

Dissertação de Mestrado

**A INFLUÊNCIA DO MONITORAMENTO DO
FLUIDO E DOS PARÂMETROS DE
PERFURAÇÃO NA EFICIÊNCIA DA
SONDAGEM DE MINÉRIO DE FERRO.
UM ESTUDO DE CASO.**

NUGEO

AUTOR: MARIA DE LOURDES DE PAULA ALVES

ORIENTADOR: Prof. Dr. Wellington Campos

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP


OURO PRETO - AGOSTO DE 2015

A INFLUÊNCIA DO MONITORAMENTO DO FLUIDO E DOS PARÂMETROS DE PERFURAÇÃO NA EFICIÊNCIA DA SONDAGEM DE MINÉRIO DE FERRO. UM ESTUDO DE CASO

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

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 28 de agosto de 2015, pela Banca Examinadora composta pelos membros:


Prof. Dr. Wellington Campos (Orientador)


Prof. Eugênio Pereira (Co-orientador)


Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar


Dr. Marco Antonio Braga

A474i Alves, Maria de Lourdes de Paula.

A influência do monitoramento do fluido e dos parâmetros de perfuração na eficiência da sondagem de minério de ferro [manuscrito]: um estudo de caso / Maria de Lourdes de Paula Alves. – 2015.

140f.: color; grafs; tabs; mapas; Perfis Geofísicos.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Campos.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.
Área de Concentração: Geotécnica de Maciços Rochosos (Ênfase em Sondagem)

1. Pesquisa Geofísica. 2. Ferro – Minas e mineração. 3. Fluidos. 4. Perfuração e broqueamento. I. Campos, Wellington. II. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. III. Título.

CDU: 622.24

Catlogação: www.sisbin.ufop.br

Dedico este trabalho à minha família, meus amigos e aos colegas de trabalho, pelo incentivo, apoio, confiança, paciência e compreensão durante este período.

“A ciência progride de duas maneiras: adicionando fatos novos e simplificando os existentes...” Claude Bernard (1813 – 1878).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que sempre iluminou meu caminho.

Aos meus pais, por sempre priorizarem minha educação, me permitindo chegar até aqui.

Aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos, pelo apoio incondicional.

À UFOP, mais precisamente à Escola de Minas e ao NUGEO, e em especial aos bolsistas Jussara e Rafael, pelo apoio.

Agradeço também ao Professor e Orientador Wellington Campos e ao Professor e Co-Orientador Eugenio Pereira pela disponibilidade, incentivo e pelas conversas técnicas de alto nível, orientações, sugestões e informações que valorizaram este trabalho.

Aos colegas de classe, pela troca, parceria, companheirismo e contribuição no período de conclusão dos créditos.

À Vale, através do Diretor Lúcio Cavalli e dos Gerentes Henry Galbiatti e Marco Antônio Braga, por acreditar que uma empresa se desenvolve aprimorando os conhecimentos de seu profissional, e pela confiança e apoio integral no desenvolvimento deste estudo. A todos da Diretoria de Planejamento de Ferrosos (DIPF), e em especial aos colegas da GAEMF, pelo apoio dado e pelas contribuições ofertadas.

Um agradecimento especial à equipe de sondagem, Junio, Carlos, Renato, Marcone, Klayton, Vicente, Alcimar, Luciano e Edson, por todo apoio e colaboração no levantamento e consolidação dos dados.

Ao Marcelo Aniceto por todo apoio, pelas conversas altamente construtivas e esclarecedoras e pelas diversas sugestões recebidas.

Aos geofísicos Wanderson e Dionísio, pela imensa contribuição no tratamento e avaliação dos dados geofísicos.

Aos colegas Rodrigo Rocha e Simone Santos, pela ajuda com as figuras, fotos e gráficos.

A Adriana Zapparoli, amiga e excelente profissional, pela grande contribuição, e pela parceria cada vez mais sólida.

À equipe de Controle de Qualidade e Fiscalização da Geoservice, em especial a Rogério Silva e Thiago Lima, pela ajuda no levantamento e disponibilização de dados, além dos trabalhos com formatação.

Agradeço a Geosol e toda a equipe, por meio de seu presidente, o Geólogo João Luiz Carvalho, pela parceria que possibilitou a execução da pesquisa conforme programado, através da permissão e concessão de informações sem as quais este trabalho não seria completo. Em especial, ao Gerente de Operações Ricardo Freitas, pela disposição em compartilhar seu conhecimento e experiência adquirida ao longo da vida profissional.

A Silvia Rodrigues, pela paciência e tempo dedicado na revisão do texto.

Às colegas de trabalho Simone, Elenir, Luciana e Priscila, pela paciência e colaboração na descrição dos furos.

