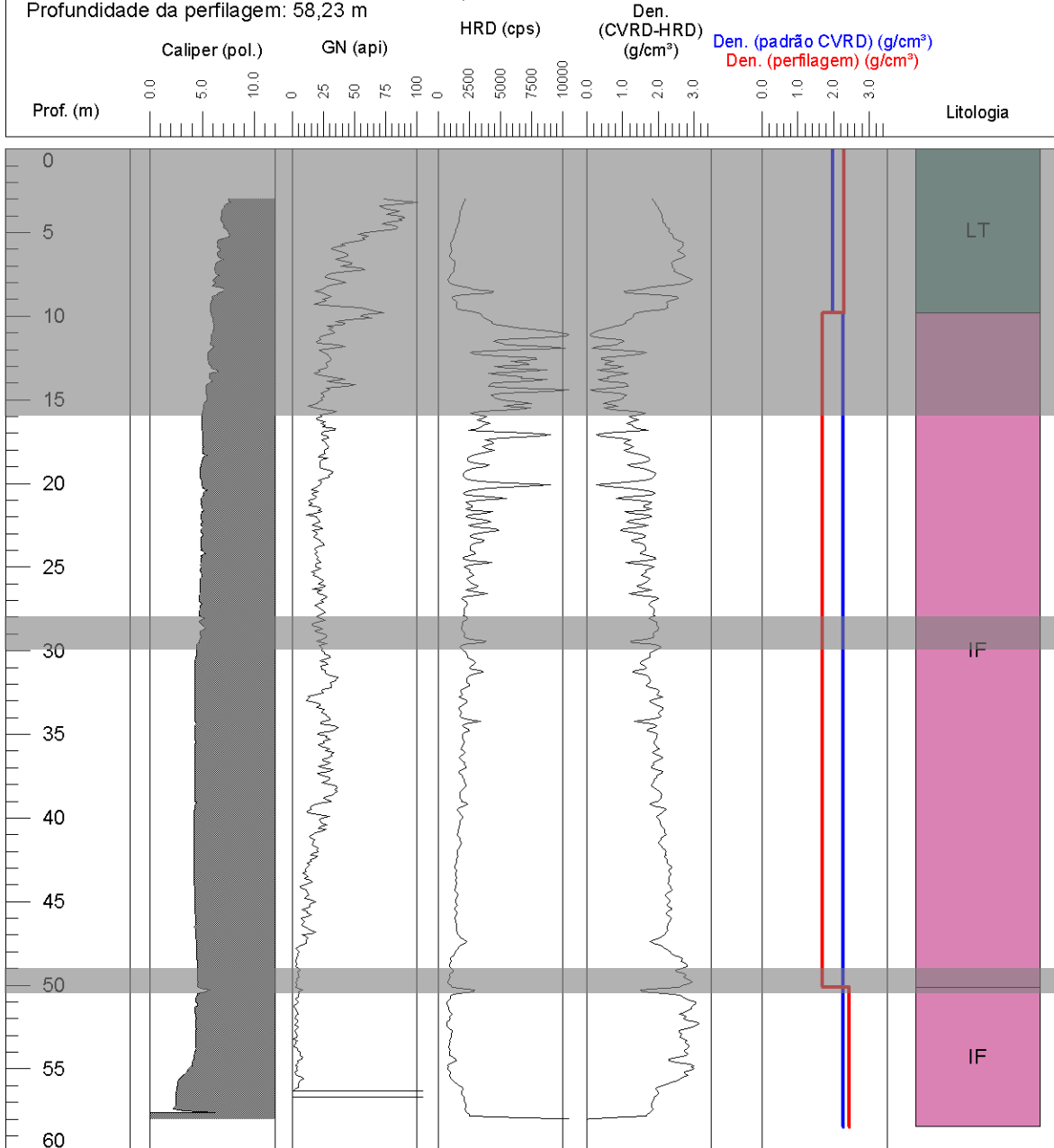
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0213

Término do furo: 28/09/06  
Data da perfilagem: 27/03/07  
Profundidade total: 140,45 m  
Profundidade da perfilagem: 58,23 m

Coordenadas  
Norte: 7800683,918  
Leste: 662113,808  
Cota: 901,924

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais

Furo Id: FDDI-0218

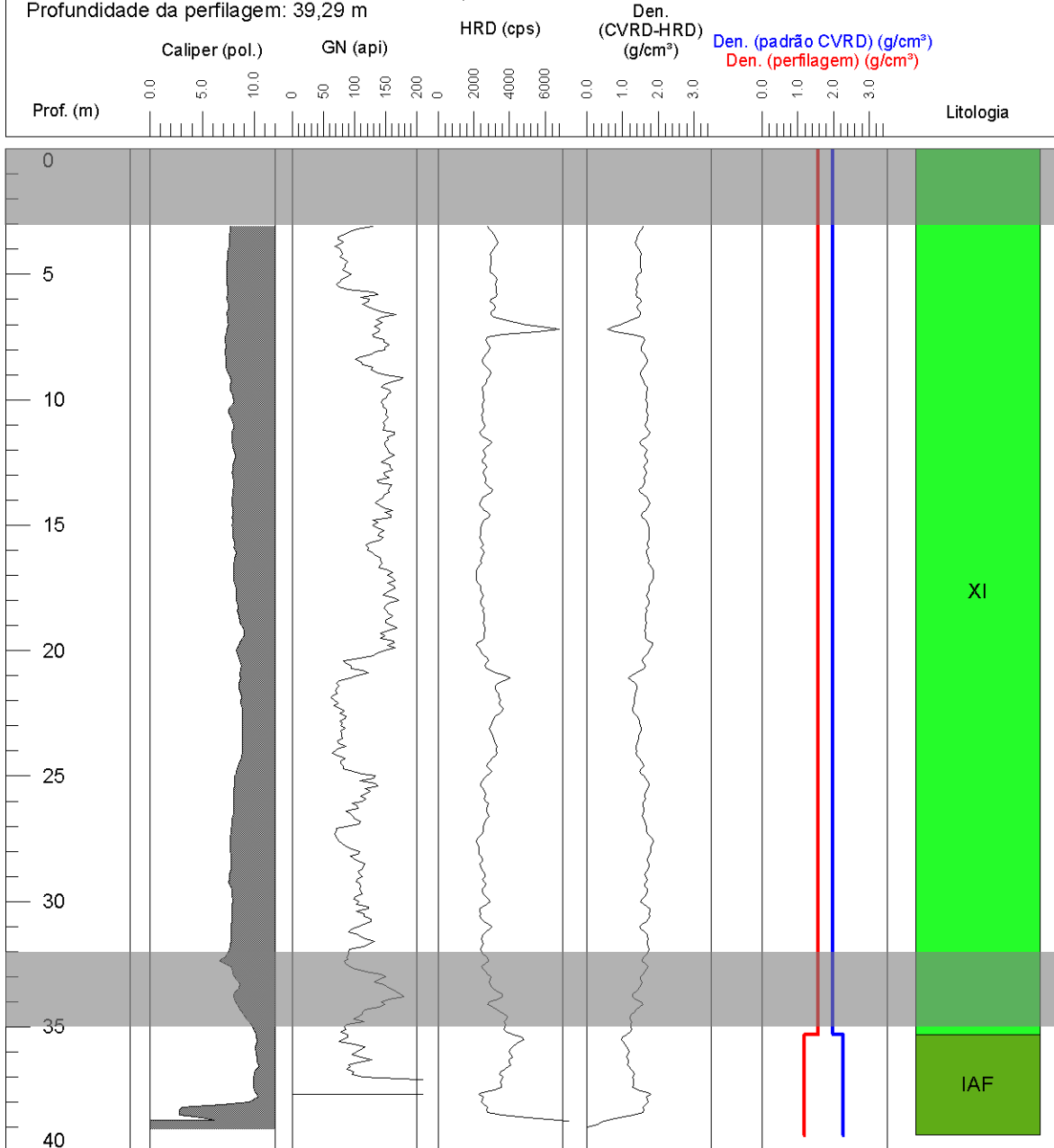


Companhia  
Vale do Rio Doce

Término do furo: 06/10/06  
Data da perfilagem: 26/03/07  
Profundidade total: 150,95 m  
Profundidade da perfilagem: 39,29 m

Coordenadas  
Norte: 7800875,738  
Leste: 661717,436  
Cota: 998,514

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



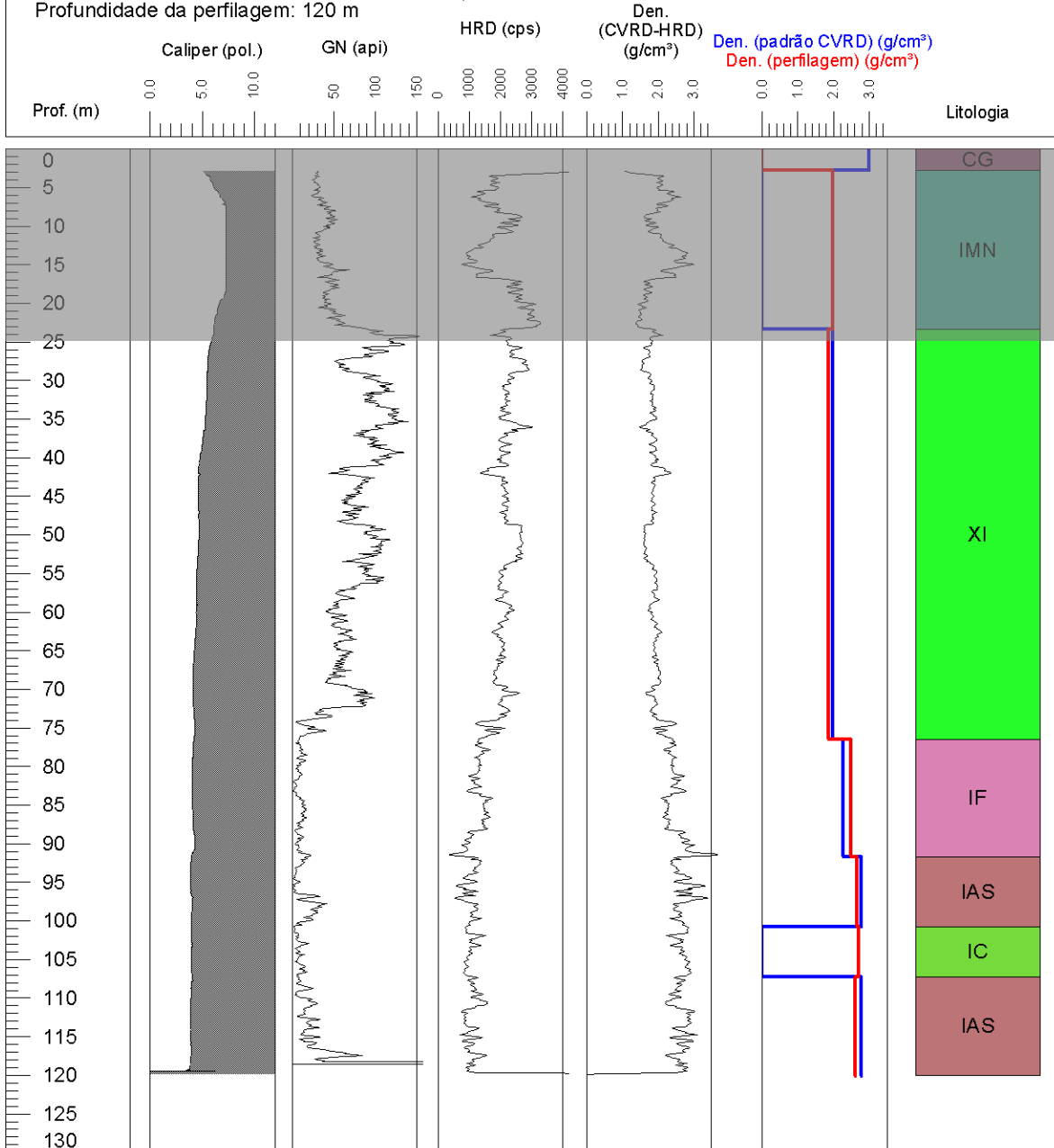
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0219

Término do furo: 04/09/06  
Data da perfilagem: 28/08/06  
Profundidade total: 204 m  
Profundidade da perfilagem: 120 m

Coordenadas  
Norte: 7800674,963  
Leste: 661711,812  
Cota: 950,906

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)





# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



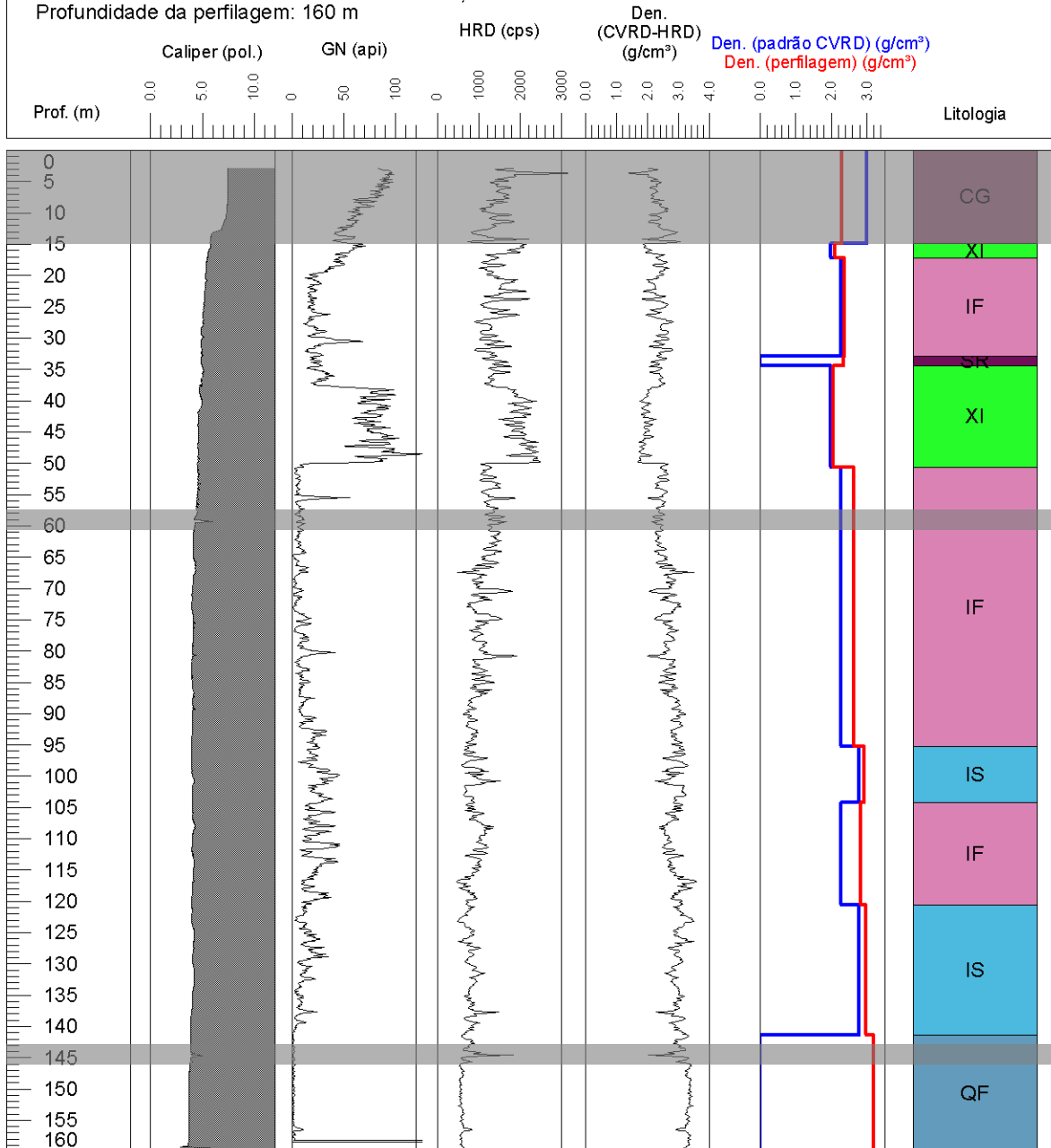
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0220

Término do furo: 29/08/06  
Data da perfilagem: 29/08/06  
Profundidade total: 169,30 m  
Profundidade da perfilagem: 160 m

Coordenadas  
Norte: 7800482,864  
Leste: 661706,041  
Cota: 912,657

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



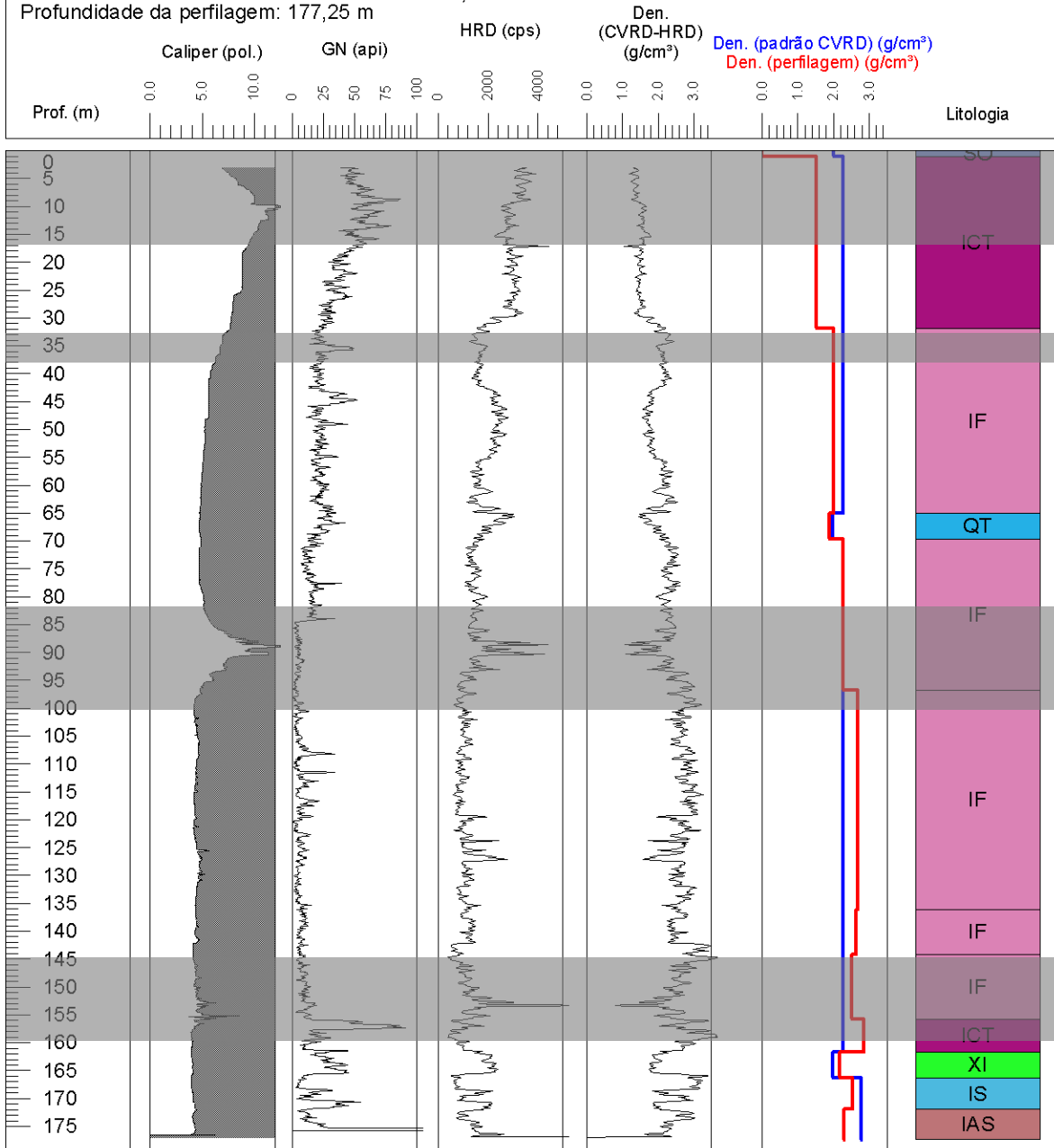
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0224

Término do furo: 27/02/07  
Data da perfilagem: 30/03/07  
Profundidade total: 244 m  
Profundidade da perfilagem: 177,25 m

Coordenadas  
Norte: 7799677,508  
Leste: 661706,934  
Cota: 921,852

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



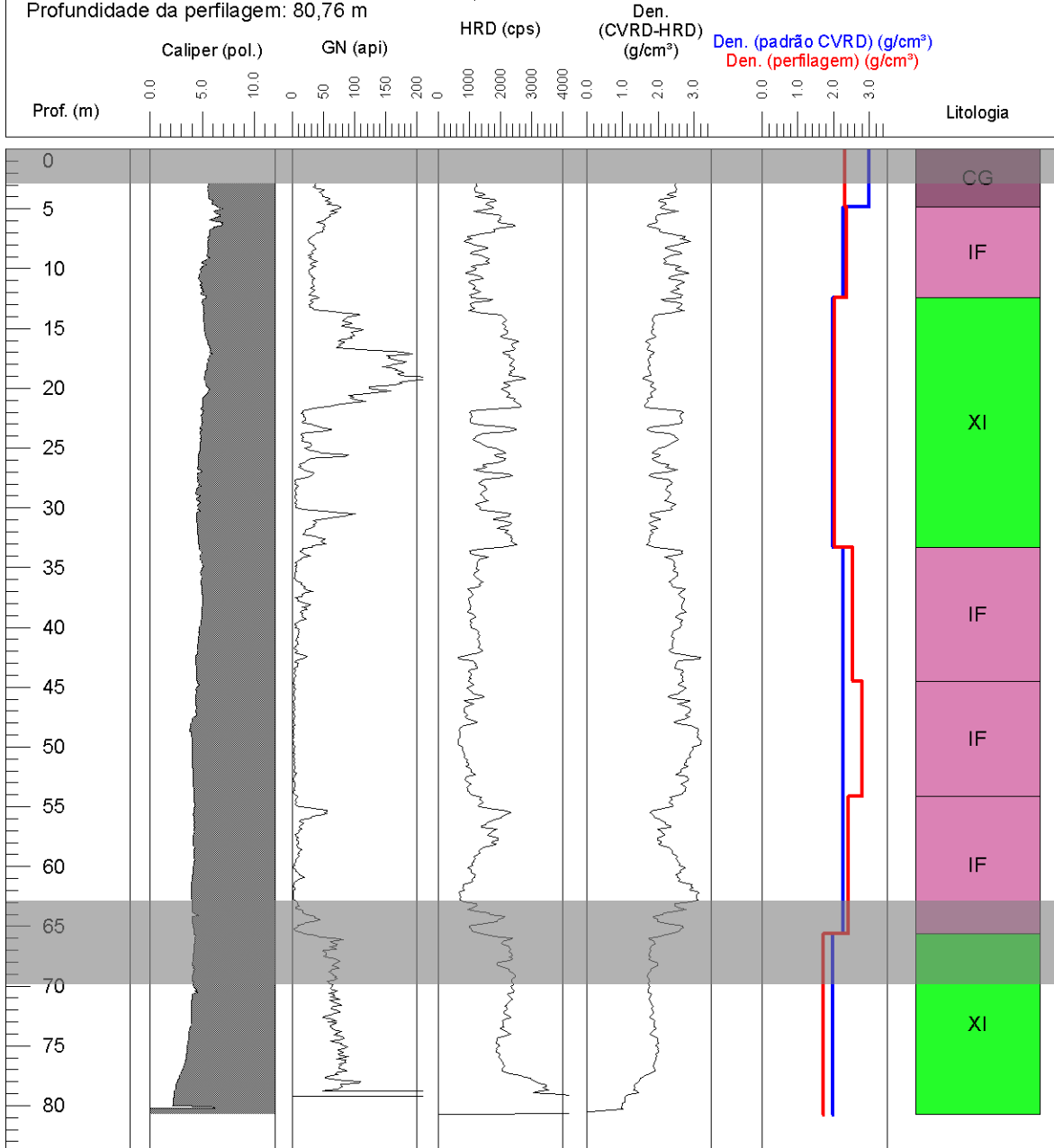
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0248

Término do furo: 24/04/07  
Data da perfilagem: 24/04/07  
Profundidade total: 88,15 m  
Profundidade da perfilagem: 80,76 m

Coordenadas  
Norte: 7798784,834  
Leste: 659103,075  
Cota: 1093,783

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais

Furo Id: FDDI-0250

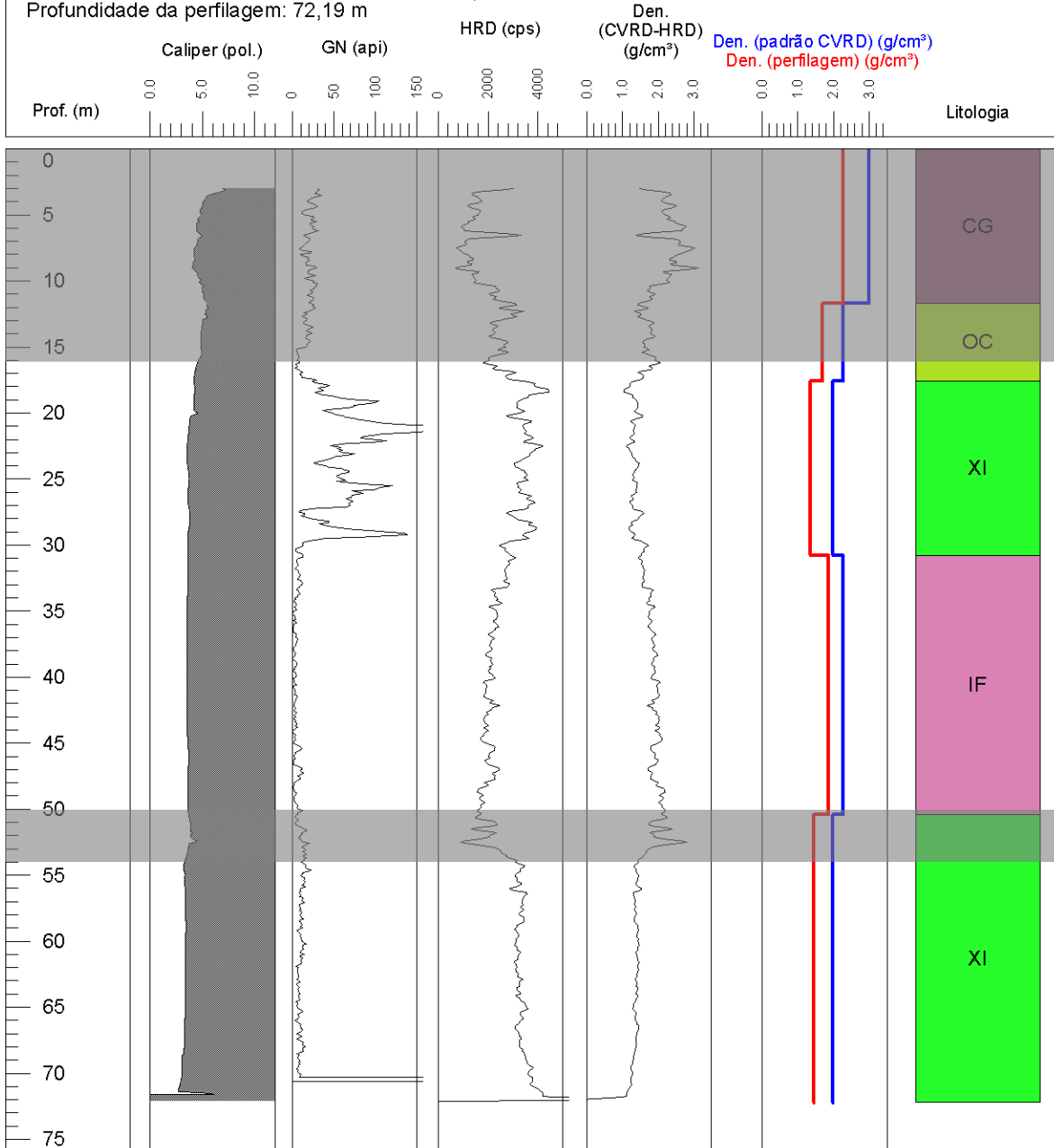


Companhia  
Vale do Rio Doce

Término do furo: 18/04/07  
Data da perfilagem: 19/04/07  
Profundidade total: 76,70 m  
Profundidade da perfilagem: 72,19 m

Coordenadas  
Norte: 7798432,129  
Leste: 659101,501  
Cota: 1166,222

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais

Furo Id: FDDI-0264

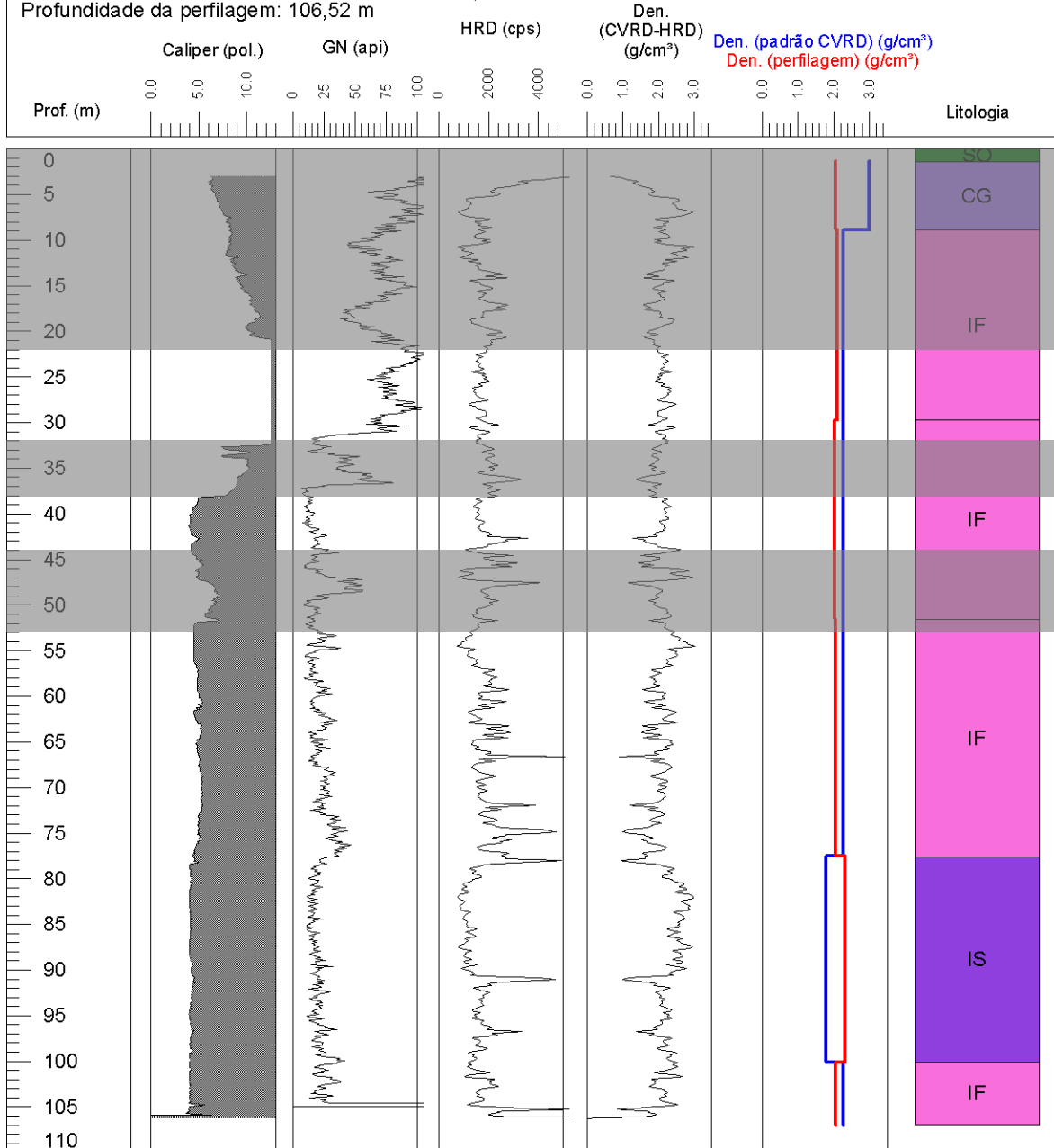


Companhia  
Vale do Rio Doce

Término do furo: 21/05/07  
Data da perfilagem: 26/04/07  
Profundidade total: 185,379 m  
Profundidade da perfilagem: 106,52 m

Coordenadas  
Norte: 7799278,964  
Leste: 660599,945  
Cota: 1055,379

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



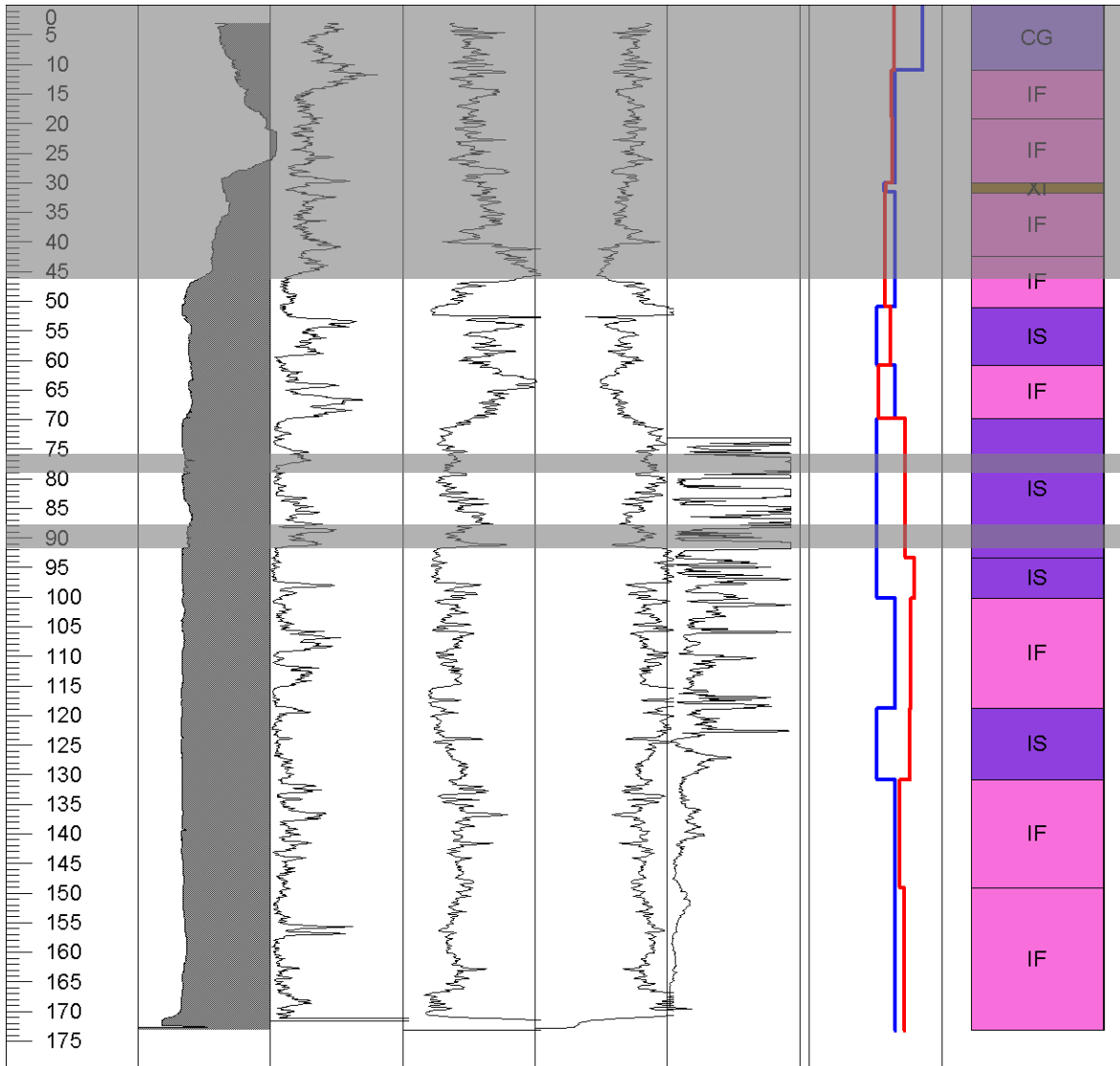
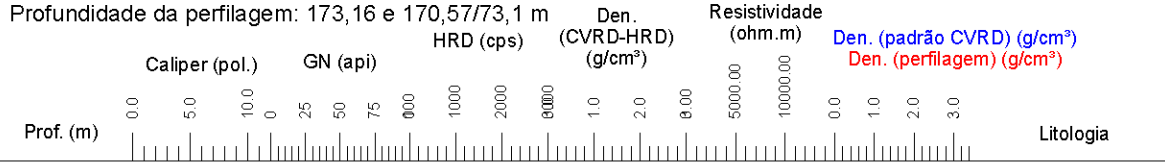
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0265

Término do furo: 03/04/07  
Data da perfilagem: 31/03 e 10/04/07  
Profundidade total: 228,40 m  
Profundidade da perfilagem: 173,16 e 170,57/73,1 m

Coordenadas  
Norte: 7799091,432  
Leste: 660600,061  
Cota: 1041,751

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



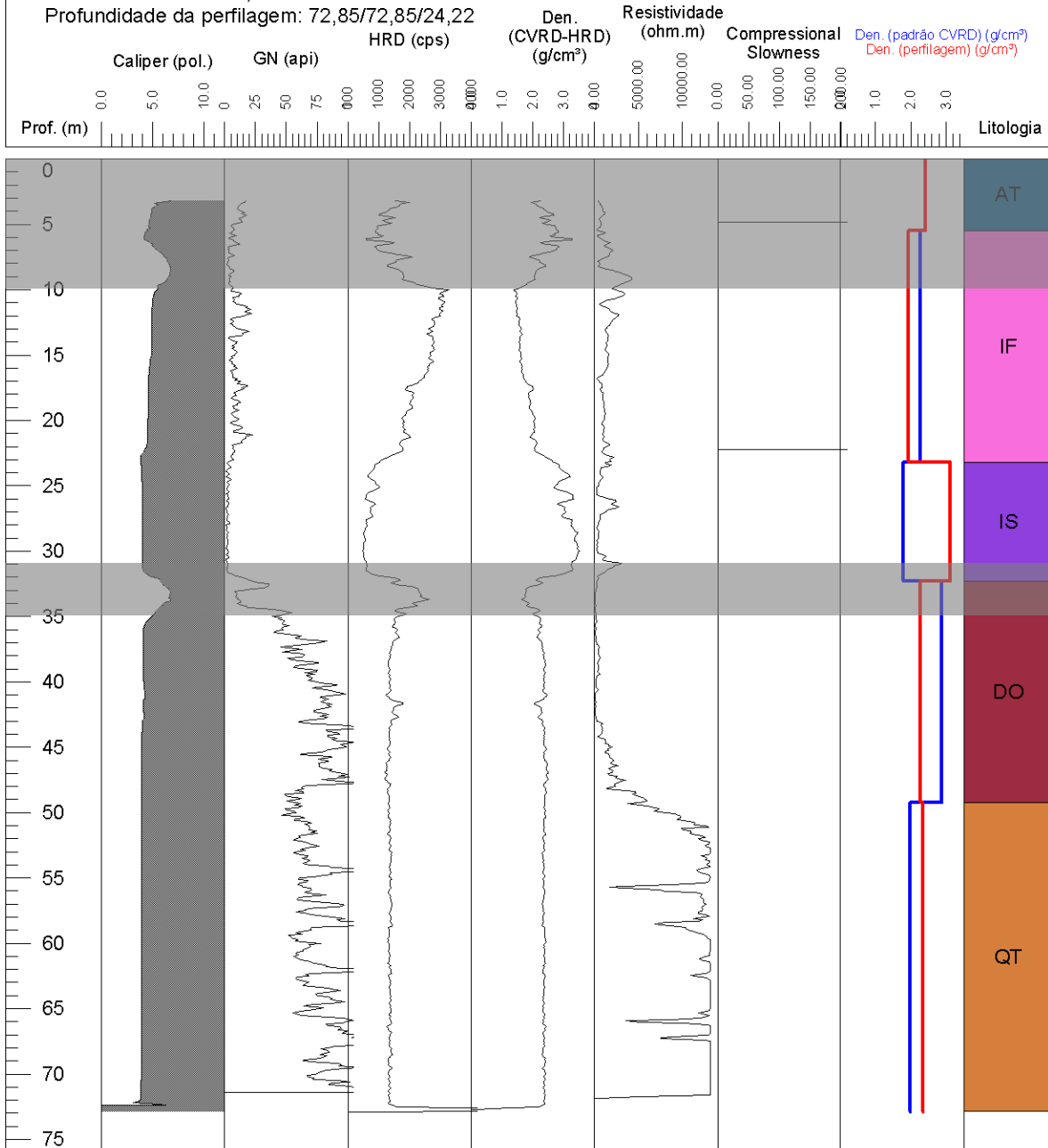
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0267

Término do furo: 09/04/07  
Data da perfilagem: 12/04/07  
Profundidade total: 72,85  
Profundidade da perfilagem: 72,85/72,85/24,22

Coordenadas  
Norte: 7798319,620  
Leste: 660602,800  
Cota: 841,468

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais

Furo Id: FDDI-0269

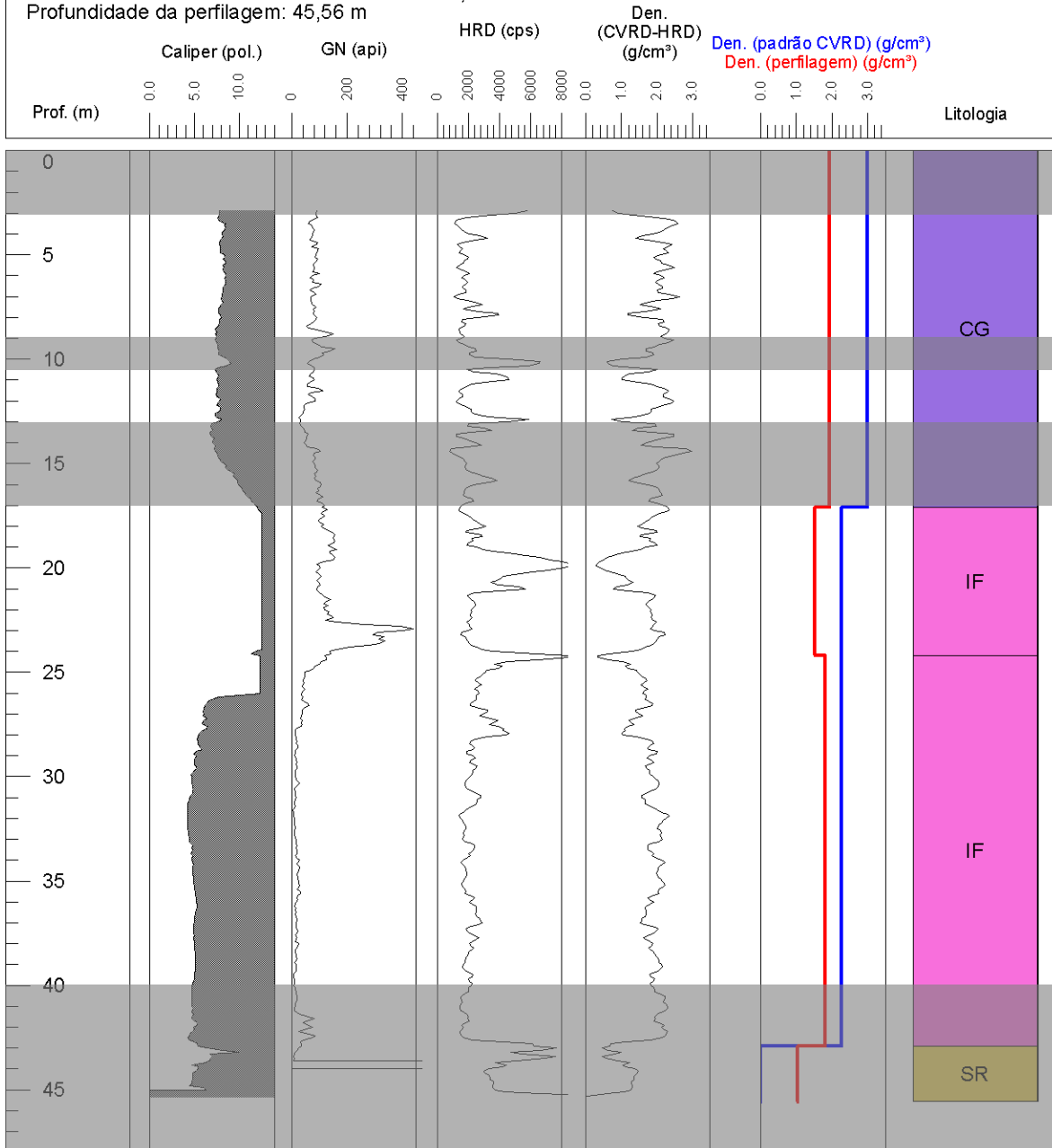


Companhia  
Vale do Rio Doce

Término do furo: 27/03/07  
Data da perfilagem: 03/04/07  
Profundidade total: 149,30 m  
Profundidade da perfilagem: 45,56 m