Às minhas amigas Nini, Cristina, Tiolinha e Preta, pelos momentos de descontração que tanto me ajudaram, tornando esta jornada mais leve e produtiva. Em especial à Daniela, por todo apoio.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

Realizar este estudo e ao mesmo tempo executar minhas atividades no trabalho exigiu muito esforço, e só foi possível com a contribuição de cada um de vocês. Por isso registro aqui o meu agradecimento e reconhecimento a todos.

Valeu cada segundo gasto neste trabalho, e cada renúncia necessária.

Sinto-me orgulhosa e realizada. Muito obrigada!

RESUMO

No Brasil, a pesquisa geológica de minério de ferro utiliza, em grande escala, o método de sondagem rotativa testemunhada diamantada. Com o objetivo de ampliar o desempenho da sondagem, este trabalho estabelece, através de um estudo de caso, uma metodologia que demonstra a influência de se ter uma formulação do fluido compatível com as litologias perfuradas, além da influência do monitoramento de suas propriedades e dos parâmetros de perfuração. A metodologia compreende algumas etapas como desenvolvimento operacional, formulação do fluido e monitoramentos executados, confirmação dos litotipos e contatos a partir da descrição geológica detalhada e perfilagem geofísica, avaliação do maciço, investigação de possíveis interferências das litologias perfuradas e os efeitos da metodologia na produtividade e custo. O estudo foi realizado na Mina de Brucutu da Mineradora Vale S.A, localizada no Quadrilátero Ferrífero, onde diversos problemas operacionais são apontados durante a execução da sondagem, devido principalmente à porção friável. Foram executados cinco furos realizando o controle e monitoramento do fluido, bem como dos parâmetros de perfuração. Para permitir a comparação dos resultados, cada furo foi executado com variações diferentes no fluido e também com diferentes escalas de monitoramento. Com o intuito de investigar as interferências positivas e negativas das litologias perfuradas, amostras do material perfurado das regiões onde houve perda frequente de lama foram submetidas a diferentes análises, como distribuição granulométrica, geração de lama da própria amostra e caracterização química e mineralógica. A metodologia estabelecida garantiu uma perfuração eficiente, rápida, segura e com custo compatível com a operação. Em relação às campanhas anteriores, a aplicação da metodologia possibilitou uma redução de 41,18% no tempo de execução médio dos furos, um acréscimo de 81,01% na taxa de penetração diária e de 69,51% na produtividade média, com uma redução nos custos fixos em torno de 41%. Comprovou-se também que o melhor desempenho é obtido quando se trabalha somente com fluido polimérico, e executando monitoramento das propriedades do fluido e dos parâmetros de perfuração.

Palavras – chave: sondagem, minério de ferro, fluido de perfuração, reologia, tixotropia, Perfilagem geofísica, parâmetros de perfuração, monitoramento.

ABSTRACT

The diamond drilling method is the most used in large scale on iron ore exploration in Brazil. This work has the aim to increase the drilling performance, so that it establishes, through a case study, a methodology that demonstrates the influence of adequate fluid formulation and monitoring of its properties and drilling parameters, and its compatibility to the drilled lithologies. The methodology comprises some steps as operational development, the fluid formulation and its monitoring, confirmation of rock types and contacts, by detailed geological description and geophysical well logging, rock structure evaluation, investigation of possible interference of the drilled lithologies and the effects of methodology in productivity and cost. The study took place at the Brucutu mine site by Vale SA, located in the Iron Quadrangle, where several operational problems are pointed out during the drilling execution, mainly due to the presence of friable rocks. Five holes were executed subjected to its drilling parameters and fluid monitoring and controlling. In order to comparison of results, each hole was monitored with different variations in the fluid and different monitoring types. In order to investigate the positive and negative interference of the drilled lithology, where fluid's losses occurred, samples were collected and underwent to different analysis such as particle size distribution, sample own mud generation and chemical and mineralogical characterization. The results were quite satisfactory. The established methodology ensured an efficient, fast and safety drilling with compatible operation cost and well preserved cores. In comparison with previous drilling programs at Brucutu Mine, the application of the methodology enables a reduction of 41.18% in the average runtime of holes execution, increases the daily penetration rate at 81.01% and productivity in 69.51% and a decreased at the fixed costs around 41%. The study also showed that the best performance is obtained when is used only polymer fluid, and fluid properties and drilling parameters were monitoring and controlling during the whole operation.

Key words: drilling, iron ore, drilling fluids, rheology, thixotropy, geophysical logging, drilling parameters, monitoring.