Coordenadas  
Norte: 7798677,126  
Leste: 660800,153  
Cota: 954,202

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)





# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



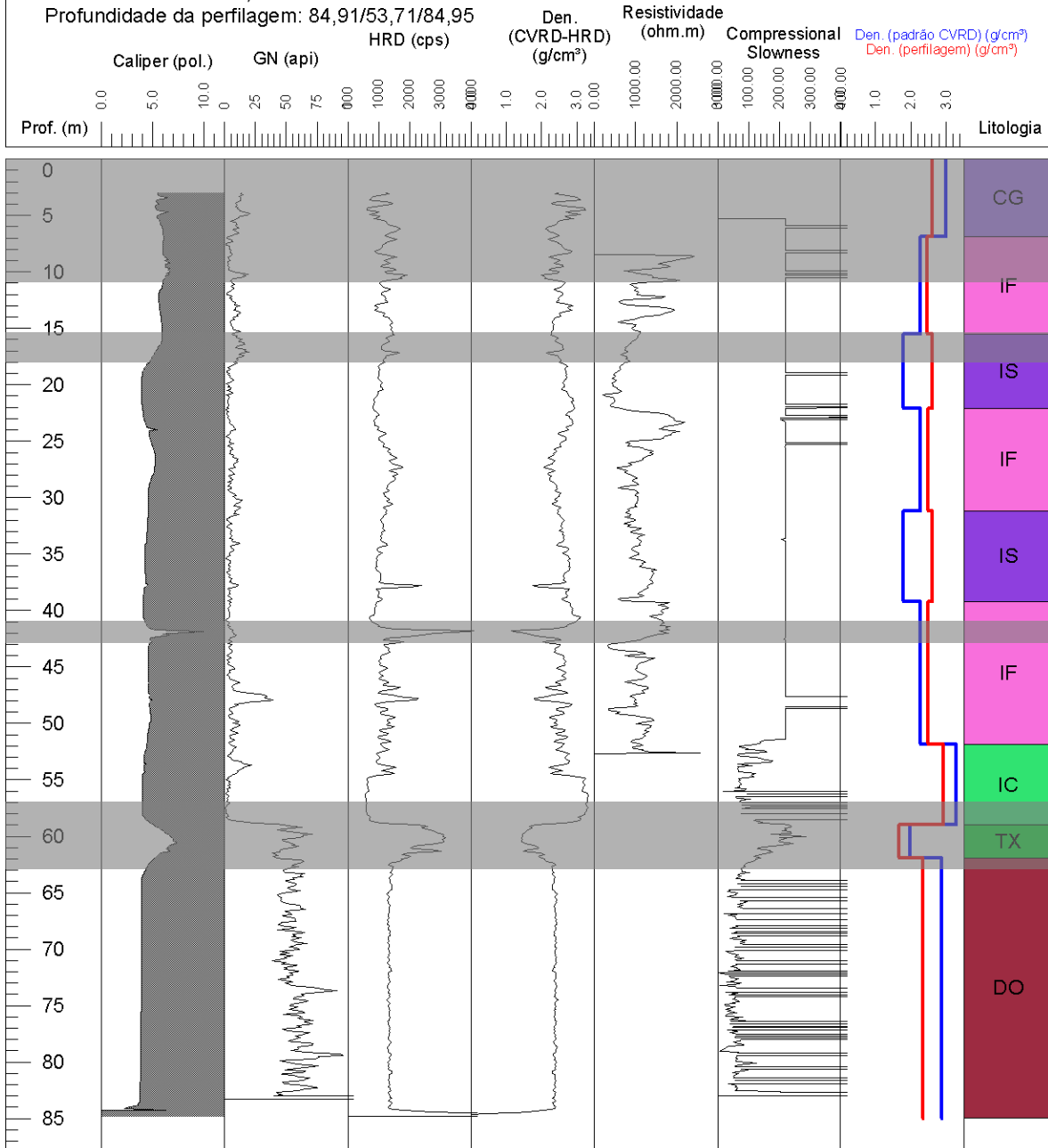
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0270

Término do furo: 10/04/07  
Data da perfilagem: 11/04/07  
Profundidade total: 85,30  
Profundidade da perfilagem: 84,91/53,71/84,95

Coordenadas  
Norte: 7798331,672  
Leste: 660782,456  
Cota: 827,724

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



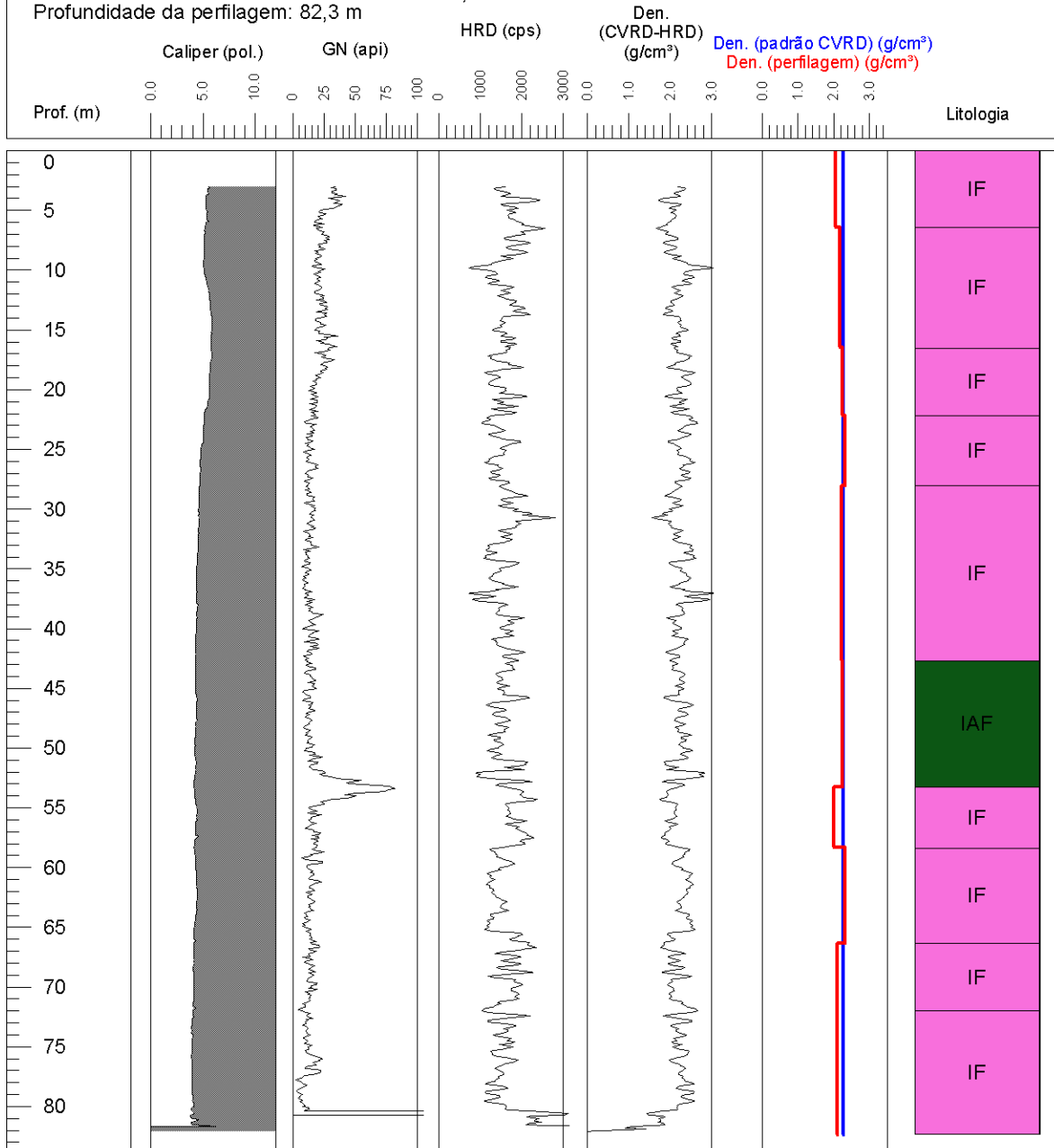
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0271

Término do furo: 23/03/07  
Data da perfilagem: 31/03/07  
Profundidade total: 156,70 m  
Profundidade da perfilagem: 82,3 m

Coordenadas  
Norte: 7798775,307  
Leste: 661097,813  
Cota: 908,516

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



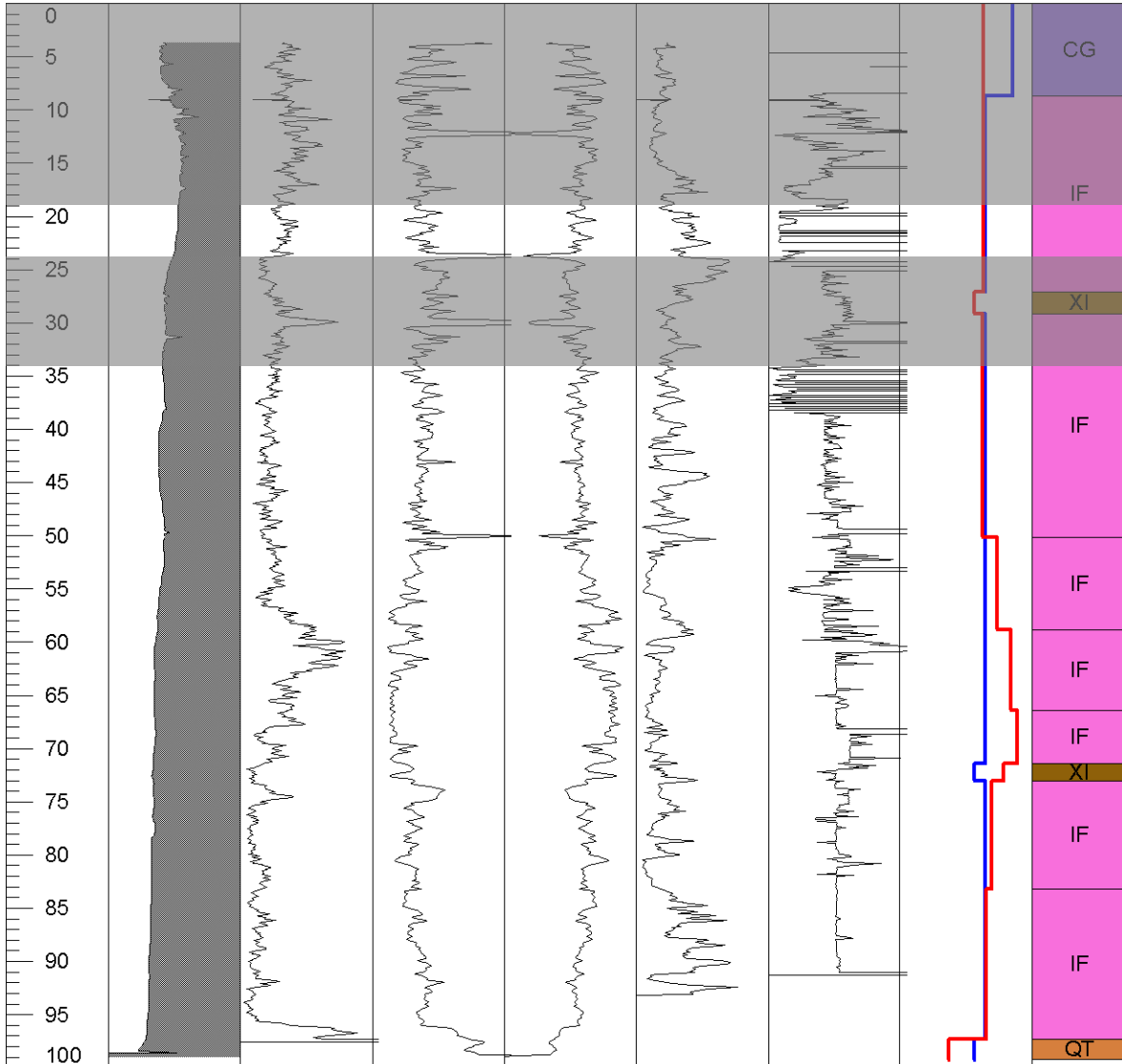
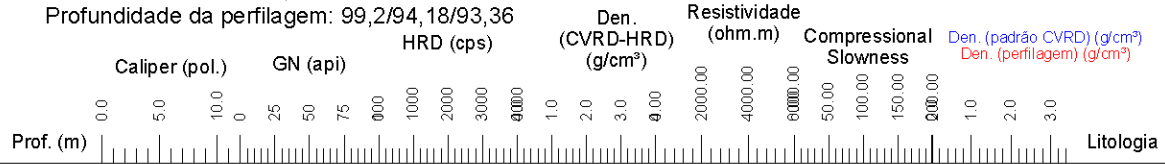
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0273

Término do furo: 28/02/07  
Data da perfilagem: 20/03/07  
Profundidade total: 134,95  
Profundidade da perfilagem: 99,2/94,18/93,36

Coordenadas  
Norte: 7799832,225  
Leste: 661205,815  
Cota: 967,474

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# DOIS IRMÃOS - Minas Gerais



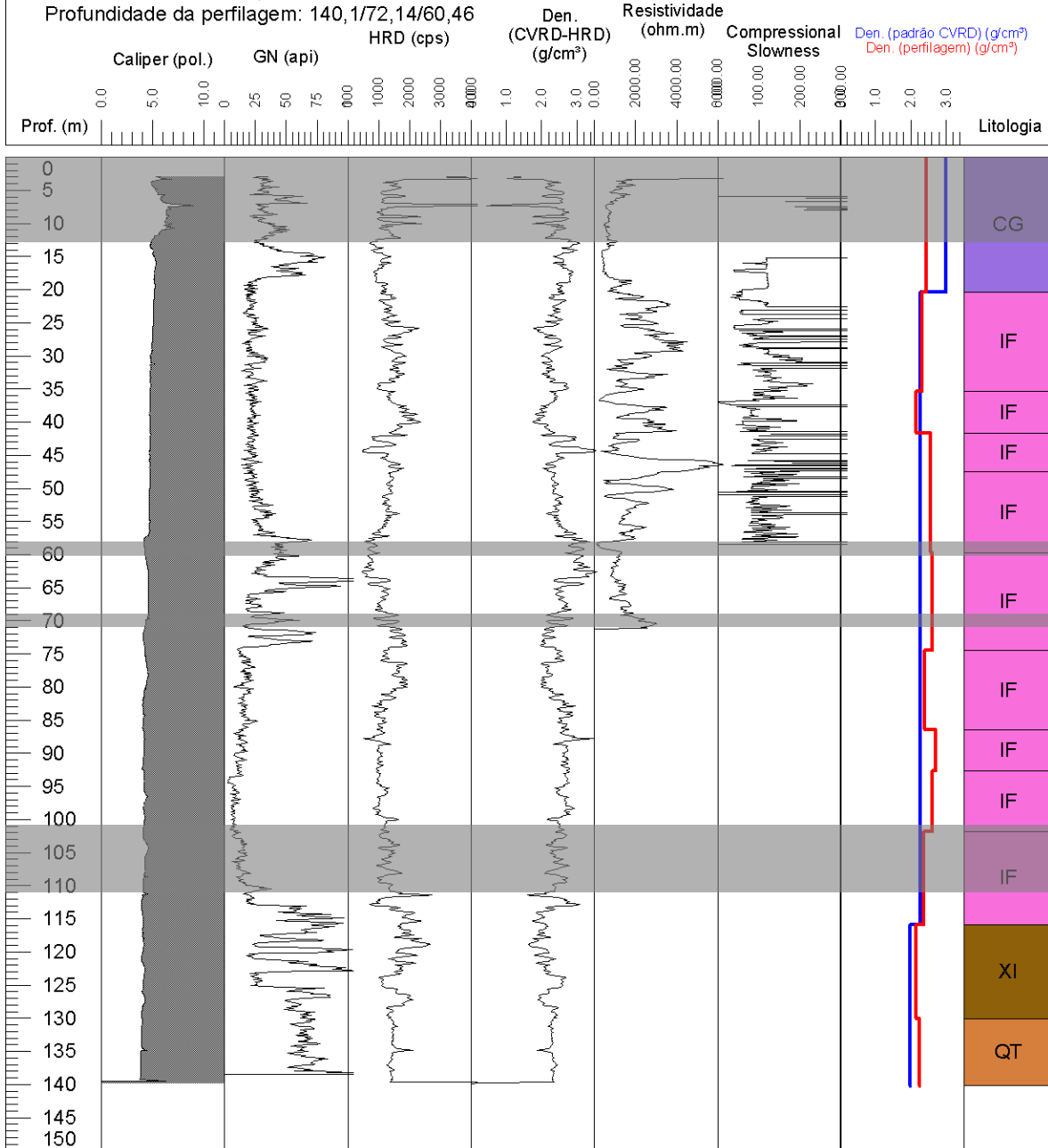
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDDI-0275

Término do furo: 27/02/07  
Data da perfilagem: 18-19/03/07  
Profundidade total: 148,50  
Profundidade da perfilagem: 140,1/72,14/60,46

Coordenadas  
Norte: 7799671,699  
Leste: 661299,896  
Cota: 942,408

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# MAQUINÉ - Minas Gerais



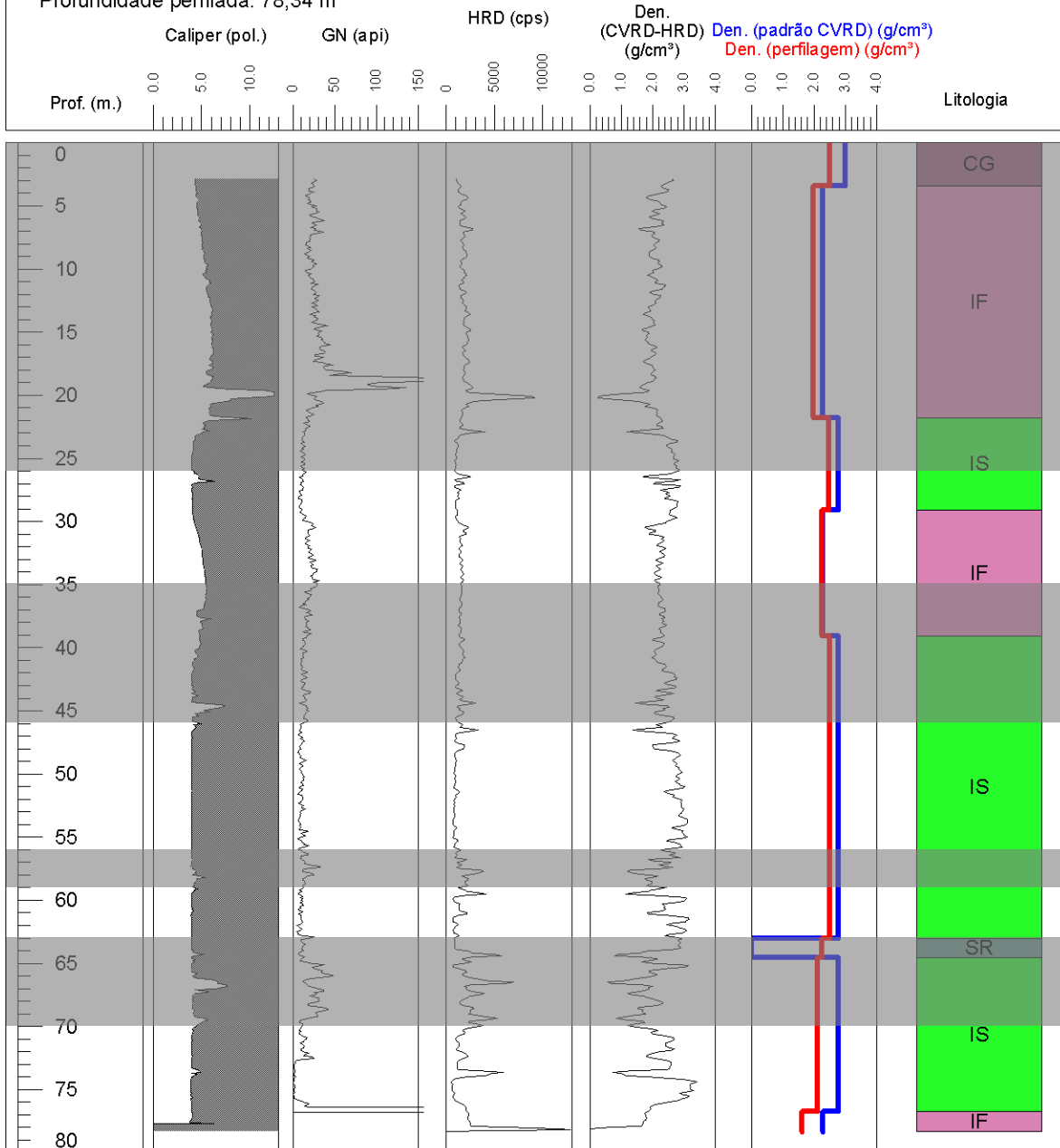
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDMQ-0021

Término do furo: 15/05/07  
Data da perfilagem: 25/04/07  
Profundidade total: 299,75 m  
Profundidade perfilada: 78,34 m

Coordenadas  
Norte: 7783892,549  
Leste: 637599,55  
Cota: 1584,415

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# MAQUINÉ - Minas Gerais



Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDMQ-0031

Coordenadas

Término do furo: 09/01/07

Norte: 7784624,31

Data da perfilagem: 23/03/07

Leste: 638456,14

Profundidade total: 251,20 m

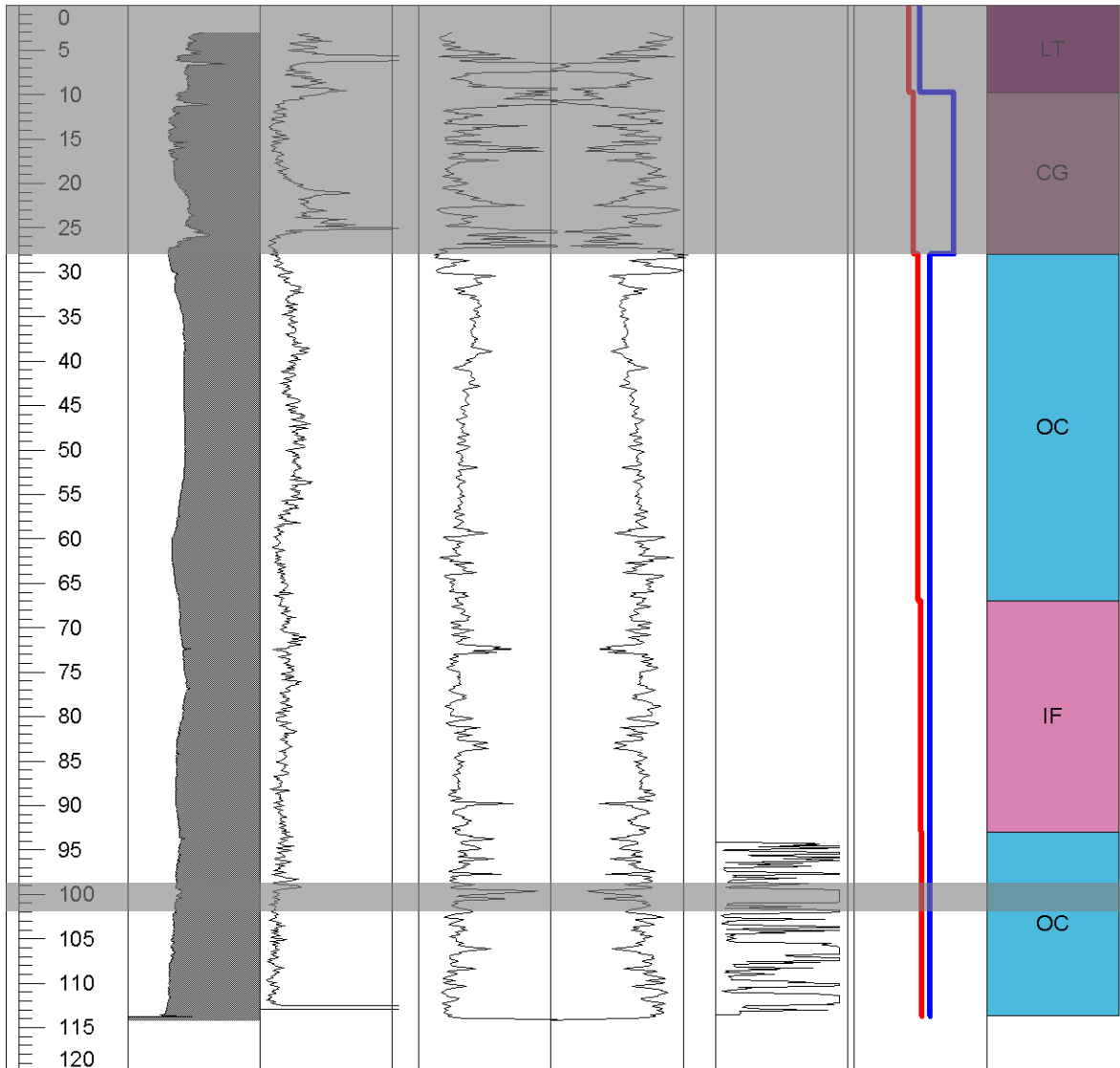
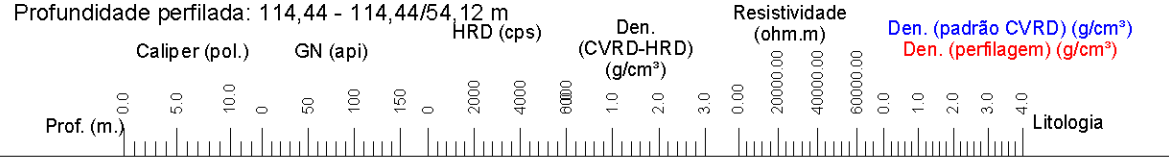
Cota: 1507

Equipamento Utilizado

Robertson Geologging

Sonda densidade

(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# MAQUINÉ - Minas Gerais



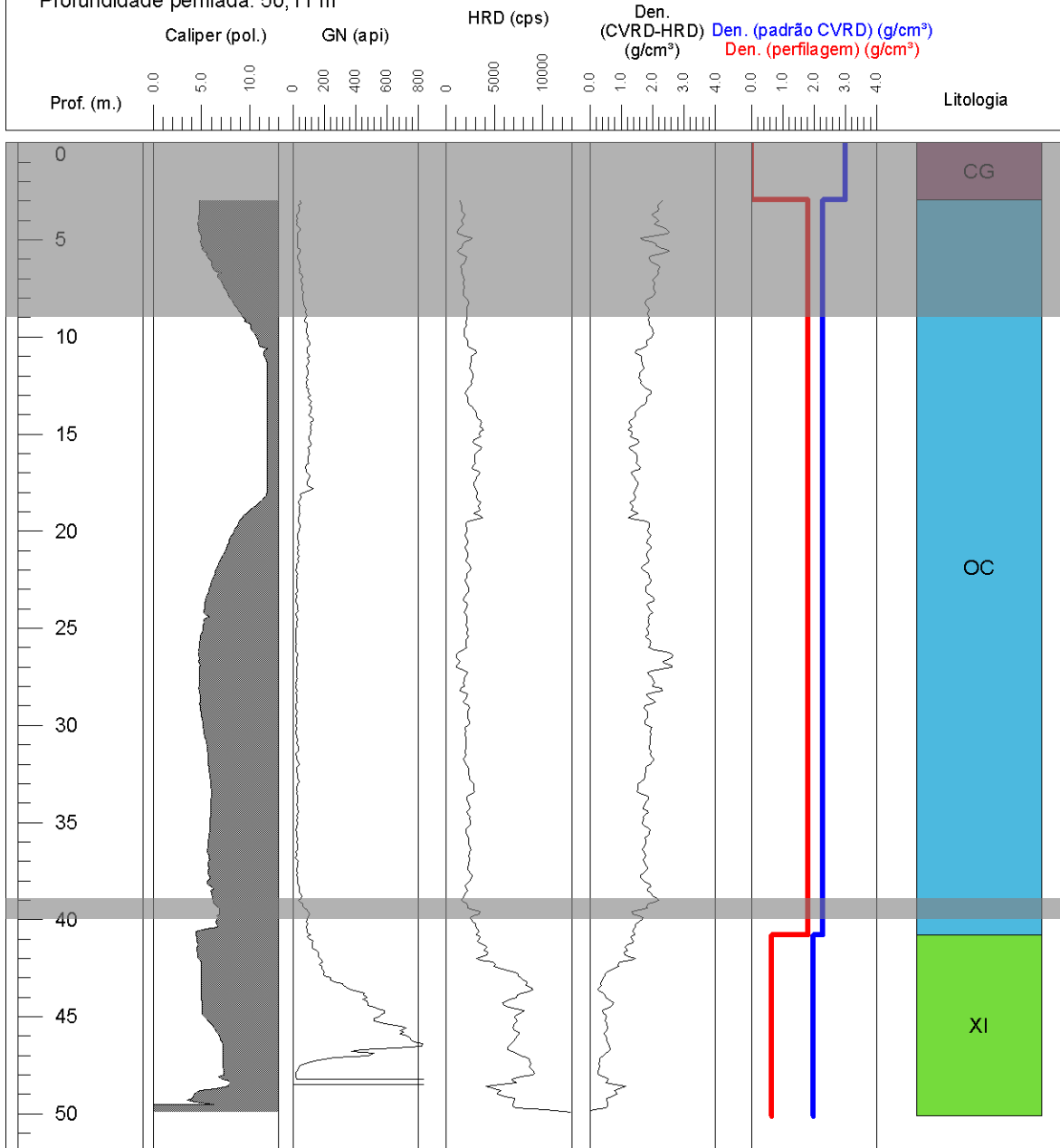
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDMQ-0130

Término do furo: 20/03/07  
Data da perfilagem: 23/03/07  
Profundidade total: 133,55 m  
Profundidade perfilada: 50,11 m

Coordenadas  
Norte: 7783259,614  
Leste: 637292,333  
Cota: 1586,073

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# MAQUINÉ - Minas Gerais



Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDMQ-0131

Coordenadas

Término do furo: 04/04/07

Norte: 7784624,31

Data da perfilagem: 04-05/04/07

Leste: 638456,14

Profundidade total: 171,75 m

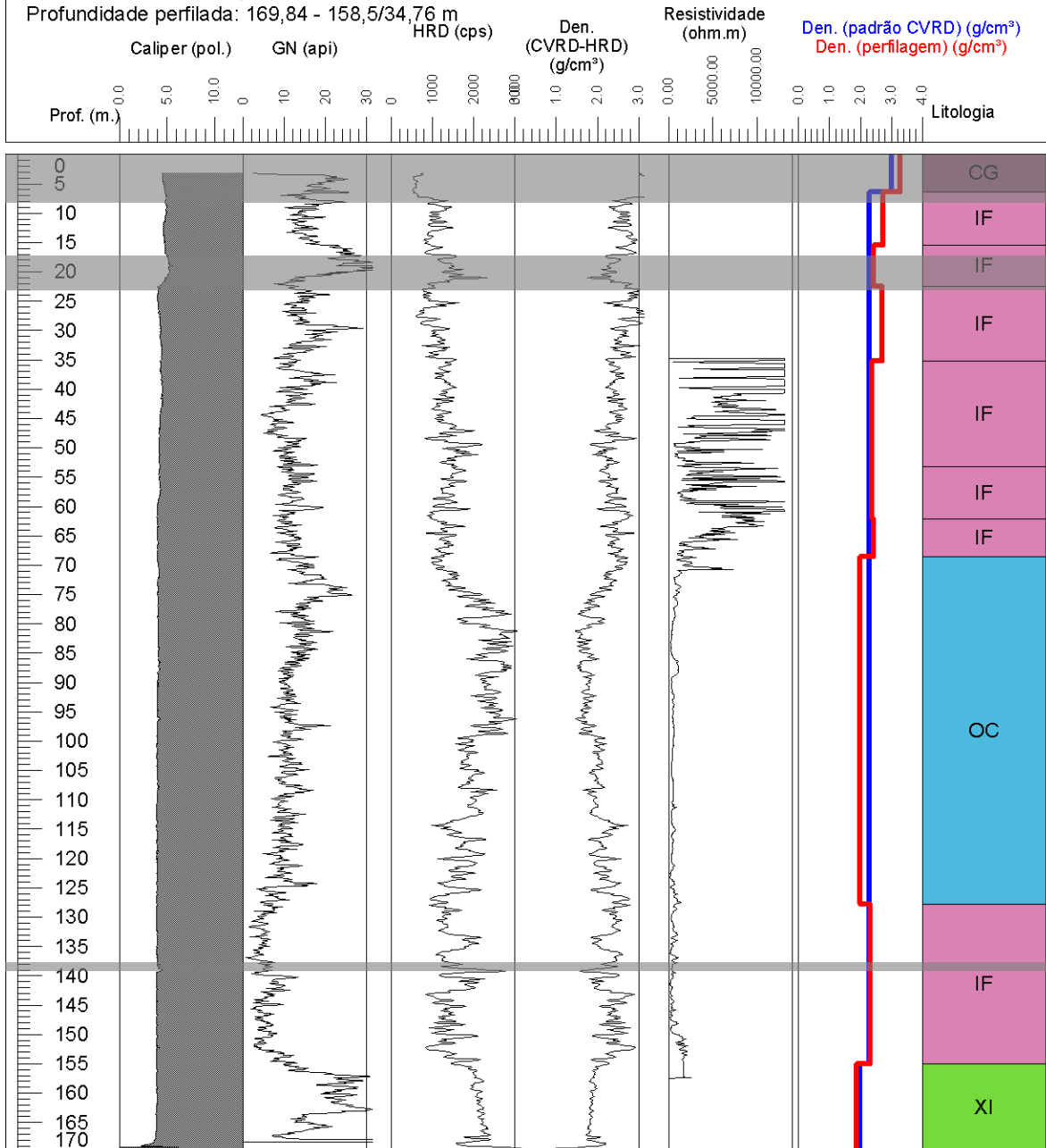
Cota: 1507

Equipamento Utilizado

Robertson Geologging

Sonda densidade

(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)





# MAQUINÉ - Minas Gerais



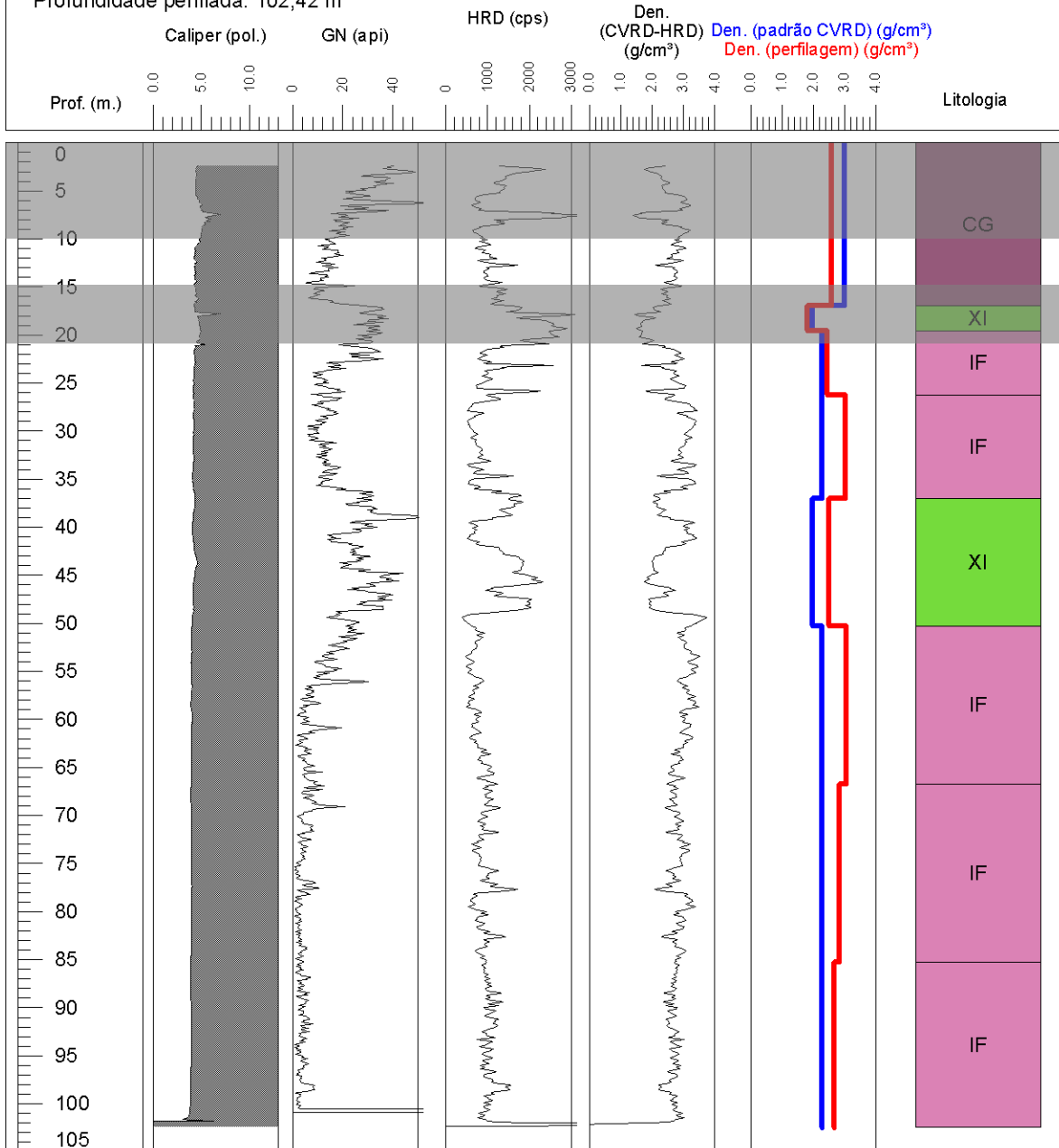
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDMQ-0132

Término do furo: 28/04/07  
Data da perfilagem: 25/04/07  
Profundidade total: 155,25 m  
Profundidade perfilada: 102,42 m

Coordenadas  
Norte: 7783044,909  
Leste: 637633,605  
Cota: 1567,572

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# MAQUINÉ - Minas Gerais



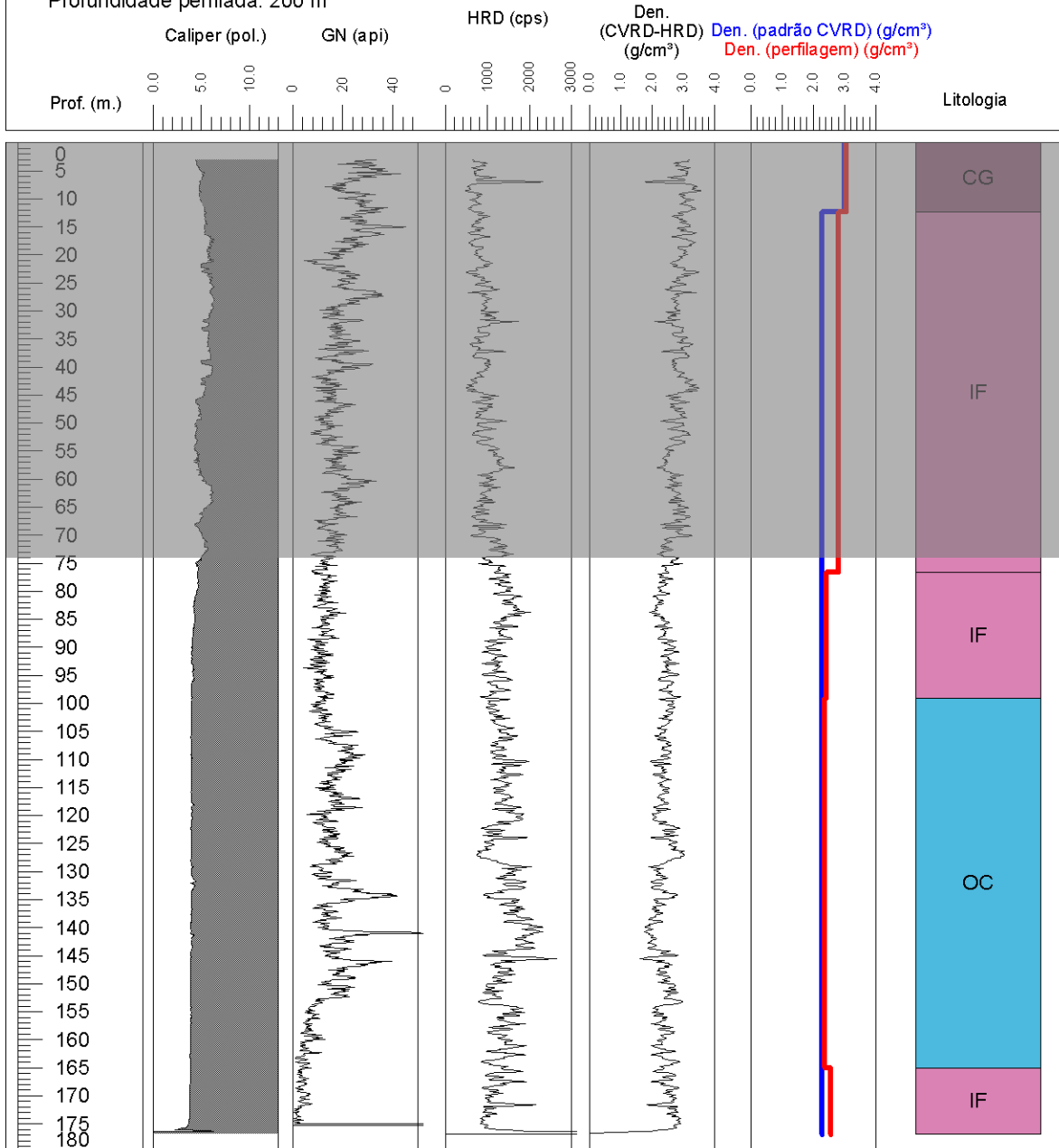
Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDMQ-0135

Término do furo: 18/04/07  
Data da perfilagem: 13/04/07  
Profundidade total: 176,86 m  
Profundidade perfilada: 200 m