ÍNDICE

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1– Apresentação	1
1.2 – Justificativa do Estudo	4
1.3 – Objetivos	4
1.4 – Metodologia de Trabalho	5
1.5 – Localização e Acesso	6
1.6 – Estrutura da Dissertação.....	8
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica e Conceitos Aplicados	10
2.1 – Introdução	10
2.2 – Métodos de Sondagem	10
2.2.1 – Sondagem Rotativa Testemunhada Diamantada	11
2.2.2 – Sondagem Rotopercussiva.....	14
2.3 – Fluido de Perfuração	15
2.3.1 – Conceito	15
2.3.2 – Tipos de Fluidos.....	17
2.3.3 – Funções do Fluido De Perfuração.....	18
2.3.4 – Fatores a Serem Considerados/Características Do Fluido De Perfuração	22
2.3.5 – Propriedades do Fluido de Perfuração	23
2.3.5.1 – Determinação das Propriedades do Fluido	26
2.3.6 – Reologia	30
2.3.7 – Tixotropia.....	35
2.3.8 – Polímeros	36
2.3.9 – Bentonita	37
2.3.10 – Principais Problemas na Sondagem	41
2.4 – Perfilagem Geofísica	45
2.4.1 – Método Gama Natural	46
2.4.2 – Método Gama-Gama.....	46
2.4.3 – Campo de Calibração Gama-Gama	47
2.4.4 – Unidade de Perfilagem Geofísica de Campo	49

2.5 – Descrições Geológica e Geotécnica	50
2.5.1 – Descrição Geológica	50
2.5.2 – Descrição Geotécnica	52
Capítulo 3 – Geologia Regional e Local	56
3.1 – Geologia Regional.....	56
3.1.1 – Litoestratigrafia.....	57
3.1.2 – Geologia Estrutural/Tectônica	61
3.2 – Geologia Local	62
3.2.1 – Principais Tipologias Utilizadas na Mina de Brucutu	63
Capítulo 4 – Metodologia Aplicada	67
4.1 – Introdução	67
4.2 – Metodologia	68
4.2.1 – Coleta de Dados e Informações Referentes aos Furos de Sondagem.....	73
4.2.2 – Produtos Utilizados no Fluido de Perfuração	73
Capítulo 5 – Apresentação e Análise dos Resultados	76
5.1 – Dados Históricos da Perfuração em Brucutu.....	76
5.2 – Furos Executados com Aplicação da Metodologia.....	78
5.2.1 – BRUFD00131	78
5.2.2 – BRUFD00158	81
5.2.3 – BRUFD00156	85
5.2.4 – BRUFD00112	87
5.2.5 – BRUFD00097	90
5.3 – Análise dos Dados Referentes à Execução Dos Furos	93
5.3.1 – Monitoramento.....	93
5.3.2 – Taxa de Penetração	103
5.3.3 – Comparação de Custo	106
5.4 – Apresentação dos Dados Referentes à Perfilagem Geofísica	107
5.5 – Apresentação dos Dados Referentes à Avaliação das Rochas Perfuradas.....	108
5.5.1 – Distribuição Granulométrica das Rochas.....	108
5.5.1.1 – BRUFD00131	108

5.5.1.2 – BRUFD00158	109
5.5.2 – Caracterização Química	110
5.5.2.1 – Análise dos Elementos Traços Ca e Mg	110
5.5.2.2 – Correção da Tipologia pela Química	111
5.5.3 – Mineralogia da Rocha	113
5.5.3.1 – BRUFD00131	113
5.5.3.2 – BRUFD00158	118
5.5.4 – Caracterização da Lama Gerada da Própria Amostra	121
5.5.4.1 – Mineralogia da Lama	121
Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130
ANEXOS.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Densidade dos blocos do campo de calibração.....	48
Tabela 2. Litotipos de minérios limpos com nomenclatura padrão Vale.	50
Tabela 3. Litotipos de minérios contaminados com nomenclatura padrão Vale.....	51
Tabela 4. Litotipos de estéries com nomenclatura padrão Vale.	51
Tabela 5. Litotipos de cobertura com nomenclatura padrão Vale.....	52
Tabela 6. Classificação da rocha em relação ao grau de alteração. Baseada em sistema RMR, Bieniawski (1989), adaptada para Vale.	52
Tabela 7. Classificação da rocha em relação ao grau de consistência. Baseada em sistema RMR, Bieniawski (1989), adaptada para Vale.	53
Tabela 8. Classificação da rocha em relação ao fraturamento. Baseada em sistema RMR, Bieniawski (1989), adaptada para Vale.	53
Tabela 9. Classificação da rocha em relação ao índice de designação da qualidade (RQD). Baseada em sistema RMR, Bieniawski (1989), adaptada para Vale.....	55
Tabela 10. Medidas de componentes de perfuração.....	69
Tabela 11. Furos utilizados para coleta de dados.	70
Tabela 12. Produtos utilizados no fluido de perfuração.	74
Tabela 13. Resumo simplificado dos dados dos furos executados em Brucutu nas campanhas de 2011, 2012 e 2013.....	77
Tabela 14. Resumo simplificado da performance de execução dos furos com profundidade superior a 300 m, executados em Brucutu nas campanhas de 2011, 2012 e 2013.	77
Tabela 15. Formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00131.....	79
Tabela 16. Complemento à formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00131.....	79
Tabela 17. Formulação do tampão viscoso para o furo BRUFD00131.....	80
Tabela 18. Formulação do fluido polimérico para o furo BRUFD00131.....	80
Tabela 19. Formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00158.....	82
Tabela 20. Complemento à formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00158.....	83
Tabela 21. Formulação do tampão viscoso para o furo BRUFD00158.....	84