Coordenadas  
Norte: 7783269,161  
Leste: 637652,872  
Cota: 1546,048

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# MAQUINÉ - Minas Gerais



Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDMQ0136

Término do furo: 25/04/07

Data da perfilagem: 23/04/07

Profundidade total: 171,65 m

Profundidade de perfilagem: 129 m

Coordenadas

Norte: 7783160,491

Leste: 637822,495

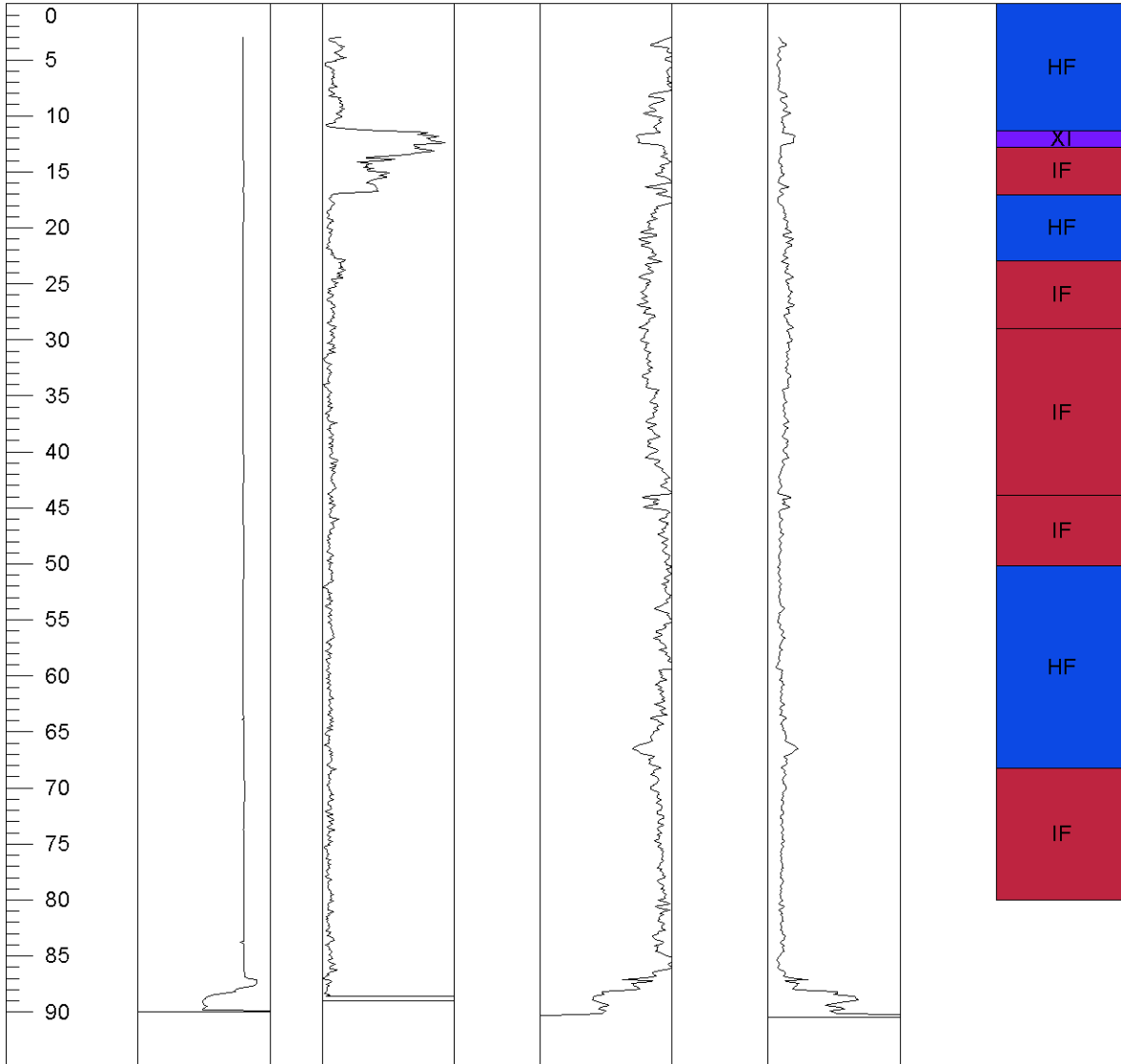
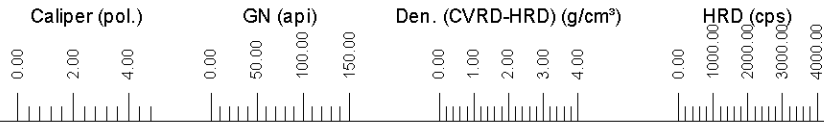
Cota: 1546,018

Equipamento Utilizado

Robertson Geologging

Sonda densidade

(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# MAQUINÉ - Minas Gerais



Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDMQ-0141

Coordenadas

Término do furo: 30/03/07

Norte: 7783687,116

Data da perfilagem: 22/03-04/04/07

Leste: 637562,709

Profundidade total: 320 m

Cota: 1587,809

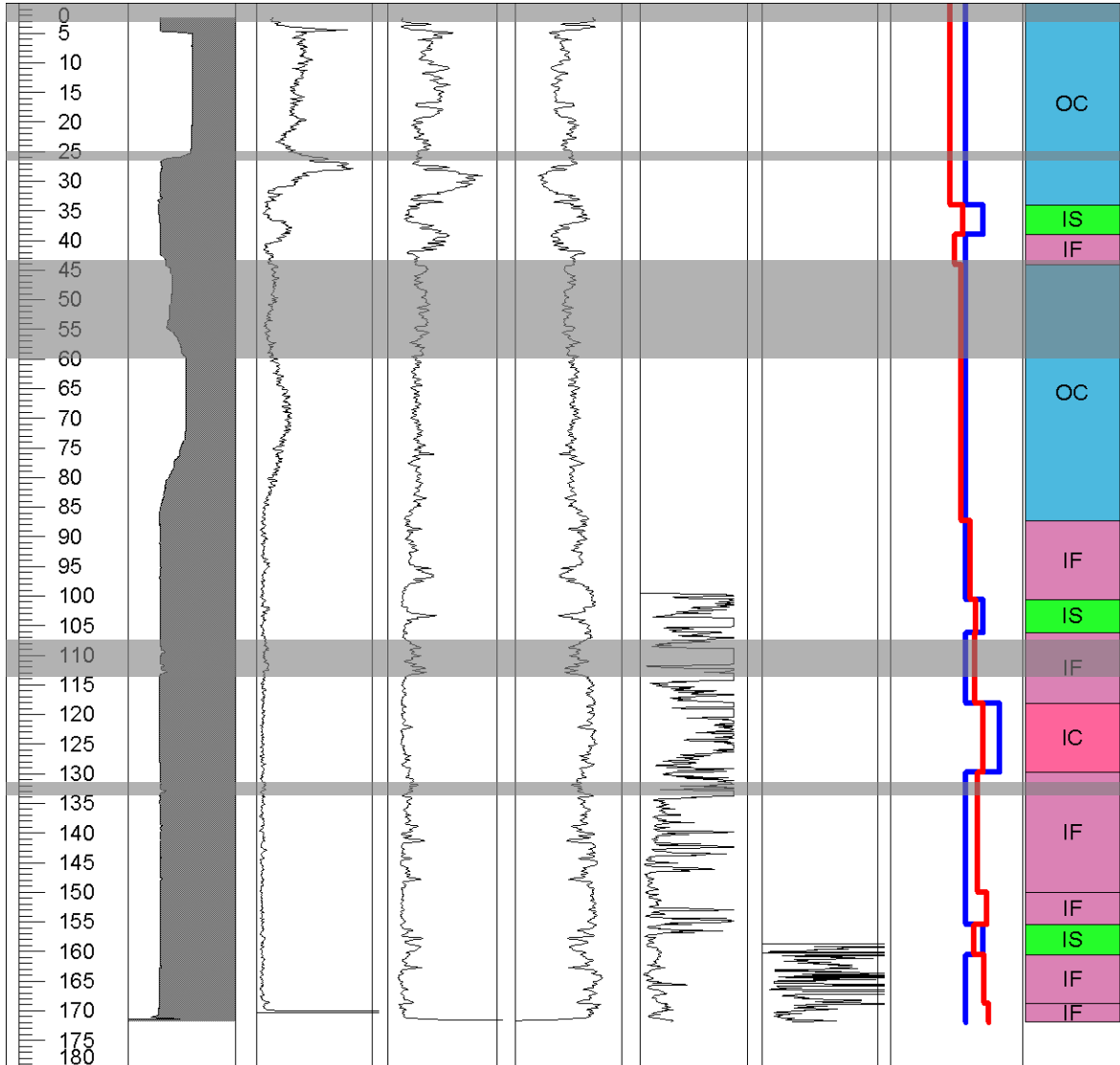
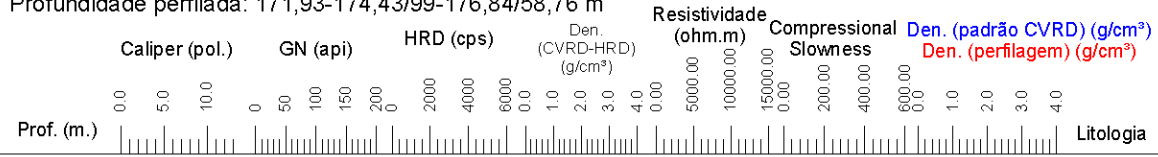
Profundidade perfilada: 171,93-174,43/99-176,84/58,76 m

Equipamento Utilizado

Robertson Geologging

Sonda densidade

(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)



# MAQUINÉ - Minas Gerais



Companhia  
Vale do Rio Doce

Furo Id: FDMQ-0144

Término do furo: 19/04/07  
Data da perfilagem: 29/03/07  
Profundidade total: 350,50 m  
Profundidade perfilada: 172,14 m

Coordenadas  
Norte: 7783729,433  
Leste: 637672,793  
Cota: 1587,977

Equipamento Utilizado  
Robertson Geologging  
Sonda densidade  
(SWDL - fonte Cs 137 100mCi)

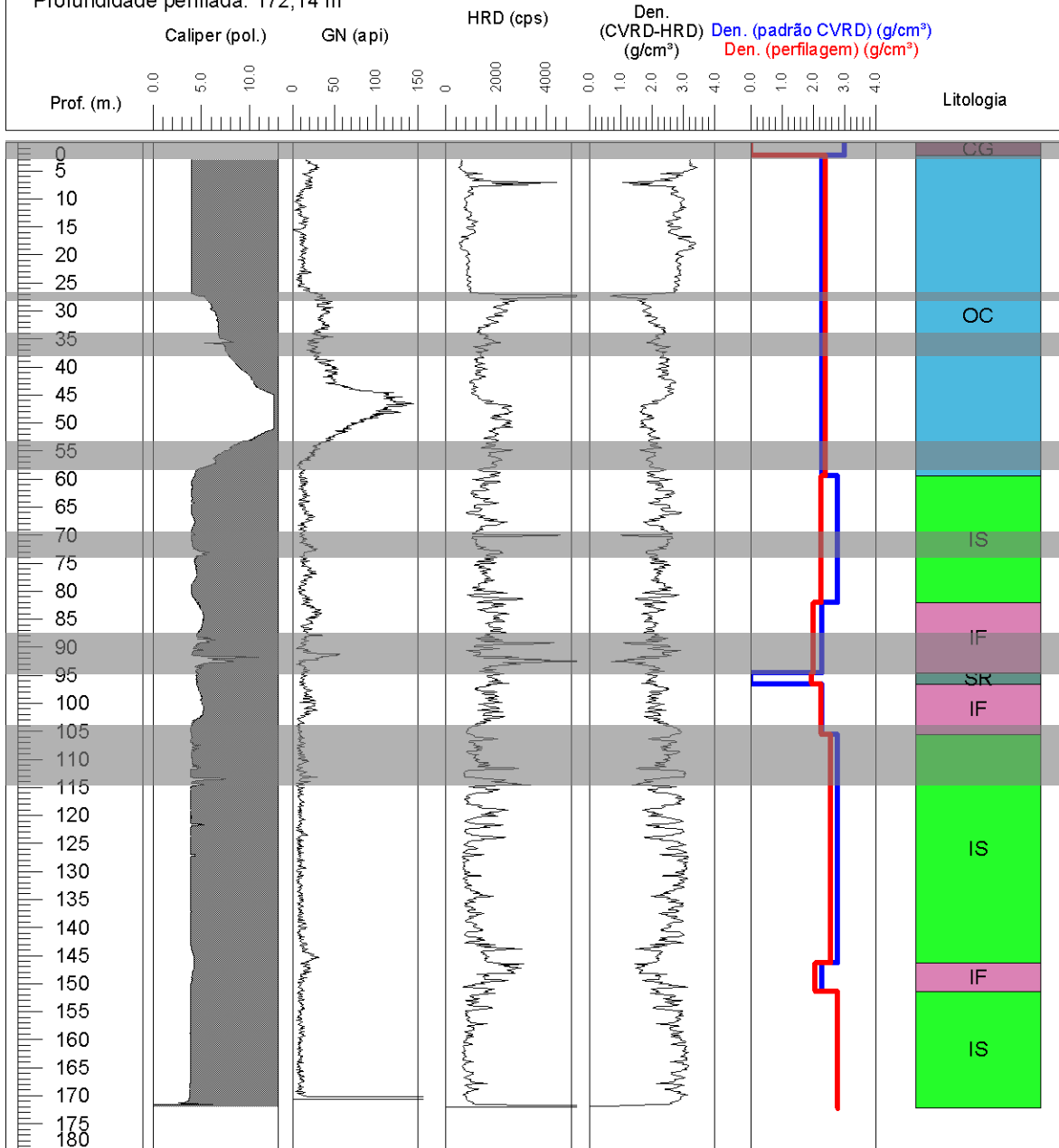


Tabela A.1: Conjunto completo de dados contendo resultados de análise de laboratório obtidos a partir de amostras de testemunhos de sondagem no Alvo Dois Irmãos.

Furo	Intervalo (m)		CLV	Densidade Natural (g/cm <sup>3</sup> )	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	FeO	PF
	De	Até												
FDDI0201	15	15,1	IF	2,47	64,60	1,37	0,125	0,73	0,027	0,140	0,003	0,042	0,84	4,77
FDDI0202	26,55	26,75	IF	1,54	57,46	5,12	0,13	0,64	0,10	0,03	0,21	0,20	0,40	10,96
FDDI0202	29,60	29,80	IF	1,33	56,10	5,47	0,18	1,33	0,32	0,04	0,11	0,34	0,13	11,20
FDDI0202	37,80	38,00	IF	1,94	55,29	13,79	0,07	0,35	0,08	0,03	0,10	0,20	3,57	6,43
FDDI0202	49,80	50,00	IF	2,70	43,57	36,35	0,03	0,43	0,14	0,02	0,02	0,57	11,62	0,64
FDDI0202	59,70	59,87	IS	2,80	35,41	47,79	0,03	0,26	0,03	0,01	0,19	0,61	3,35	1,23
FDDI0202	65,97	66,17	IS	2,08	47,90	25,83	0,03	0,87	0,13	0,03	0,02	3,25	12,68	1,83
FDDI0202	71,25	71,45	IS	2,23	47,86	27,93	0,04	0,98	0,24	0,05	0,01	1,17	9,79	1,54
FDDI0202	80,05	80,25	IS	2,32	39,57	38,30	0,04	1,23	0,24	0,10	0,04	1,69	8,64	2,62
FDDI0202	81,55	81,55	IS	2,21	43,90	32,20	0,06	0,27	0,07	0,02	0,04	0,13	4,46	4,86
FDDI0202	83,20	83,40	IS	2,33	46,32	26,54	0,05	0,66	0,17	0,06	0,09	0,12	1,81	6,61
FDDI0202	96,90	97,10	IF	2,33	45,90	27,32	0,05	0,68	0,17	0,06	0,13	0,16	1,91	6,61
FDDI0209	19,8	20	IF	1,84	59,72	3,08	0,18	0,61	0,06	0,01	0,06	0,08	0,51	11,11
FDDI0209	101,5	101,6	IS	2,61	34,27	46,58	0,06	0,22	0,28	0,00	1,35	0,78	5,76	2,87
FDDI0209	106,6	106,8	IS	2,94	37,62	40,88	0,05	0,23	0,26	0,00	1,62	0,94	6,89	3,70
FDDI0209	107,7	107,9	IC	2,97	27,65	39,45	0,03	0,63	0,60	0,05	2,44	5,66	12,05	13,35
FDDI0209	114,7	114,85	IC	2,91	21,36	37,80	0,04	0,66	0,23	0,06	9,14	6,48	8,38	16,83
FDDI0209	120	120,2	DO	3,05	27,38	28,03	0,06	0,82	0,24	0,11	8,33	7,24	12,25	18,05
FDDI0209	131,25	131,4	DO	2,80	14,72	39,52	0,03	0,24	0,18	0,00	12,96	6,72	5,84	20,52
FDDI0209	136,45	136,6	DO	2,69	9,35	25,28	0,02	0,65	0,29	0,04	18,75	11,65	5,65	31,32
FDDI0209	147,45	147,65	DO	2,93	21,51	32,06	0,05	0,34	0,19	0,02	11,90	6,54	10,41	19,80
FDDI0209	154,45	154,65	DO	2,74	10,96	24,47	0,02	1,39	0,22	0,06	18,48	10,71	5,78	30,24
FDDI0209	162,35	162,55	DO	2,74	9,52	18,61	0,02	0,61	0,30	0,04	21,44	11,70	6,01	35,01
FDDI0209	172,25	172,45	DO	2,73										
FDDI0218	13,2	13,4	XI	1,60										
FDDI0224	11,60	11,80	ICT	1,70	10,15	72,87	0,04	3,94	2,76	0,33	0,01	0,49	1,62	4,32
FDDI0224	38,25	38,45	IF	2,18	32,10	44,15	0,08	4,35	0,26	0,61	0,00	0,14	0,21	4,57
FDDI0224	55,80	56,00	IF	1,99	11,73	62,96	0,07	9,78	1,04	3,31	0,01	0,76	0,63	4,85
FDDI0224	98,60	98,75	IF	2,97	41,13	39,36	0,03	0,21	0,01	0,00	0,00	0,04	0,88	1,20
FDDI0224	117,05	117,25	IF	2,74	38,52	41,68	0,07	0,21	0,01	0,00	0,00	0,04	1,60	2,43
FDDI0224	162,80	163,00	XI	1,78	12,97	48,13	0,15	17,99	0,04	6,42	0,02	0,33	0,80	7,72
FDDI0224	167,50	167,65	IS	2,85	35,01	43,50	0,03	0,26	0,01	0,00	0,22	0,16	1,72	6,75
FDDI0248	62,05	62,17	IF	2,88	35,48	46,93	0,23	0,04	0,02	0,01	0,01	0,09	0,33	2,74
FDDI0248	72,1	72,3	XI	1,95										

FDDI0264	82,15	82,30	ISC	2,48	42,73	30,69	0,10	0,41	0,19	0,04	0,03	0,10	0,07	7,92
FDDI0264	88,10	88,25	ISC	2,26	28,83	53,03	0,04	0,18	0,26	0,02	0,01	0,07	0,07	5,23
FDDI0265	30,35	30,55	XI	2,40										
FDDI0265	53,6	53,8	IS	2,33										
FDDI0265	72	72,1	IS	2,83										
FDDI0265	79,2	79,3	IS	2,48										
FDDI0265	81,3	81,38	IS	2,67										
FDDI0265	94,7	94,85	IS	2,87										
FDDI0265	102,85	102,95	IF	2,68										
FDDI0265	107,1	107,25	IF	2,90										
FDDI0265	113,55	113,65	IF	2,79										
FDDI0265	119,58	119,7	IS	3,11										
FDDI0265	126,45	126,55	IS	2,91										
FDDI0265	132,5	132,6	IF	2,36										
FDDI0265	136,25	136,35	IF	2,64										
FDDI0265	146,4	146,52	IF	1,97										
FDDI0265	152,9	153,1	IF	2,68										
FDDI0265	158,63	158,73	IF	2,53										
FDDI0267	31,3	31,4	IS	2,96										
FDDI0267	36,7	36,83	DO	2,40										
FDDI0267	49,2	49,38	DO	2,47										
FDDI0267	58,66	58,8	QT	2,39										
FDDI0267	64,1	64,25	QT	2,41										
FDDI0270	20,95	21,05	IS	2,76										
FDDI0270	38,54	38,67	IS	2,76										
FDDI0270	48,28	48,38	IF	2,58										
FDDI0270	55,65	55,78	IC	2,87										
FDDI0270	65,9	66,06	DO	2,47										
FDDI0270	71,86	71,98	DO	2,42										
FDDI0270	82,8	82,95	DO	2,44										
FDDI0271	26,90	27,10	IF	2,53	42,49	34,19	0,01	0,19	0,00	0,00	0,00	0,03	1,30	5,94
FDDI0271	31,65	31,85	IF	2,42	45,67	30,28	0,03	0,25	0,12	0,00	0,00	0,03	0,46	4,93
FDDI0271	33,85	33,95	IF	2,50	41,14	31,55	0,11	2,52	0,40	0,14	0,01	0,22	0,95	5,42
FDDI0271	37,10	37,30	IF	2,27	45,30	31,52	0,03	0,37	0,05	0,00	0,00	0,03	2,30	4,38
FDDI0271	42,05	42,15	IF	2,39	43,06	30,53	0,09	0,54	0,17	0,02	0,00	0,04	0,79	7,20
FDDI0271	48,20	48,40	IAF	2,36	39,05	37,07	0,11	0,27	0,14	0,00	0,00	0,04	1,90	7,29
FDDI0271	53,70	53,90	IF	2,82	47,91	18,82	0,07	3,17	0,08	0,25	0,00	0,18	3,03	9,57
FDDI0271	54,75	54,95	IF	2,28	36,46	40,07	0,01	0,13	0,01	0,00	0,00	0,03	1,30	8,53
FDDI0271	57,80	58,00	IF	2,25	28,21	47,86	0,07	7,31	0,04	0,04	0,00	0,06	4,62	5,51