Tabela 22. Formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00156.....	86
Tabela 23. Formulação do fluido polimérico para o furo BRUFD00112.....	89
Tabela 24. Formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00097.....	91
Tabela 25. Resumo simplificado do desempenho dos dados dos furos selecionados para este estudo.....	104
Tabela 26. Quadro comparativo do desempenho dos furos das campanhas anteriores (2011, 2012, 2013) com os furos selecionados para este estudo.	104
Tabela 27. Quadro comparativo do desempenho dos furos executados neste estudo, em relação ao furo de melhor desempenho (BRUFD00112).	105
Tabela 28. Quadro comparativo de simulação de custo da execução de 10.000 m conforme executado nas campanhas anteriores (2011, 2012, 2013) e na metodologia deste estudo.....	107
Tabela 29. Identificação das amostras selecionadas.....	108
Tabela 30. Quadro comparativo da nomenclatura da tipologia definida na classificação visual x análise química.....	112
Tabela 31. Mineralogia obtida da fração lama - resultados semi-quantitativos.	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da Mina de Brucutu em relação aos limites do Quadrilátero Ferrífero, representado pelo polígono com preenchimento em amarelo. Em azul está representada a formação ferrífera segundo Dorr (1969).	7
Figura 2. Localização e via de acesso à Mina de Brucutu, partindo de Belo Horizonte.	7
Figura 3. Sondagem rotativa diamantada testemunhada. Sonda mecânica MAQ 1200 - Maquesonda (A), sonda hidráulica CS 14 - Atlas Copco (B), testemunho de sondagem (C).....	11
Figura 4. Sondagem rotopercussiva. Equipamento de sondagem 750 da Foremost (A), e E-100 da Explorac (B). Amostra em campo (C) e amostra de Chip (D).	11
Figura 5. Detalhes de uma praça de sondagem (A e B). Equipamento de sondagem CS 14 da Atlas Copco (C). Coroa de saída frontal (D e E). Testemunho de sondagem (F).	12
Figura 6. Barrilete wire line montado e explodido. Modificado de http://www.atlascopco.com/usus/products/drilling-tools/1528804	13
Figura 7. Equipamento de sondagem rotopercussiva Explorac 100 (A). Martelo de fundo (B e C). Hastes de paredes duplas (D). Amostrador rotaport (E). Amostras de chip (F).	14
Figura 8. Sistema de circulação de fluidos para sondagem rotativa diamantada. Preparação do fluido (A). Etapas de circulação do fluido (B). Retorno do fluido (C).	16
Figura 9. Etapas do sistema de circulação de fluido. Preparação do fluido (A). Etapas de circulação do fluido (B). Retorno do fluido (C).	16
Figura 10. Janela Operacional – Desenho esquemático das pressões presentes na execução de um furo de sondagem. Ø P, Ø H e Ø N são diâmetros diferentes e decrescentes de um furo de sondagem telescópado.	20
Figura 11. Controle de pressões de subsuperfície. Fonte: Pereira, 2004.	21
Figura 12. Balança de Densidade. Modificado de 2010, OFI Testing Equipment, Inc.	26
Figura 13. Funil Marsh. Modificado de 2010, OFI Testing Equipment, Inc.	27
Figura 14. Viscosímetro FAN. Modificado de 2010, OFI Testing Equipment, Inc.	27
Figura 15. Medidor de pH.	28
Figura 16. Filtro Prensa API. Modificado de 2010, OFI Testing Equipment, Inc.	29
Figura 17. Kit teor de areia. Modificado de 2010, OFI Testing Equipment, Inc.	29
Figura 18. Determinação do reboco em papel filtro.	30
Figura 19. Curva da viscosidade e fluxo para fluido newtoniano e não newtoniano. Fonte Diaz (2002) apud Melo, K. C. (2008).	32
Figura 20. Curvas de fluxo características dos modelos matemáticos.	33

Figura 21. Representação do inchamento entre montmorilonita de cálcio e sódio.	39
Figura 22. Representação das diferenças entre lama ineficiente e lama eficiente. Fonte: Geosol.	41
Figura 23. Esquema simplificado mostrando causas de problemas relacionados a trancamento – tratativa mecânica.	43
Figura 24. Esquema simplificado da prisão diferencial da coluna de perfuração – tratativa química. Modificado de Pereira (2003 a).	43
Figura 25. Esquema simplificado mostrando causas de problemas relacionados à prisão diferencial – tratativa química.	44
Figura 26. Resumo simplificado do pistoneamento mecânico ou efeito seringa – tratativa química.	44
Figura 27. Campo de calibração Gama-Gama com certificação do IPT - Vale.	48
Figura 28. Perfilagem geofísica em campo (A). UPG - Unidade de perfilagem geofísica (B). Detalhe da ferramenta gama-gama (C). Preparação da sonda (D).	49
Figura 29. Desenho esquemático RQD. Baseada em sistema RMR, Bieniawski (1989), adaptada para Vale.	54
Figura 30. Mapa geológico regional do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de Lobato et al. 2005. A área utilizada neste estudo, Brucutu, está indicada. Em detalhe o Mapa do Brasil, destacando o estado de MG.	56
Figura 31. Coluna estratigráfica generalizada do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de Alkmin e Marshak (1998).	57
Figura 32. Mapa geológico detalhado e estrutural da área do Sinclinal Gandarela. Modificado de Lobato et al. (2005).	62
Figura 33. Localização dos furos de sondagem utilizados no estudo.	70
Figura 34. Resumo simplificado da metodologia aplicada – execução dos furos.	71
Figura 35. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 91,00 m a 96,00 m - BRUFD00131.	95
Figura 36. Perfil composto geofísica + taxa penetração – zoom no intervalo de 100,00 m a 130,00 m - BRUFD00156.	96
Figura 37. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 30,00 m a 56,00 m - BRUFD00097.	97
Figura 38. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 140,00 m a 170,00 m - BRUFD00131.	98
Figura 39. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 155,00 m a 185,00 m - BRUFD00158.	99

Figura 40. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 185,00 m a 206,00 m - BRUFD00112.	100
Figura 41. Perfil composto geofísica + taxa penetração – zoom no intervalo de 190,00 m a 220,00 m - BRUFD00156.	100
Figura 42. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 50,00 m a 80,00 m - BRUFD00158.	101
Figura 43. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 65,00 m a 110,00 m - BRUFD00158.	102
Figura 44. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 90,00 m a 120,00 m - BRUFD00131.	103
Figura 45. Gráficos de distribuição granulométrica das amostras coletadas no furo BRUFD00131.	109
Figura 46. Gráficos de distribuição granulométrica das amostras coletadas no furo BRUFD00158.	110
Figura 47. Gráfico de dispersão Ferro x Cálcio + Magnésio.	111
Figura 48. Fotomicrografia BRUFD 00131 – (96,05 m – 106,50 m) - Visão geral da amostra e detalhamento, ocorrendo substituição da muscovita pelos hidróxidos de ferro.	114
Figura 49. Fotomicrografia BRUFD 00131 – (106,50 m – 112,65 m) - Visão geral da amostra e detalhamento, mostrando a ocorrência de óxidos de manganês, minerais de ferro e minerais micáceos.	115
Figura 50. Fotomicrografia BRUFD 00131 – (112,65 m – 119,55 m) - Visão geral da amostra e detalhamento, mostrando pseudomorfo de provável anfibólio, dentre outros.	116
Figura 51. Fotomicrografia BRUFD 00131 – (153,70 m – 161,10 m) - Visão geral da amostra e detalhamento da caolinita. Observa-se a bimodalidade dos cristais de quartzo e goethita.	116
Figura 52. Fotomicrografia BRUFD 00131 – (224,00 m – 232,20 m) - Visão geral da amostra e detalhamento mostrando a bimodalidade dos cristais de goethita e quartzo.	117
Figura 53. Fotomicrografia BRUFD 00158 – (159,40 m – 179,55 m) - Visão geral da amostra e detalhamento de porfiroclastos de magnetita e sua alteração.	118
Figura 54. Fotomicrografia BRUFD 00158 – (179,55 m – 250,75 m) - Visão geral da amostra e detalhamento de minerais e poros parcialmente preenchidos.	119
Figura 55. Fotomicrografia BRUFD 00158 – (250,75 m – 271,80 m) - Visão geral da amostra, apresentando a laminação presente e o detalhamento da goethização.	120
Figura 56. Fotomicrografia BRUFD 00158 – (320,95 m – 326,85 m) - Visão geral da amostra e o detalhamento de provável anfibólio pseudomorfizado.	121

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – APRESENTAÇÃO

- *CONSIDERAÇÕES INICIAIS*

Na pesquisa geológica de minério de ferro, a sondagem ocorre desde os trabalhos iniciais de pesquisa, passando pelas etapas de avaliação, controle de produção, e permeando por toda a vida da mina até sua exaustão e fechamento.