FDDI0271	65,70	65,90	IF	2,78	37,77	43,67	0,04	0,37	0,01	0,00	0,00	0,06	2,11	2,63
FDDI0273	3,85	4,00	CG	2,97	50,89	0,89	0,05	15,08	0,06	0,35	0,06	0,10	1,67	10,35
FDDI0273	61,45	61,60	IF	3,04	64,07	2,32	0,09	1,46	0,07	0,09	0,01	0,06	1,31	5,15
FDDI0275	13,90	14,08	CG	2,99	62,19	4,28	0,06	1,41	0,09	0,08	0,10	0,10	2,27	5,85
FDDI0275	38,80	38,90	IF	3,47	62,01	3,64	0,04	0,17	0,79	0,02	0,29	0,18	0,10	6,37
FDDI0275	43,95	44,15	IF	2,21	48,97	28,26	0,02	0,34	0,02	0,01	0,01	0,06	1,99	1,90
FDDI0275	55,60	55,80	IF	2,08	63,86	2,93	0,04	0,62	0,37	0,05	0,02	0,03	0,13	4,87
FDDI0275	61,60	61,80	IF	2,26	58,00	9,03	0,12	2,06	0,05	0,53	0,01	0,06	0,82	5,45
FDDI0275	62,35	62,55	IF	2,31	61,04	8,80	0,05	0,31	0,17	0,02	0,01	0,03	2,01	3,83
FDDI0275	67,40	67,60	IF	2,10	51,06	19,46	0,12	0,29	0,05	0,02	0,04	0,04	0,24	7,60
FDDI0275	69,50	69,70	IF	1,86	13,32	46,97	0,07	21,56	0,02	3,36	0,01	0,72	0,10	7,76
FDDI0275	79,60	79,80	IF	2,15	56,25	9,84	0,09	0,40	0,05	0,00	0,01	0,05	0,13	9,66
FDDI0275	87,65	87,85	IF	2,77	59,87	11,10	0,08	0,34	0,02	0,03	0,01	0,03	0,76	3,05
FDDI0275	109,10	109,30	IF	2,01	55,87	12,57	0,07	0,33	0,04	0,02	0,01	0,04	0,10	7,66
FDDI0275	110,45	110,60	IF	2,79	55,13	10,48	0,12	0,46	1,24	0,00	0,02	0,09	0,31	8,49
FDDI0275	112,30	112,50	IF	3,05	41,02	37,14	0,03	0,38	1,00	0,00	0,01	0,03	0,11	2,14
FDDI0275	116,30	116,50	XI	2,51	18,99	63,69	0,05	6,38	0,11	0,17	0,01	0,44	0,05	2,08
FDDI0275	119,60	119,80	XI	2,17	2,06	75,33	0,01	14,96	0,00	0,60	0,03	1,01	0,09	4,87
FDDI0275	120,50	120,70	XI	2,56	17,95	69,36	0,06	0,74	0,03	0,01	0,01	0,12	0,31	3,03
FDDI0275	121,60	121,75	XI	2,48	26,07	52,90	0,10	2,37	0,03	0,31	0,48	0,68	0,88	5,32
FDDI0275	124,20	124,40	XI	2,53	15,40	45,15	0,16	11,69	0,13	2,86	4,37	5,44	8,48	6,23
FDDI0275	127,10	127,25	XI	2,36	5,51	76,81	0,01	10,90	0,03	0,11	0,01	0,66	0,22	2,77
FDDI0275	130,25	130,45	QT	2,48	1,21	72,27	0,03	14,58	0,01	0,15	0,07	3,55	0,50	3,27
FDDI0275	133,70	133,90	QT	2,42	3,13	79,33	0,03	13,68	0,01	0,13	0,21	1,05	0,33	1,77
FDDI0275	135,95	136,10	QT	2,36	1,70	80,35	0,02	13,97	0,02	0,11	0,20	0,74	0,20	1,36
FDDI0219	10,30	10,50	IMN	2,21	49,12	15,13	0,101	3,83	3,156	0,647	0,022	0,178	0,21	6,22
FDDI0219	15,10	15,30	IMN	3,87	55,20	9,73	0,074	2,83	1,304	0,126	0,014	0,145	1,20	5,55
FDDI0219	27,65	27,85	XI	1,86	19,84	31,75	0,223	21,87	0,069	4,930	0,019	0,095	0,23	11,72
FDDI0219	38,70	38,90	XI	1,89	9,97	56,64	0,057	23,14	0,069	0,956	0,020	0,277	0,07	5,07
FDDI0219	51,00	51,20	XI	1,87	11,22	56,73	0,033	19,67	0,046	0,652	0,005	0,228	0,13	6,77
FDDI0219	56,30	56,35	XI	1,71	10,44	53,14	0,024	23,67	0,109	0,692	0,027	0,248	0,05	6,87
FDDI0219	60,15	60,35	XI	1,90	21,44	49,02	0,017	13,32	0,012	0,452	0,012	0,001	0,46	6,78
FDDI0219	62,47	62,62	XI	2,06	12,03	53,01	0,014	21,20	0,077	0,552	0,002	0,093	0,05	7,93
FDDI0219	65,40	65,65	XI	1,92	7,22	64,79	0,058	17,41	0,007	0,575	0,007	0,179	0,13	5,89
FDDI0219	68,30	68,39	XI	1,90	27,42	26,22	0,334	16,75	0,113	4,836	0,013	0,009	0,06	11,83
FDDI0219	86,30	86,50	IF	2,55	43,22	36,44	0,048	0,23	0,172	0,012	0,022	0,016	1,62	1,98
FDDI0219	88,75	88,95	IF	2,31	46,48	29,46	0,079	0,79	0,095	0,063	0,008	0,002	7,71	3,13
FDDI0219	96,58	96,73	IAS	3,11	33,33	47,80	0,055	0,11	0,085	0,005	0,101	0,021	0,39	4,61
FDDI0219	97,00	97,20	IAS	2,96	36,51	43,94	0,060	0,17	0,076	0,021	0,025	0,118	2,21	4,38



FDDI0219	100,87	100,99	IC	2,48	41,25	36,66	0,070	0,27	0,152	0,008	0,490	0,221	2,01	3,40
FDDI0219	104,20	104,35	IC	2,86	40,78	40,12	0,044	0,37	0,105	0,023	0,007	0,011	8,18	1,86
FDDI0219	104,65	104,75	IC	2,43	38,30	41,41	0,056	0,33	0,110	0,022	0,464	0,235	6,74	3,40
FDDI0219	110,41	110,54	IAS	2,52	39,77	38,18	0,070	0,43	0,089	0,001	0,006	0,039	0,48	3,58
FDDI0219	113,30	113,50	IAS	2,89	38,14	42,38	0,062	0,17	0,139	0,014	0,008	0,029	0,98	2,93
FDDI0220	5,25	5,40	CG	2,09	44,14	8,75	0,124	14,55	0,219	1,713	0,011	0,084	0,53	10,59
FDDI0220	12,80	12,95	CG	2,16	46,39	6,61	0,086	13,99	0,368	1,431	0,012	0,055	1,06	10,77
FDDI0220	30,70	30,80	IF	2,36	39,84	26,50	0,113	2,66	5,439	0,047	0,017	0,178	0,35	6,71
FDDI0220	45,00	45,20	XI	2,12	24,36	43,11	0,136	13,13	0,022	0,525	0,042	0,589	0,22	6,60
FDDI0220	46,80	46,90	XI	1,97										
FDDI0220	49,91	50,06	XI	1,79	6,35	56,99	0,050	25,81	0,014	2,995	0,014	0,511	0,06	4,44
FDDI0220	55,05	55,25	IF	2,77	44,66	31,57	0,031	1,63	0,016	0,138	0,036	0,003	0,33	2,23
FDDI0220	65,95	66,15	IF	2,77	44,73	29,47	0,054	0,23	0,053	0,010	0,009	0,011	0,20	5,98
FDDI0220	66,90	67,05	IF	2,46	53,52	18,96	0,058	0,29	0,028	0,022	0,014	0,001	0,32	3,26
FDDI0220	72,70	72,80	IF	2,65	42,85	34,46	0,047	0,28	0,015	0,023	0,014	0,005	0,22	3,89
FDDI0220	73,30	73,45	IF	3,10	39,27	42,49	0,045	0,26	0,090	0,002	0,007	0,034	0,97	1,80
FDDI0220	83,10	83,19	IF	2,80	38,26	44,35	0,056	0,25	0,012	0,01	0,016	0,006	1,75	0,83
FDDI0220	86,65	86,72	IF	2,77	35,85	47,28	0,025	0,22	0,013	0,022	0,017	0,006	0,11	1,01
FDDI0220	88,65	88,80	IF	2,97	38,37	42,36	0,025	0,76	0,555	0,012	0,046	0,019	0,46	1,37
FDDI0220	90,80	90,88	IF	3,22	36,83	46,93	0,003	0,02	0,016	0,024	0,013	0,008	0,08	0,33
FDDI0220	92,45	92,60	IF	2,48	35,67	48,44	0,009	0,23	0,097	0,001	0,009	0,053	0,14	0,26
FDDI0220	96,37	96,47	IS	2,86	24,18	65,72	0,009	0,08	0,063	0,017	0,012	0,009	0,31	0,29
FDDI0220	99,05	99,17	IS	3,31	36,15	48,24	0,008	0,1	0,033	0,003	0,014	0,007	0,11	0,33
FDDI0220	102,70	102,85	IS	2,42	34,81	49,92	0,010	0,19	0,021	0,005	0,013	0,029	0,19	0,20
FDDI0220	105,63	105,72	IF	2,96	35,51	49,42	0,007	0,18	0,045	0,015	0,034	0,004	0,16	0,32
FDDI0220	109,27	109,37	IF	2,27	33,79	50,91	0,025	0,86	0,027	0,05	0,017	0,004	4,92	0,68
FDDI0220	113,50	113,65	IF	2,36	36,40	47,64	0,010	0,16	0,036	0,011	0,010	0,029	0,50	0,20
FDDI0220	119,24	119,36	IF	3,12	34,62	50,51	0,007	0,22	0,076	0,03	0,023	0,001	0,07	0,32
FDDI0220	123,70	123,95	IS	2,79	40,90	41,63	0,011	0,18	0,071	0,001	0,050	0,016	0,15	0,32
FDDI0220	123,95	124,25	IS	3,40	40,02	42,30	0,006	0,08	0,023	0,013	0,015	0,055	0,06	0,27
FDDI0220	124,25	124,55	IS	3,14	39,92	42,70	0,005	0,18	0,049	0,044	0,019	0,061	0,15	0,54
FDDI0220	125,95	126,10	IS	2,84	39,60	43,45	0,013	0,25	0,088	0,002	0,015	0,018	0,18	0,44
FDDI0220	126,10	126,40	IS	2,71	40,14	42,48	0,006	0,08	0,076	0,033	0,016	0,061	0,27	0,33
FDDI0220	126,40	126,70	IS	2,82	43,77	36,95	0,008	0,04	0,111	0,019	0,015	0,055	0,25	0,30
FDDI0220	128,52	128,62	IS	2,82	34,65	50,67	0,008	0,11	0,062	0,022	0,016	0,002	0,24	0,36
FDDI0220	130,05	130,18	IS	2,97	38,90	43,96	0,009	0,13	0,07	0,041	0,035	0,002	0,28	0,36
FDDI0220	133,94	134,07	IS	2,67	37,15	46,27	0,011	0,47	0,065	0,023	0,033	0,003	0,04	0,76
FDDI0220	135,35	135,50	IS	2,77	36,23	47,90	0,012	0,26	0,056	0,004	0,012	0,011	0,18	0,41
FDDI0220	135,50	135,80	IS	2,71	40,77	40,17	0,011	0,49	0,060	0,084	0,019	0,103	0,15	0,38
FDDI0220	135,80	136,10	IS	2,95	46,87	32,31	0,011	0,34	0,107	0,024	0,023	0,113	0,08	0,57

FDDI0220	136,10	136,40	IS	2,51	41,68	39,49	0,013	0,42	0,057	0,032	0,048	0,126	0,09	0,61
FDDI0220	137,79	137,99	IS	3,00	40,03	42,09	0,015	0,15	0,068	0,017	0,085	0,002	0,10	0,66
FDDI0220	139,53	139,81	IS	2,99	41,13	39,70	0,037	0,27	0,097	0,07	0,05	0,002	1,31	1,45
FDDI0220	140,45	140,62	IS	3,21	34,72	46,26	0,032	0,2	0,04	0,013	0,905	0,881	5,35	2,31
FDDI0220	141,90	142,10	QF	2,97	29,99	46,33	0,051	0,27	0,097	0,033	2,604	2,388	13,05	6,57
FDDI0220	142,30	142,60	QF	3,24	31,57	46,11	0,043	0,20	0,092	0,085	2,832	2,293	12,85	5,23
FDDI0220	142,60	142,90	QF	3,16	29,54	48,88	0,051	0,08	0,069	0,042	2,441	1,551	12,40	5,07
FDDI0220	148,35	148,61	QF	3,06	29,82	46,19	0,050	0,53	0,074	0,002	2,683	3,222	14,44	5,17
FDDI0220	151,00	151,20	QF	3,20	33,23	46,00	0,057	0,34	0,063	0,026	1,804	2,807	15,25	3,72
FDDI0220	151,60	151,85	QF	3,15	30,73	42,80	0,057	0,09	0,085	0,004	4,306	3,468	14,59	6,29
FDDI0220	154,65	154,88	QF	3,08	28,16	36,76	0,050	0,19	0,11	0,081	7,414	3,766	15,26	12,07

Tabela A.2: Conjunto de dados utilizados para definir a curva de ajuste de densidade para o Alvo Dois Irmãos.

Furo	Intervalo (m)		CLV	Densidade Natural (g/cm3)	Intervalo corrigido (m)		HRD (CPS)	BRD (CPS)	Densidade perfilagem (g/cm3)	GN Corrigida (API)
	De	Até			De	Até				
FDDI0201	15	15,1	IF	2,47			1264	12257	2,45	25
FDDI0209	106,6	106,8	IS	2,94			711	10497	3,08	4
FDDI0209	107,7	107,9	IC	2,97	108,12	108,32	723	10454	3,06	3
FDDI0209	120	120,2	DO	3,05	120,36	120,56	737	10760	3,04	8
FDDI0209	131,25	131,4	DO	2,80			983	13082	2,72	3
FDDI0209	136,45	136,6	DO	2,69			982	13032	2,72	4
FDDI0209	147,45	147,65	DO	2,93	148,04	148,24	849	11775	2,89	2
FDDI0209	154,45	154,65	DO	2,74			966	12869	2,74	4
FDDI0209	162,35	162,55	DO	2,74			892	12147	2,83	6
FDDI0209	172,25	172,45	DO	2,73			986	12697	2,72	3
FDDI0224	38,25	38,45	IF	2,18			1785	15558	2,06	19
FDDI0224	55,80	56,00	IF	1,99	54,80	55,00	2013	16852	1,93	34
FDDI0224	98,60	98,75	IF	2,97			755	10805	3,01	2
FDDI0224	117,05	117,25	IF	2,74			918	11381	2,80	8
FDDI0224	162,80	163,00	XI	1,78	163,73	163,93	2276	17246	1,79	40
FDDI0224	167,50	167,65	IS	2,85	167,75	167,90	846	11427	2,89	5
FDDI0248	62,05	62,17	IF	2,88			812	10757	2,93	2
FDDI0248	72,1	72,3	XI	1,95			2124	17583	1,87	77
FDDI0264	82,15	82,30	ISC	2,48	81,38	81,53	1222	12593	2,48	19
FDDI0264	88,10	88,25	ISC	2,26	89,30	89,45	1468	13908	2,28	16
FDDI0265	53,6	53,8	IS	2,33	53,06	53,26	1474	14656	2,27	52
FDDI0265	72	72,1	IS	2,83	71,57	71,67	841	11044	2,90	3
FDDI0265	79,2	79,3	IS	2,48	77,76	77,86	1117	12497	2,58	4
FDDI0265	81,3	81,38	IS	2,67	80,46	80,54	771	10672	2,99	3
FDDI0265	94,7	94,85	IS	2,87	94,90	95,05	852	11059	2,88	7
FDDI0265	102,85	102,95	IF	2,68	102,99	103,09	1007	11821	2,70	5
FDDI0265	107,1	107,25	IF	2,90	109,35	109,50	767	10538	3,00	6
FDDI0265	119,58	119,7	IS	3,11	120,05	120,17	637	9657	3,20	6
FDDI0265	132,5	132,6	IF	2,36	132,31	132,41	1283	13592	2,43	17
FDDI0265	146,4	146,52	IF	1,97	141,55	141,67	2009	16473	1,93	30
FDDI0265	152,9	153,1	IF	2,68	153,41	153,61	1032	12039	2,67	7
FDDI0265	158,63	158,73	IF	2,53	160,34	160,44	1183	12677	2,52	3
FDDI0267	31,3	31,4	IS	2,96			584	9267	3,30	2
FDDI0267	36,7	36,83	DO	2,40			1560	15876	2,21	67
FDDI0267	49,2	49,38	DO	2,47			1330	15110	2,39	57

FDDI0267	58,66	58,8	QT	2,39			1393	15201	2,34	85
FDDI0267	64,1	64,25	QT	2,41			1375	15314	2,35	85
FDDI0270	20,95	21,05	IS	2,76			952	11848	2,76	3
FDDI0270	38,54	38,67	IS	2,76			988	12103	2,72	3
FDDI0270	48,28	48,38	IF	2,58	49,03	49,13	1066	12340	2,63	7
FDDI0270	65,9	66,06	DO	2,47			1331	14939	2,39	52
FDDI0270	71,86	71,98	DO	2,42			1393	15280	2,34	59
FDDI0270	82,8	82,95	DO	2,44			1349	15202	2,37	45
FDDI0271	26,90	27,10	IF	2,53	26,01	26,21	1150	12172	2,55	14
FDDI0271	31,65	31,85	IF	2,42			1519	13632	2,24	14
FDDI0271	33,85	33,95	IF	2,50			1126	12052	2,57	11
FDDI0271	37,10	37,30	IF	2,27	37,20	37,40	1278	13115	2,43	12
FDDI0271	42,05	42,15	IF	2,39	41,20	41,30	1420	13742	2,31	19
FDDI0271	48,20	48,40	IAF	2,36	47,89	48,09	1405	13361	2,33	12
FDDI0271	53,70	53,90	IF	2,82	52,05	52,25	954	11134	2,76	23
FDDI0271	54,75	54,95	IF	2,28			1649	14095	2,15	18
FDDI0271	57,80	58,00	IF	2,25	58,73	58,93	1372	13431	2,35	17
FDDI0271	65,70	65,90	IF	2,78	65,02	65,22	1133	12602	2,57	13
FDDI0273	3,85	4,00	CG	2,97	7,16	7,31	773	9831	2,99	50
FDDI0273	61,45	61,60	IF	3,04	63,50	63,35	839	9661	2,90	40
FDDI0275	13,90	14,08	CG	2,99			800	9915	2,95	44
FDDI0275	38,80	38,90	IF	3,47	44,28	44,38	494	8235	3,48	18
FDDI0275	43,95	44,15	IF	2,21	49,43	49,63	1343	12959	2,38	20
FDDI0275	55,60	55,80	IF	2,08	53,71	53,91	1630	13962	2,16	38
FDDI0275	61,60	61,80	IF	2,26	64,76	64,96	1115	12824	2,58	84
FDDI0275	62,35	62,55	IF	2,31	65,07	65,27	1338	13724	2,38	46
FDDI0275	67,40	67,60	IF	2,10	71,10	71,30	1725	14446	2,10	28
FDDI0275	69,50	69,70	IF	1,86	73,58	73,78	1904	16443	1,99	36
FDDI0275	79,60	79,80	IF	2,15			1779	15215	2,07	14
FDDI0275	87,65	87,85	IF	2,77	89,40	89,60	962	10601	2,75	15
FDDI0275	109,10	109,30	IF	2,01	111,22	111,42	2150	17040	1,87	18
FDDI0275	110,45	110,60	IF	2,79	112,57	112,72	960	12224	2,75	21
FDDI0275	112,30	112,50	IF	3,05			750	10354	3,02	25
FDDI0275	116,30	116,50	XI	2,51	120,96	121,16	1362	14281	2,36	28
FDDI0275	119,60	119,80	XI	2,17	122,93	123,13	1543	15420	2,22	40
FDDI0275	120,50	120,70	XI	2,56	124,93	125,13	1096	13002	2,60	22
FDDI0275	121,60	121,75	XI	2,48	128,38	128,53	1244	14128	2,46	50
FDDI0275	124,20	124,40	XI	2,53	129,32	129,52	1309	15180	2,41	63
FDDI0275	127,10	127,25	XI	2,36	129,65	129,80	1353	15225	2,37	64