A sondagem testemunhada é amplamente utilizada para minério de ferro no Brasil, pois é capaz de levantar informações completas da estrutura geológica e textura da rocha perfurada, e tem como produto uma amostra íntegra denominada testemunho, que pode ser analisada em relação a suas características físicas, químicas e mecânicas.

Entretanto, apesar das vantagens de se utilizar este método, devemos considerar suas limitações e dificuldades. Não é simples recuperar um testemunho íntegro em terrenos com rochas muito fraturadas ou abrasivas, sem elevar o custo. Nos materiais friáveis, a recuperação também é complicada e pode causar erros sistemáticos de amostragem, apesar da utilização de diferentes tipos de barriletes. Além disso, a sua execução é quase sempre lenta.

Porém é facilmente perceptível que estas limitações podem ser minimizadas e o desempenho da sondagem ampliado com algumas ações. Dentre elas, destacam-se:

- ✓ o monitoramento contínuo dos parâmetros de perfuração para operar o equipamento com base nestes;

✓ utilização de um fluido com formulação compatível com o sistema a ser perfurado, e a garantia da manutenção de suas propriedades durante a execução.

Na sondagem de minério de ferro, observa-se a execução da perfuração sem a leitura de alguns parâmetros de perfuração e, mesmo nas sondas mais modernas, sem a presença de sensores para medição contínua destes parâmetros e seu monitoramento. A avaliação destes dados é essencial para a detecção de possíveis anomalias, eliminação de problemas operacionais como prisão de ferramental, ou mesmo para possibilitar um melhor planejamento da execução de novos furos. Assim a operação de certa forma, ocorre embasada na experiência e percepção do operador do equipamento.

Já o fluido de perfuração tem importância tão grande nas atividades de sondagem, que o seguinte jargão foi consolidado na Indústria do Petróleo:

“Um poço é perfurado com aço e fluido”

Esta importância aumenta à medida que os furos ficam mais profundos. Portanto, o fluido de perfuração deve ser especificado de forma a garantir uma perfuração eficiente, rápida, segura e com custo compatível com a operação.

- *CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA/ESTUDO DE CASO*

No Brasil, no processo de perfuração do minério de ferro, o retorno de fluido durante a circulação é baixo.

Segundo Ferraz (1977), o excesso de perdas de fluido leva a danos sofridos pela formação e a erros de avaliação. A espessura elevada do reboco é a grande responsável pela maior parte desses problemas.

Vários outros fatores contribuem para este fato, tais como o grau de fraturamento da rocha, limitações de custo e poucos estudos em busca de um fluido ótimo voltado para perfuração de minério de ferro.

Talvez pelas dificuldades descritas acima, na prática, em sondagem de minério de ferro, o fluido de perfuração não é utilizado conforme orientações do fabricante, por limitação de custo ou pelas condições da rocha.

Como o retorno de fluido durante a circulação é baixo, a composição do fluido é quase sempre básica, pois é visto mais como um custo do que como um item imprescindível para o aumento de produtividade.

Por outro lado, um fluido eficaz contribui para uma limpeza eficiente do furo, controlando ou eliminando prisão de ferramental dentro do furo, prisão diferencial, além de evitar invasões excessivas de filtrado nas formações geológicas, desmoronamento de formações, redução do diâmetro dos furos, e conseqüentemente, desgaste e quebra do equipamento, além do desgaste de coroa. Obtêm-se ainda melhorias na recuperação do testemunho.

As dificuldades encontradas ao se perfurar principalmente material friável, nos levam a buscar uma metodologia de trabalho que reduza os problemas operacionais, aumentando a produtividade, com qualidade, segurança e redução de custo.

Em paralelo, para suportar o plano de expansão da Vale, o setor de pesquisa mineral precisa atender a demandas cada vez maiores e fornecer informações cada vez mais criteriosas.

Para atender a tais demandas, a Vale tem atuado pautando-se nas seguintes ações:

- Estímulo à concorrência entre empresas de sondagem;
- Captação de equipamentos modernos/melhor performance;
- Capacitação profissional;
- Desenvolvimento de sondas automatizadas;
- Estudo sondas mecânicas x hidráulicas.

O problema é complexo e demanda desenvolvimento/aperfeiçoamento técnico. Este estudo configura-se como uma importante ação complementar às ações então desenvolvidas pela Vale.

Este estudo, de natureza aplicada, pretende ser uma contribuição a este tema, estabelecendo uma metodologia que, dentre outros, identifique as principais variáveis da lama química e sua influência no processo de sondagem de minério de ferro, aliado ao monitoramento dos parâmetros de perfuração, em busca do aumento da eficiência do processo de sondagem, além de melhorias na recuperação e qualidade do testemunho. Pretende ainda contribuir com o desenvolvimento tecnológico na indústria da sondagem.

1.2 –JUSTIFICATIVO DO ESTUDO

Este estudo justifica-se pela necessidade cada vez maior de se explorar corpos mais profundos com demandas cada vez maiores, sendo o fluido de perfuração e o monitoramento dos parâmetros de perfuração de fundamental importância para o sucesso da perfuração, tendo em vista a redução de custos, aumento de produtividade, redução de problemas operacionais, aumento da vida útil de equipamentos e a obtenção de um testemunho íntegro e de qualidade.

Desta forma, este estudo é plenamente justificável.

1.3 –OBJETIVOS

Tem como objetivo estabelecer, através deste estudo de caso, uma metodologia que melhore o desempenho da sondagem, além de demonstrar a influência do fluido e do monitoramento dos parâmetros de perfuração na execução da sondagem de minério de ferro. Pretende melhorar a performance do fluido, atingindo uma formulação compatível com as litologias e profundidades perfuradas, reduzindo os efeitos do fraturamento da rocha com selagem total ou parcial das paredes do furo. Pretende também demonstrar a importância do monitoramento dos parâmetros de perfuração e das propriedades do fluido na eficiência do processo de sondagem.

Como consequência, espera-se:

- Aumentar a produtividade;
- Reduzir custo;
- Reduzir tempo de exposição dos colaboradores ao risco;
- Obter um produto íntegro e de qualidade (testemunho);
- Menor desgaste e quebra dos equipamentos;
- Contribuir para o desenvolvimento do processo de sondagem;
- Demonstrar a importância do monitoramento dos parâmetros de perfuração;
- Disponibilizar as melhores práticas de controle de fluido de perfuração;
- Direcionar a atuação das empresas para a utilização de um fluido controlado;
- Ampliar o conhecimento sobre o fluido de perfuração, buscando uma maior eficiência no processo de sondagem.

1.4 –METODOLOGIA DE TRABALHO

Para este estudo de caso foram executados cinco furos na Mina de Brucutu, com variação do diâmetro no mesmo furo, produzindo o efeito de telescopagem, bem como executando o monitoramento e controle do fluido e dos parâmetros de perfuração dos mesmos.

Na escolha dos furos, optou-se por trabalhar com furos que atravessam a mesma sequência estratigráfica dentro da Formação Ferrífera de Brucutu, com o objetivo de “fixar” a litologia. Outro fator considerado foi a fixação do equipamento e das equipes para reduzir as influências externas.

Os furos executados foram monitorados e os resultados comparados. Além da formulação do fluido, foram considerados na avaliação e comparação os seguintes dados:

- problemas operacionais encontrados e alteração nos parâmetros de perfuração, além de relato de sondadores;

- perfilagem geofísica executada nos furos utilizando os métodos gama-gama e gama natural, além do caliper. A correlação com a densidade promove uma melhor fixação dos contatos, garantindo a confiabilidade dos dados. O perfil de densidade e as medidas do caliper, que mostra as alterações no diâmetro do furo, contribuíram também na interpretação dos problemas operacionais ocorridos;
- descrições geológicas dos furos, com características de cada litologia;
- descrições geotécnicas, com os parâmetros para classificação do maciço rochoso.

Além disso, procurou-se fazer uma avaliação dos efeitos da metodologia aplicada com foco na produtividade e no custo, utilizando-se um fluido de perfuração adequado, com monitoramento dos parâmetros.

Durante a avaliação dos furos, foram coletadas algumas amostras do material perfurado das regiões onde houve perda frequente de lama, e estas foram submetidas às seguintes análises:

- Caracterização química, buscando identificar óxidos e traços (cálcio, magnésio, etc);
- Peneiramento a úmido para avaliar a geração de lama da própria amostra;
- Confecção e análise de seções polidas, feitas com as porções restantes, para identificação de argilominerais;
- Caracterização da lama produzida por Difractometria de Raio X;

Este estudo foi realizado na Mina de Brucutu da Mineradora Vale S.A, localizada no Quadrilátero Ferrífero, que possui características marcantes, tanto em relação aos seus aspectos geológico-estruturais, como em relação a qualidades de seus minérios e aspectos geotécnicos.