FDDI0275	130,25	130,45	QT	2,48	129,84	130,04	1324	15581	2,39	64
FDDI0275	133,70	133,90	QT	2,42	136,96	137,16	1274	14937	2,43	68
FDDI0275	135,95	136,10	QT	2,36	137,95	138,10	1379	15579	2,35	74
FDDI0219	27,65	27,85	XI	1,86	26,75	26,95	2300	17732	1,78	95
FDDI0219	38,70	38,90	XI	1,89			1986	17112	1,94	107
FDDI0219	51,00	51,20	XI	1,87	48,18	48,38	2211	17295	1,82	60
FDDI0219	56,30	56,35	XI	1,71	53,28	53,33	2498	18769	1,69	68
FDDI0219	60,15	60,35	XI	1,90			2240	17057	1,81	53
FDDI0219	62,47	62,62	XI	2,06			1740	16241	2,09	64
FDDI0219	65,40	65,65	XI	1,92			1990	16431	1,94	61
FDDI0219	68,30	68,39	XI	1,90			1860	15951	2,02	57
FDDI0219	86,30	86,50	IF	2,55	81,99	82,19	1168	12612	2,53	3
FDDI0219	88,75	88,95	IF	2,31	87,29	87,49	1426	13550	2,31	7
FDDI0219	96,58	96,73	IAS	3,11	95,37	95,52	574	8912	3,32	3
FDDI0219	97,00	97,20	IAS	2,96	96,33	96,53	819	10751	2,93	7
FDDI0219	100,87	100,99	IC	2,48	98,50	98,62	1241	12767	2,46	25
FDDI0219	104,20	104,35	IC	2,86	101,20	101,35	891	11452	2,83	3
FDDI0219	104,65	104,75	IC	2,43	103,06	103,16	1366	14155	2,36	11
FDDI0219	110,41	110,54	IAS	2,52	108,77	108,91	1227	13149	2,48	20
FDDI0219	113,30	113,50	IAS	2,89			878	11185	2,85	21
FDDI0220	30,70	30,80	IF	2,36			1370	13160	2,35	44
FDDI0220	45,00	45,20	XI	2,12	45,62	45,82	1642	15161	2,15	87
FDDI0220	46,80	46,90	XI	1,97			1988	16730	1,94	96
FDDI0220	49,91	50,06	XI	1,79	49,35	49,44	2296	17855	1,78	86
FDDI0220	55,05	55,25	IF	2,77	54,45	54,65	1067	11735	2,63	4
FDDI0220	65,95	66,15	IF	2,77	66,20	66,40	958	11249	2,75	4
FDDI0220	66,90	67,05	IF	2,46	66,52	66,67	1328	13108	2,39	15
FDDI0220	72,70	72,80	IF	2,65	71,53	71,63	1044	11687	2,65	5
FDDI0220	73,30	73,45	IF	3,10	72,81	72,96	724	10175	3,06	1
FDDI0220	83,10	83,19	IF	2,80	81,75	81,84	886	11239	2,84	3
FDDI0220	86,65	86,72	IF	2,77	86,47	86,54	936	11656	2,78	7
FDDI0220	88,65	88,80	IF	2,97			735	10418	3,05	10
FDDI0220	90,80	90,88	IF	3,22	90,00	90,08	624	9795	3,22	8
FDDI0220	96,37	96,47	IS	2,86	96,14	96,24	911	11850	2,81	16
FDDI0220	99,05	99,17	IS	3,31	98,24	98,34	588	9474	3,29	18
FDDI0220	102,70	102,85	IS	2,42	100,80	100,95	1370	13903	2,36	32
FDDI0220	105,63	105,72	IF	2,96	106,80	106,89	772	10379	2,99	10
FDDI0220	119,24	119,36	IF	3,12	117,33	117,45	676	10343	3,14	10
FDDI0220	123,70	123,95	IS	2,79	120,75	121,00	857	11338	2,87	12

FDDI0220	123,95	124,25	IS	3,40	122,87	123,17	509	8824	3,45	3
FDDI0220	124,25	124,55	IS	3,14	123,17	123,44	559	8947	3,35	8
FDDI0220	125,95	126,10	IS	2,84	127,19	127,34	870	11117	2,86	18
FDDI0220	126,10	126,40	IS	2,71	127,34	127,64	989	11902	2,72	24
FDDI0220	126,40	126,70	IS	2,82	127,64	127,94	806	10848	2,95	18
FDDI0220	128,52	128,62	IS	2,82			877	11619	2,85	29
FDDI0220	130,05	130,18	IS	2,97			781	10658	2,98	8
FDDI0220	133,94	134,07	IS	2,67	131,44	131,57	1126	12852	2,57	10
FDDI0220	135,35	135,50	IS	2,77	131,61	131,76	1010	11980	2,69	9
FDDI0220	135,50	135,80	IS	2,71	131,76	132,06	943	11692	2,77	10
FDDI0220	135,80	136,10	IS	2,95	132,06	132,36	814	10654	2,93	17
FDDI0220	136,10	136,40	IS	2,51	132,36	132,66	921	11499	2,79	16
FDDI0220	137,79	137,99	IS	3,00	136,91	137,11	759	10602	3,01	6
FDDI0220	139,53	139,81	IS	2,99	138,28	138,55	817	10891	2,93	4
FDDI0220	140,45	140,62	IS	3,21	138,63	138,80	649	9755	3,18	3
FDDI0220	141,90	142,10	QF	2,97	140,21	140,41	781	10524	2,98	3
FDDI0220	142,30	142,60	QF	3,24	140,91	141,21	667	10309	3,15	0
FDDI0220	142,60	142,90	QF	3,16	141,21	141,51	616	9622	3,24	1
FDDI0220	148,35	148,61	QF	3,06	146,91	147,17	628	9740	3,22	2
FDDI0220	151,00	151,20	QF	3,20	147,60	147,80	628	9703	3,22	1
FDDI0220	151,60	151,85	QF	3,15	153,80	154,05	627	9935	3,22	1
FDDI0220	154,65	154,88	QF	3,08	156,36	156,59	803	11484	2,95	10

Tabela A.3: Conjunto completo de dados contendo resultados de análise de laboratório obtidos a partir de amostras de testemunhos de sondagem no Alvo Maquiné.

Furo	Intervalo (m)		CLV	Densidade Natural (g/cm <sup>3</sup> )	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	FeO	PF
	De	Até												
FDMQ0021	47,90	48,00	IS	2,87	38,48	42,39	0,034	0,29	0,038	0,026	0,002	0,090	1,52	2,90
FDMQ0021	50,20	50,30	IS	2,64	36,50	45,72	0,018	0,16	0,021	0,021	0,002	0,077	4,24	3,21
FDMQ0021	52,50	52,65	IS	2,65	33,81	48,49	0,046	0,23	0,034	0,016	0,002	0,041	1,07	3,65
FDMQ0021	59,10	59,25	IS	2,46	32,25	49,50	0,034	0,12	0,012	0,022	0,002	0,005	0,30	4,99
FDMQ0021	61,60	61,72	IS	2,85	36,53	43,82	0,027	0,10	0,025	0,020	0,002	0,018	0,38	4,63
FDMQ0021	75,20	75,30	IS	3,09	37,47	45,81	0,024	0,12	0,421	0,018	0,014	0,118	4,27	0,80
FDMQ0031	7,9	8,05	CG	2,48	55,87	1,47	0,123	8,27	0,044	0,222	0,020	0,092	0,16	10,03
FDMQ0031	50,25	50,4	XI	2,00	26,09	27,89	0,075	20,40	0,051	4,982	0,016	0,582	0,13	8,54
FDMQ0130	14,07	14,27	OC	1,77	59,39	2,19	0,040	1,13	0,105	0,139	0,001	0,196	0,01	10,84
FDMQ0130	27,35	27,55	OC	2,89	59,41	1,53	0,018	2,62	0,144	0,055	0,122	0,076	0,11	10,32
FDMQ0130	33,60	33,80	OC	1,70	58,02	2,27	0,069	2,66	0,121	0,095	0,001	0,059	0,09	11,36
FDMQ0130	44,00	44,20	XI	1,72	20,51	24,41	0,192	22,90	0,154	3,872	0,247	0,077	0,07	18,32
FDMQ0130	45,60	45,80	XI	1,58	31,46	20,15	0,224	18,26	0,178	3,963	0,015	0,063	0,22	11,95
FDMQ0130	47,50	47,70	IN	1,67	26,75	31,37	0,115	14,62	0,112	2,529	0,002	0,021	0,04	12,71
FDMQ0131	44,90	45,00	IF	3,38	63,00	5,25	0,084	0,46	0,100	0,058	0,022	0,245	3,20	3,70
FDMQ0131	67,35	67,45	IF	2,69	53,92	14,00	0,087	0,77	0,129	0,035	0,060	0,115	0,33	6,78
FDMQ0131	69,55	69,75	OC	2,27	63,04	4,83	0,113	0,62	0,183	0,040	0,019	0,201	0,87	4,29
FDMQ0131	79,65	79,85	OC	2,20	58,19	4,62	0,122	0,92	0,133	0,053	0,020	0,086	0,08	10,07
FDMQ0131	89,9	90,1	OC	1,70	59,15	3,35	0,116	1,02	0,130	0,052	0,059	0,122	0,09	11,36
FDMQ0131	98,7	98,9	OC	1,72	58,11	3,44	0,067	1,47	0,477	0,090	0,058	0,145	0,38	10,37
FDMQ0131	104,85	105,05	OC	1,68	58,58	2,35	0,164	1,35	0,154	0,047	0,015	0,162	0,12	10,98
FDMQ0131	109,7	109,9	OC	1,62	59,21	2,62	0,145	1,39	0,144	0,039	0,025	0,169	0,09	11,32
FDMQ0131	112,1	112,3	OC	1,81	59,29	2,28	0,098	1,40	0,502	0,018	0,015	0,008	0,15	10,47
FDMQ0131	119,9	120,1	OC	1,63	59,79	1,80	0,169	1,15	0,130	0,065	0,016	0,021	0,11	10,98
FDMQ0131	130,3	130,5	IF	2,27	57,28	4,11	0,240	2,47	0,196	0,112	0,017	0,003	0,29	11,27
FDMQ0131	134,25	134,45	IF	2,14	54,82	4,94	0,190	2,69	0,911	0,024	0,019	0,030	0,14	11,48
FDMQ0131	141,05	141,15	IF	2,61	57,25	2,99	0,290	2,09	0,273	0,099	0,015	0,003	0,16	11,67
FDMQ0131	151,6	151,8	IF	1,66	14,70	52,66	0,024	17,28	0,100	2,619	0,052	0,044	0,08	6,70
FDMQ0131	154,2	154,4	IF	1,75	29,68	22,84	0,199	18,66	1,400	1,386	0,052	0,057	0,10	12,49
FDMQ0131	167,3	167,5	XI	1,67	30,32	22,37	0,196	18,25	1,376	1,358	0,055	0,059	0,10	12,65
FDMQ0132	39,75	40,00	XI	2,29	53,98	10,11	0,060	7,37	0,175	0,532	0,011	0,117	0,14	4,49
FDMQ0132	43,75	44,15	XI	2,14	35,37	21,21	0,053	17,67	0,052	1,164	0,013	0,176	0,83	8,47
FDMQ0132	45,65	45,85	XI	2,12	38,82	18,75	0,109	15,34	0,048	1,604	0,013	0,127	0,63	7,77
FDMQ0132	46,50	46,70	XI	1,89	14,11	33,78	0,088	27,67	0,004	5,900	0,002	0,162	0,14	11,45

FDMQ0132	49,80	50,00	XI	2,09	60,54	5,51	0,075	3,87	0,234	0,223	0,026	0,075	0,09	3,29
FDMQ0132	52,80	53,00	IF	2,59	40,33	14,39	0,206	13,63	0,008	4,262	0,022	0,095	0,56	8,46
FDMQ0132	54,35	54,55	IF	3,33	65,37	2,59	0,038	1,93	0,237	0,085	0,011	0,035	0,18	1,61
FDMQ0132	55,80	55,90	IF	3,59	65,06	1,98	0,026	1,09	1,782	0,031	0,016	0,055	0,10	1,23
FDMQ0132	70,60	70,80	IF	2,21	48,58	16,52	0,190	6,32	0,145	0,336	0,017	0,111	0,38	6,69
FDMQ0132	94,85	95,05	IF	2,95	28,98	55,80	0,049	0,32	0,258	0,019	0,015	0,098	0,65	1,79
FDMQ0135	7,30	7,40	CG	3,08										
FDMQ0135	95,70	95,90	IF	1,86										
FDMQ0135	121,15	121,35	OC	2,23										
FDMQ0135	123,45	123,60	OC	2,00										
FDMQ0135	124,40	124,60	OC	2,08										
FDMQ0135	133,95	134,15	OC	1,85										
FDMQ0135	152,77	152,97	OC	2,20										
FDMQ0135	162,85	163,05	OC	1,89										
FDMQ0135	166,85	167,05	IF	2,32										
FDMQ0135	171,30	171,50	IF	2,06										
FDMQ0141	8,43	8,63	OC	2,22	57,62	3,02	0,088	1,72	0,137	0,178	0,057	0,270	0,40	11,53
FDMQ0141	16,60	16,80	OC	1,84	58,63	1,94	0,049	1,21	0,135	0,033	0,002	0,293	0,18	11,79
FDMQ0141	23,28	23,48	OC	2,37	58,62	6,75	0,095	1,06	0,138	0,064	0,001	0,108	0,19	8,42
FDMQ0141	28,53	28,73	OC	1,83	57,18	2,90	0,051	2,01	0,119	0,131	0,003	0,137	0,14	12,49
FDMQ0141	47,08	47,28	OC	1,59	57,99	2,77	0,050	2,12	0,125	0,12	0,002	0,076	0,10	11,60
FDMQ0141	49,90	50,10	OC	1,73	60,83	2,96	0,102	1,98	0,478	0,069	0,004	0,181	0,17	7,89
FDMQ0141	65,68	65,88	OC	1,92	59,91	1,50	0,044	1,56	0,168	0,049	0,004	0,007	0,13	10,66
FDMQ0141	67,47	67,67	OC	1,96	62,32	1,74	0,062	1,03	0,243	0,047	0,004	0,045	0,17	8,36
FDMQ0141	72,80	73,00	OC	1,88	61,30	2,25	0,094	0,92	0,132	0,018	0,002	0,072	0,20	8,17
FDMQ0141	103,10	103,30	IS	2,99	36,82	39,36	0,041	1,33	0,093	0,006	0,005	0,015	1,09	6,54
FDMQ0141	121,95	122,05	IC	3,12	34,51	45,14	0,060	0,20	0,085	0,029	0,003	0,032	0,11	4,24
FDMQ0141	122,83	122,95	IC	3,07	39,77	37,32	0,016	0,25	0,093	0,044	0,004	0,101	2,43	5,26
FDMQ0141	153,55	153,65	IF	3,02	39,59	37,64	0,022	0,22	0,095	0,023	0,003	0,087	0,34	5,15
FDMQ0141	155,86	156,00	IS	2,81	35,21	42,88	0,022	0,25	0,094	0,014	0,005	0,051	0,08	5,54
FDMQ0141	157,50	157,70	IS	2,97	37,03	40,50	0,004	0,17	0,096	0,041	0,003	0,074	1,47	5,72
FDMQ0141	165,85	166,00	IF	2,81	39,74	36,38	0,065	0,22	0,087	0,021	0,005	0,055	0,72	6,00
FDMQ0141	166,18	166,28	IF	2,73	40,12	35,85	0,037	0,26	0,092	0,006	0,003	0,059	0,47	5,73
FDMQ0141	168,55	168,65	IF	2,87	37,47	39,97	0,064	0,17	0,104	0,052	0,003	0,082	1,16	5,42
FDMQ0141	169,15	169,27	IF	2,81	35,56	42,33	0,027	0,18	0,097	0,035	0,003	0,061	1,07	6,41
FDMQ0144	26,20	26,40	OC	1,62	57,18	4,00	0,072	1,90	0,123	0,178	0,007	0,290	0,09	11,29
FDMQ0144	71,30	71,40	OC	2,44	36,57	41,38	0,089	0,81	0,101	0,010	0,006	0,038	0,07	4,45
FDMQ0144	115,10	115,20	IS	2,92	46,32	30,00	0,029	0,34	0,109	0,041	0,012	0,143	0,14	2,06
FDMQ0144	117,75	117,90	IS	2,90	32,66	44,78	0,061	2,15	0,093	0,317	0,006	0,095	1,31	6,66
FDMQ0144	118,95	119,10	IS	2,68	34,52	46,18	0,037	0,43	0,086	0,033	0,004	0,079	0,06	3,46



FDMQ0144	122,70	122,25	IS	3,18	41,74	36,33	0,035	0,29	0,091	0,067	0,004	0,053	1,45	3,11
FDMQ0144	123,80	123,90	IS	2,73	34,58	45,04	0,027	0,28	0,089	0,015	0,005	0,110	0,06	5,06
FDMQ0144	129,40	129,55	IS	2,52	32,84	45,72	0,067	0,58	0,087	0,122	0,001	0,016	0,06	5,60
FDMQ0144	131,05	131,15	IS	3,00	36,95	42,17	0,106	0,47	0,092	0,041	0,003	0,072	0,21	3,42
FDMQ0144	135,95	136,10	IS	3,80	37,20	42,35	0,020	0,45	0,090	0,096	0,008	0,049	0,90	3,84
FDMQ0144	140,80	140,90	IS	2,84	36,02	43,88	0,032	0,24	0,092	0,029	0,002	0,070	0,98	3,74
FDMQ0144	144,20	144,40	IS	3,19	42,54	34,47	0,083	0,20	0,107	0,027	0,002	0,011	0,04	4,97
FDMQ0144	151,40	151,55	IF	2,94	20,61	44,46	0,277	14,09	0,216	0,056	0,190	0,085	0,35	10,25
FDMQ0144	153,35	153,5	IS	2,55	39,46	37,52	0,102	1,66	0,100	0,049	0,003	0,047	0,35	4,13
FDMQ0144	154,45	154,55	IS	2,93	38,04	41,08	0,053	0,35	0,095	0,020	0,002	0,058	0,48	3,76
FDMQ0144	158,00	158,1	IS	2,94	36,68	44,26	0,034	0,43	0,089	0,018	0,005	0,102	0,10	2,70
FDMQ0144	161,05	161,2	IS	2,70	36,97	43,59	0,047	0,35	0,092	0,059	0,006	0,062	0,07	2,24
FDMQ0144	164,55	164,7	IS	2,86	36,39	42,52	0,024	0,19	0,280	0,023	0,001	0,059	0,16	4,14
FDMQ0144	167,25	167,35	IS	2,87	40,59	35,53	0,058	0,45	0,148	0,051	0,002	0,068	0,11	5,29
FDMQ0144	168,2	168,35	IS	3,63	34,40	44,29	0,042	0,15	0,105	0,028	0,004	0,013	0,05	5,48
FDMQ0144	169,10	169,2	IS	2,79	35,10	41,29	0,065	2,21	0,089	0,393	0,003	0,040	0,06	4,74

Tabela A.4: Conjunto de dados utilizados para definir a curva de ajuste de densidade para o Alvo Maquiné.

Furo	Intervalo (m)		CLV	Densidade Natural (g/cm3)	Intervalo Corrigido (m)		HRD (CPS)	BRD (CPS)	Densidade perfilagem (g/cm3)	GN Corrigida (API)
	De	Até			De	Até				
FDMQ0021	47,90	48,00	IS	2,87	48,46	48,56	847	10720	2,89	9
FDMQ0021	50,20	50,30	IS	2,64	48,87	48,97	1042	11821	2,66	13
FDMQ0021	52,50	52,65	IS	2,65	51,71	51,86	1028	11949	2,67	12
FDMQ0021	59,10	59,25	IS	2,46	58,95	59,1	1355	12435	2,37	13
FDMQ0021	61,60	61,72	IS	2,85	61,7	61,82	883	10611	2,85	12
FDMQ0021	75,20	75,30	IS	3,09	75,47	75,57	659	9122	3,17	2
FDMQ0031	7,9	8,05	CG	2,48	8,09	8,24	1509	13656	2,25	50
FDMQ0031	50,25	50,4	XI	2,00			1759	14551	2,08	37
FDMQ0130	27,35	27,55	OC	2,89	26,84	27,04	1101	11610	2,60	28
FDMQ0130	33,60	33,80	OC	1,70			2152	15395	1,85	30
FDMQ0131	67,35	67,45	IF	2,69	68,69	68,79	975	10583	2,73	15
FDMQ0131	69,55	69,75	OC	2,27	71,42	71,62	1429	12704	2,31	14
FDMQ0131	79,65	79,85	OC	2,20	79,10	79,30	1623	13312	2,17	15
FDMQ0131	89,9	90,1	OC	1,70	88,96	89,16	2547	15797	1,67	12
FDMQ0131	98,7	98,9	OC	1,72			2620	16082	1,64	11
FDMQ0131	104,85	105,05	OC	1,68	105,27	105,47	2233	15445	1,81	9
FDMQ0131	109,7	109,9	OC	1,62	108,23	108,43	2522	17067	1,68	15
FDMQ0131	112,1	112,3	OC	1,81			2197	15416	1,83	11
FDMQ0131	119,9	120,1	OC	1,63	119,11	119,31	2244	15769	1,81	6
FDMQ0131	130,3	130,5	IF	2,27	129,35	129,55	1434	12952	2,30	5
FDMQ0131	134,25	134,45	IF	2,14	133,74	133,94	1745	14267	2,09	6
FDMQ0131	141,05	141,15	IF	2,61	139,91	140,01	1157	12017	2,54	7
FDMQ0131	151,6	151,8	IF	1,66	150,17	150,37	2081	15392	1,89	7
FDMQ0131	154,2	154,4	IF	1,75			2110	16277	1,88	8
FDMQ0131	167,3	167,5	XI	1,67	167,03	167,23	2406	17516	1,73	9
FDMQ0132	39,75	40,00	XI	2,29	38,58	38,78	1559	14431	2,21	42
FDMQ0132	43,75	44,15	XI	2,14			1836	15454	2,03	22
FDMQ0132	45,65	45,85	XI	2,12	45,95	46,15	1708	15292	2,12	32
FDMQ0132	46,50	46,70	XI	1,89	47,43	47,63	2033	16965	1,92	36
FDMQ0132	49,80	50,00	XI	2,09	58,59	48,79	1659	14975	2,15	28
FDMQ0132	52,80	53,00	IF	2,59	50,88	51,08	894	10758	2,83	26
FDMQ0132	54,35	54,55	IF	3,33	53,06	53,26	607	8750	3,26	16
FDMQ0132	55,80	55,90	IF	3,59	54,51	54,61	523	7753	3,42	15
FDMQ0132	70,60	70,80	IF	2,21	69,12	69,32	1286	13080	2,42	15
FDMQ0132	94,85	95,05	IF	2,95	93,21	93,41	797	10083	2,96	4

FDMQ0135	7,30	7,40	CG	3,08			740	9556	3,04	19
FDMQ0135	121,15	121,35	OC	2,23	121,39	121,59	1495	13007	2,26	10
FDMQ0135	123,45	123,60	OC	2,00	123,86	124,01	1944	15697	1,97	17
FDMQ0135	133,95	134,15	OC	1,85	132,82	133,02	1863	15192	2,01	17
FDMQ0135	152,77	152,97	OC	2,20	153,84	154,04	1504	13323	2,25	8
FDMQ0135	162,85	163,05	OC	1,89	162,56	162,76	1870	14773	2,01	5
FDMQ0135	166,85	167,05	IF	2,32	166,52	166,72	1354	13284	2,37	3
FDMQ0135	171,30	171,50	IF	2,06	171,49	171,69	2039	16377	1,92	6
FDMQ0141	49,90	50,10	OC	1,73	50,62	50,82	2328	15988	1,77	24
FDMQ0141	103,10	103,30	IS	2,99	101,48	101,68	772	10642	2,99	10
FDMQ0141	121,95	122,05	IC	3,12	122,63	122,73	738	10355	3,04	9
FDMQ0141	122,83	122,95	IC	3,07			804	10912	2,94	8
FDMQ0141	153,55	153,65	IF	3,02	153,25	153,35	737	10350	3,04	10
FDMQ0141	155,86	156,00	IS	2,81	154,88	155,02	994	12125	2,71	10
FDMQ0141	157,50	157,70	IS	2,97	157,20	157,40	786	10622	2,97	9
FDMQ0141	165,85	166,00	IF	2,81			817	10959	2,93	8
FDMQ0141	166,18	166,28	IF	2,73			955	11359	2,76	6
FDMQ0141	168,55	168,65	IF	2,87	167,74	167,84	864	11272	2,86	8
FDMQ0141	169,15	169,27	IF	2,81	170,12	170,24	933	11637	2,78	9601
FDMQ0144	26,20	26,40	OC	1,62	26,91	27,11	2654	15974	1,67	34
FDMQ0144	71,30	71,40	OC	2,44			1140	12527	2,56	10
FDMQ0144	115,10	115,20	IS	2,92	116,57	116,67	808	10787	2,94	9
FDMQ0144	117,75	117,90	IS	2,90			849	11114	2,89	10
FDMQ0144	122,70	122,25	IS	3,18			753	10442	3,02	7
FDMQ0144	123,80	123,90	IS	2,73	123,42	123,52	1048	12984	2,65	18
FDMQ0144	129,40	129,55	IS	2,52	130,68	130,83	1386	14638	2,34	12
FDMQ0144	131,05	131,15	IS	3,00			761	10966	3,01	10
FDMQ0144	140,80	140,90	IS	2,84			834	10708	2,90	6
FDMQ0144	151,40	151,55	IF	2,94	152,93	153,08	804	10476	2,95	8
FDMQ0144	153,35	153,5	IS	2,55			1088	12713	2,61	10
FDMQ0144	154,45	154,55	IS	2,93	154,86	154,96	772	10329	2,99	8
FDMQ0144	158,00	158,1	IS	2,94	158,55	158,65	770	10602	2,99	13
FDMQ0144	161,05	161,2	IS	2,70	160,73	160,88	1042	12339	2,66	6
FDMQ0144	167,25	167,35	IS	2,87			991	11640	2,71	11
FDMQ0144	169,10	169,2	IS	2,79	169,27	169,37	854	11330	2,88	11

Tabela A.5: Diferenças médias entre densidade obtida por perfilagem (curva de ajuste de Maquine), e por análise de laboratório, para dados do Alvo Dois Irmãos.

---

Furo	Intervalo (m)	CLV	Densidade natural	Densidade estimada	Erro	Erro
------	---------------	-----	-------------------	--------------------	------	------

				(g/cm <sup>3</sup> )	por	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
	De	Até			perfilagem		
					Curva de ajuste de		
					Maquiné		
FDDI0201	15	15,1	IF	2,47	2,44	-0,02	-0,96
FDDI0209	106,6	106,8	IS	2,94	3,14	0,21	7,13
FDDI0209	107,7	107,9	IC	2,97	3,12	0,16	5,28
FDDI0209	120	120,2	DO	3,05	3,10	0,05	1,61
FDDI0209	131,25	131,4	DO	2,80	2,75	-0,05	-1,88
FDDI0209	136,45	136,6	DO	2,69	2,75	0,06	2,14
FDDI0209	147,45	147,65	DO	2,93	2,93	0,00	-0,08
FDDI0209	154,45	154,65	DO	2,74	2,77	0,04	1,31
FDDI0209	162,35	162,55	DO	2,74	2,87	0,13	4,62
FDDI0209	172,25	172,45	DO	2,73	2,75	0,02	0,63
FDDI0224	38,25	38,45	IF	2,18	2,02	-0,15	-7,07
FDDI0224	55,80	56,00	IF	1,99	1,88	-0,12	-5,84
FDDI0224	98,60	98,75	IF	2,97	3,07	0,10	3,26
FDDI0224	117,05	117,25	IF	2,74	2,83	0,09	3,26
FDDI0224	162,80	163,00	XI	1,78	1,73	-0,05	-2,87
FDDI0224	167,50	167,65	IS	2,85	2,93	0,08	2,89
FDDI0248	62,05	62,17	IF	2,88	2,98	0,11	3,67
FDDI0248	72,1	72,3	XI	1,95	1,81	-0,14	-7,31
FDDI0264	82,15	82,30	ISC	2,48	2,48	0,01	0,31
FDDI0264	88,10	88,25	ISC	2,26	2,26	0,00	-0,12
FDDI0265	53,6	53,8	IS	2,33	2,26	-0,07	-3,04
FDDI0265	72	72,1	IS	2,83	2,94	0,11	3,83
FDDI0265	79,2	79,3	IS	2,48	2,59	0,11	4,47
FDDI0265	81,3	81,38	IS	2,67	3,05	0,38	14,14
FDDI0265	94,7	94,85	IS	2,87	2,92	0,06	1,98
FDDI0265	102,85	102,95	IF	2,68	2,72	0,04	1,58
FDDI0265	107,1	107,25	IF	2,90	3,05	0,15	5,29
FDDI0265	119,58	119,7	IS	3,11	3,28	0,17	5,52
FDDI0265	132,5	132,6	IF	2,36	2,42	0,07	2,84
FDDI0265	146,4	146,52	IF	1,97	1,88	-0,09	-4,67
FDDI0265	152,9	153,1	IF	2,68	2,69	0,01	0,39
FDDI0265	158,63	158,73	IF	2,53	2,52	-0,01	-0,20
FDDI0267	31,3	31,4	IS	2,96	3,38	0,42	14,16
FDDI0267	36,7	36,83	DO	2,40	2,19	-0,21	-8,79
FDDI0267	49,2	49,38	DO	2,47	2,38	-0,09	-3,50

FDDI0267	58,66	58,8	QT	2,39	2,32	-0,06	-2,58
FDDI0267	64,1	64,25	QT	2,41	2,34	-0,07	-3,06
FDDI0270	20,95	21,05	IS	2,76	2,79	0,03	0,92
FDDI0270	38,54	38,67	IS	2,76	2,74	-0,01	-0,51
FDDI0270	48,28	48,38	IF	2,58	2,65	0,07	2,74
FDDI0270	65,9	66,06	DO	2,47	2,38	-0,09	-3,49
FDDI0270	71,86	71,98	DO	2,42	2,32	-0,10	-3,97
FDDI0270	82,8	82,95	DO	2,44	2,36	-0,07	-3,00
FDDI0271	26,90	27,10	IF	2,53	2,56	0,02	0,92
FDDI0271	31,65	31,85	IF	2,42	2,22	-0,20	-8,18
FDDI0271	33,85	33,95	IF	2,50	2,58	0,08	3,37
FDDI0271	37,10	37,30	IF	2,27	2,43	0,16	7,24
FDDI0271	42,05	42,15	IF	2,39	2,30	-0,09	-3,89
FDDI0271	48,20	48,40	IAF	2,36	2,31	-0,05	-2,06
FDDI0271	53,70	53,90	IF	2,82	2,79	-0,03	-1,22
FDDI0271	54,75	54,95	IF	2,28	2,12	-0,16	-6,93
FDDI0271	57,80	58,00	IF	2,25	2,34	0,09	3,93
FDDI0271	65,70	65,90	IF	2,78	2,58	-0,21	-7,37
FDDI0273	3,85	4,00	CG	2,97	3,04	0,07	2,29
FDDI0273	61,45	61,60	IF	3,04	2,94	-0,09	-3,06
FDDI0275	13,90	14,08	CG	2,99	3,00	0,01	0,22
FDDI0275	38,80	38,90	IF	3,47	3,59	0,12	3,38
FDDI0275	43,95	44,15	IF	2,21	2,37	0,16	7,22
FDDI0275	55,60	55,80	IF	2,08	2,13	0,05	2,50
FDDI0275	61,60	61,80	IF	2,26	2,60	0,34	14,85
FDDI0275	62,35	62,55	IF	2,31	2,37	0,07	2,99
FDDI0275	67,40	67,60	IF	2,10	2,06	-0,04	-1,89
FDDI0275	69,50	69,70	IF	1,86	1,94	0,09	4,61
FDDI0275	79,60	79,80	IF	2,15	2,03	-0,12	-5,66
FDDI0275	87,65	87,85	IF	2,77	2,78	0,00	0,01
FDDI0275	109,10	109,30	IF	2,01	1,80	-0,22	-10,83
FDDI0275	110,45	110,60	IF	2,79	2,78	-0,01	-0,35
FDDI0275	112,30	112,50	IF	3,05	3,08	0,02	0,80
FDDI0275	116,30	116,50	XI	2,51	2,35	-0,16	-6,26
FDDI0275	119,60	119,80	XI	2,17	2,20	0,03	1,20
FDDI0275	120,50	120,70	XI	2,56	2,62	0,06	2,29
FDDI0275	121,60	121,75	XI	2,48	2,46	-0,02	-0,79
FDDI0275	124,20	124,40	XI	2,53	2,40	-0,13	-5,25
FDDI0275	127,10	127,25	XI	2,36	2,36	0,00	-0,05
FDDI0275	130,25	130,45	QT	2,48	2,39	-0,09	-3,79
FDDI0275	133,70	133,90	QT	2,42	2,43	0,02	0,66

FDDI0275	135,95	136,10	QT	2,36	2,34	-0,02	-0,99
FDDI0219	27,65	27,85	XI	1,86	1,71	-0,15	-7,92
FDDI0219	38,70	38,90	XI	1,89	1,89	0,00	0,19
FDDI0219	51,00	51,20	XI	1,87	1,76	-0,11	-5,81
FDDI0219	56,30	56,35	XI	1,71	1,61	-0,10	-5,68
FDDI0219	60,15	60,35	XI	1,90	1,75	-0,15	-8,00
FDDI0219	62,47	62,62	XI	2,06	2,05	-0,01	-0,34
FDDI0219	65,40	65,65	XI	1,92	1,89	-0,03	-1,33
FDDI0219	68,30	68,39	XI	1,90	1,97	0,07	3,52
FDDI0219	86,30	86,50	IF	2,55	2,54	-0,01	-0,48
FDDI0219	88,75	88,95	IF	2,31	2,30	-0,01	-0,57
FDDI0219	96,58	96,73	IAS	3,11	3,40	0,30	9,63
FDDI0219	97,00	97,20	IAS	2,96	2,97	0,01	0,49
FDDI0219	100,87	100,99	IC	2,48	2,47	-0,02	-0,65
FDDI0219	104,20	104,35	IC	2,86	2,87	0,00	0,16
FDDI0219	104,65	104,75	IC	2,43	2,35	-0,08	-3,23
FDDI0219	110,41	110,54	IAS	2,52	2,48	-0,04	-1,41
FDDI0219	113,30	113,50	IAS	2,89	2,89	0,00	-0,12
FDDI0220	30,70	30,80	IF	2,36	2,34	-0,02	-0,64
FDDI0220	45,00	45,20	XI	2,12	2,12	0,00	0,15
FDDI0220	46,80	46,90	XI	1,97	1,89	-0,08	-3,83
FDDI0220	49,91	50,06	XI	1,79	1,72	-0,08	-4,35
FDDI0220	55,05	55,25	IF	2,77	2,65	-0,12	-4,24
FDDI0220	65,95	66,15	IF	2,77	2,78	0,01	0,43
FDDI0220	66,90	67,05	IF	2,46	2,38	-0,08	-3,08
FDDI0220	72,70	72,80	IF	2,65	2,68	0,03	0,97
FDDI0220	73,30	73,45	IF	3,10	3,12	0,03	0,82
FDDI0220	83,10	83,19	IF	2,80	2,88	0,07	2,54
FDDI0220	86,65	86,72	IF	2,77	2,81	0,04	1,32
FDDI0220	88,65	88,80	IF	2,97	3,10	0,13	4,48
FDDI0220	90,80	90,88	IF	3,22	3,30	0,09	2,67
FDDI0220	96,37	96,47	IS	2,86	2,84	-0,01	-0,48
FDDI0220	99,05	99,17	IS	3,31	3,38	0,06	1,89
FDDI0220	102,70	102,85	IS	2,42	2,35	-0,07	-2,97
FDDI0220	105,63	105,72	IF	2,96	3,04	0,08	2,77
FDDI0220	119,24	119,36	IF	3,12	3,20	0,08	2,63
FDDI0220	123,70	123,95	IS	2,79	2,92	0,12	4,37
FDDI0220	123,95	124,25	IS	3,40	3,55	0,15	4,55
FDDI0220	124,25	124,55	IS	3,14	3,44	0,30	9,42
FDDI0220	125,95	126,10	IS	2,84	2,90	0,06	2,10
FDDI0220	126,10	126,40	IS	2,71	2,74	0,03	1,04

FDDI0220	126,40	126,70	IS	2,82	2,99	0,17	6,14
FDDI0220	128,52	128,62	IS	2,82	2,89	0,07	2,34
FDDI0220	130,05	130,18	IS	2,97	3,03	0,06	2,11
FDDI0220	133,94	134,07	IS	2,67	2,58	-0,08	-3,06
FDDI0220	135,35	135,50	IS	2,77	2,72	-0,06	-2,03
FDDI0220	135,50	135,80	IS	2,71	2,80	0,09	3,34
FDDI0220	135,80	136,10	IS	2,95	2,98	0,03	1,09
FDDI0220	136,10	136,40	IS	2,51	2,83	0,32	12,59
FDDI0220	137,79	137,99	IS	3,00	3,06	0,07	2,27
FDDI0220	139,53	139,81	IS	2,99	2,97	-0,02	-0,58
FDDI0220	140,45	140,62	IS	3,21	3,26	0,05	1,54
FDDI0220	141,90	142,10	QF	2,97	3,03	0,06	2,18
FDDI0220	142,30	142,60	QF	3,24	3,22	-0,01	-0,42
FDDI0220	142,60	142,90	QF	3,16	3,32	0,16	4,98
FDDI0220	148,35	148,61	QF	3,06	3,30	0,23	7,62
FDDI0220	151,00	151,20	QF	3,20	3,29	0,10	3,01
FDDI0220	151,60	151,85	QF	3,15	3,30	0,15	4,84
FDDI0220	154,65	154,88	QF	3,08	3,00	-0,08	-2,66
Valor médio =						0,02	0,50

Tabela A.6: Diferenças médias entre densidade obtida por perfilagem (curva de ajuste de Dois Irmãos) e por análise de laboratório, para dados do Alvo Maquiné.

Furo	Intervalo (m)		CLV	Densidade natural (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade	Erro (g/cm <sup>3</sup> )	Erro (%)
	De	Até			estimada por		
					perfilagem Curva de ajuste de Dois Irmãos		
FDMQ0021	47,90	48,00	IS	2,87	2,88	0,01	0,37
FDMQ0021	50,20	50,30	IS	2,64	2,66	0,02	0,61
FDMQ0021	52,50	52,65	IS	2,65	2,67	0,02	0,80
FDMQ0021	59,10	59,25	IS	2,46	2,37	-0,09	-3,76
FDMQ0021	61,60	61,72	IS	2,85	2,84	-0,01	-0,36
FDMQ0021	75,20	75,30	IS	3,09	3,16	0,07	2,16
FDMQ0031	7,9	8,05	CG	2,48	2,25	-0,23	-9,13
FDMQ0031	50,25	50,4	XI	2,00	2,09	0,09	4,48
FDMQ0130	27,35	27,55	OC	2,89	2,60	-0,29	-10,07
FDMQ0130	33,60	33,80	OC	1,70	1,87	0,16	9,69
FDMQ0131	67,35	67,45	IF	2,69	2,73	0,04	1,63
FDMQ0131	69,55	69,75	OC	2,27	2,31	0,04	1,83
FDMQ0131	79,65	79,85	OC	2,20	2,17	-0,02	-1,13
FDMQ0131	89,9	90,1	OC	1,70	1,68	-0,02	-1,14
FDMQ0131	98,7	98,9	OC	1,72	1,65	-0,07	-3,90
FDMQ0131	104,85	105,05	OC	1,68	1,83	0,15	8,75
FDMQ0131	109,7	109,9	OC	1,62	1,69	0,08	4,65
FDMQ0131	112,1	112,3	OC	1,81	1,84	0,03	1,81
FDMQ0131	119,9	120,1	OC	1,63	1,82	0,19	11,78
FDMQ0131	130,3	130,5	IF	2,27	2,31	0,04	1,92
FDMQ0131	134,25	134,45	IF	2,14	2,09	-0,05	-2,24
FDMQ0131	141,05	141,15	IF	2,61	2,54	-0,06	-2,48
FDMQ0131	151,6	151,8	IF	1,66	1,90	0,24	14,46
FDMQ0131	154,2	154,4	IF	1,75	1,89	0,14	8,11
FDMQ0131	167,3	167,5	XI	1,67	1,74	0,07	4,24
FDMQ0132	39,75	40,00	XI	2,29	2,22	-0,07	-3,18
FDMQ0132	43,75	44,15	XI	2,14	2,04	-0,10	-4,64
FDMQ0132	45,65	45,85	XI	2,12	2,12	0,00	0,08
FDMQ0132	46,50	46,70	XI	1,89	1,93	0,04	2,05
FDMQ0132	49,80	50,00	XI	2,09	2,15	0,06	2,91
FDMQ0132	52,80	53,00	IF	2,59	2,83	0,23	9,04
FDMQ0132	54,35	54,55	IF	3,33	3,25	-0,08	-2,42
FDMQ0132	55,80	55,90	IF	3,59	3,41	-0,18	-4,94



FDMQ0132	70,60	70,80	IF	2,21	2,43	0,21	9,67
FDMQ0132	94,85	95,05	IF	2,95	2,95	0,00	-0,08
FDMQ0135	7,30	7,40	CG	3,08	3,03	-0,05	-1,58
FDMQ0135	121,15	121,35	OC	2,23	2,26	0,03	1,53
FDMQ0135	123,45	123,60	OC	2,00	1,98	-0,02	-1,03
FDMQ0135	133,95	134,15	OC	1,85	2,02	0,18	9,56
FDMQ0135	152,77	152,97	OC	2,20	2,26	0,05	2,38
FDMQ0135	162,85	163,05	OC	1,89	2,02	0,13	7,08
FDMQ0135	166,85	167,05	IF	2,32	2,37	0,06	2,41
FDMQ0135	171,30	171,50	IF	2,06	1,92	-0,13	-6,53
FDMQ0141	49,90	50,10	OC	1,73	1,78	0,05	2,93
FDMQ0141	103,10	103,30	IS	2,99	2,99	-0,01	-0,18
FDMQ0141	121,95	122,05	IC	3,12	3,04	-0,08	-2,69
FDMQ0141	122,83	122,95	IC	3,07	2,94	-0,13	-4,25
FDMQ0141	153,55	153,65	IF	3,02	3,04	0,02	0,69
FDMQ0141	155,86	156,00	IS	2,81	2,71	-0,10	-3,42
FDMQ0141	157,50	157,70	IS	2,97	2,97	0,00	0,03
FDMQ0141	165,85	166,00	IF	2,81	2,92	0,11	4,07
FDMQ0141	166,18	166,28	IF	2,73	2,75	0,03	1,06
FDMQ0141	168,55	168,65	IF	2,87	2,86	-0,01	-0,32
FDMQ0141	169,15	169,27	IF	2,81	2,78	-0,03	-1,00
FDMQ0144	26,20	26,40	OC	1,62	1,64	0,01	0,85
FDMQ0144	71,30	71,40	OC	2,44	2,56	0,12	4,78
FDMQ0144	115,10	115,20	IS	2,92	2,94	0,01	0,44
FDMQ0144	117,75	117,90	IS	2,90	2,88	-0,02	-0,64
FDMQ0144	122,70	122,25	IS	3,18	3,01	-0,17	-5,20
FDMQ0144	123,80	123,90	IS	2,73	2,65	-0,08	-2,83
FDMQ0144	129,40	129,55	IS	2,52	2,35	-0,17	-6,86
FDMQ0144	131,05	131,15	IS	3,00	3,00	0,01	0,19
FDMQ0144	140,80	140,90	IS	2,84	2,90	0,06	2,20
FDMQ0144	151,40	151,55	IF	2,94	2,94	0,00	-0,01
FDMQ0144	153,35	153,5	IS	2,55	2,61	0,06	2,31
FDMQ0144	154,45	154,55	IS	2,93	2,99	0,05	1,77
FDMQ0144	158,00	158,1	IS	2,94	2,99	0,05	1,56
FDMQ0144	161,05	161,2	IS	2,70	2,66	-0,04	-1,55
FDMQ0144	167,25	167,35	IS	2,87	2,71	-0,15	-5,32
FDMQ0144	169,10	169,2	IS	2,79	2,88	0,08	2,92
Valor médio =						0,01	0,81