1.5 –LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A mina de Brucutu está localizada na parte central do estado de Minas Gerais, região nordeste do Quadrilátero Ferrífero, próximo à cidade de São Gonçalo do Rio Abaixo (Figura 1).

Fica a aproximadamente 120 km a leste de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, e a 17 km de Barão de Cocais (Figura 2).

O acesso principal se dá a partir de Belo Horizonte, através da Rodovia BR -381, no sentido Vitória, até o entroncamento com a MG - 436, por onde se percorre mais 13 km, seguindo na direção sul por aproximadamente 10 Km até a entrada da mina.

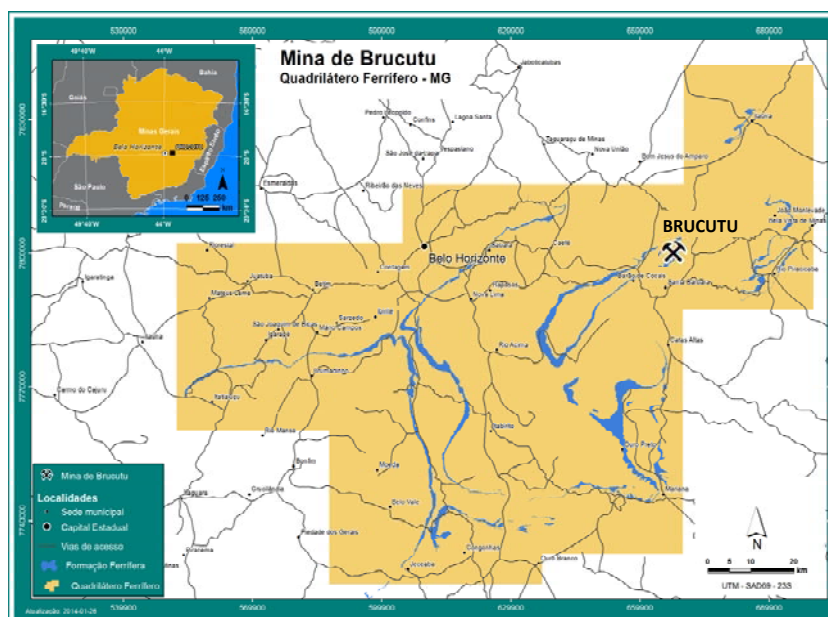


Figura 1 - Localização da Mina de Brucutu em relação aos limites do Quadrilátero Ferrífero, representado pelo polígono com preenchimento em amarelo. Em azul está representada a formação ferrífera segundo Dorr (1969).

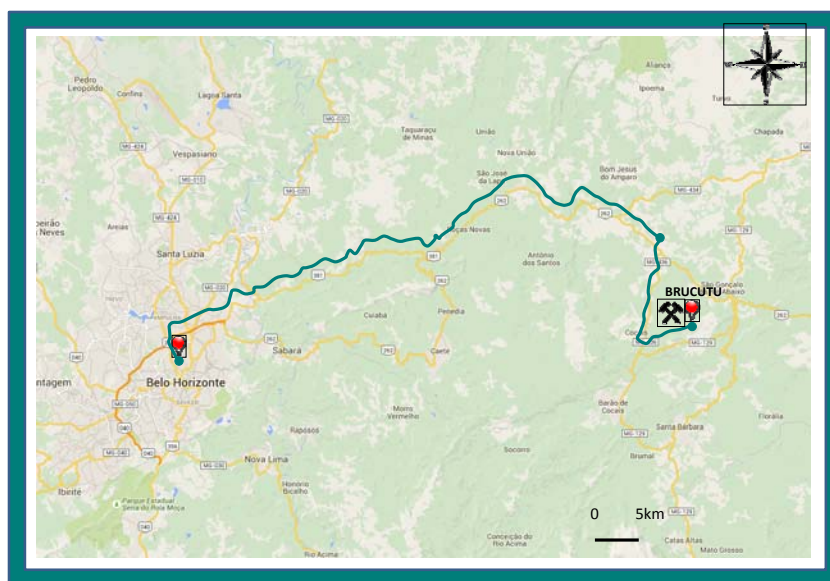


Figura 2 - Localização e via de acesso à Mina de Brucutu, partindo de Belo Horizonte.

1.6 –ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

- *Capítulo I:* apresenta uma introdução ao tema, descreve a proposta e a motivação para realização deste trabalho, caracteriza o problema e justifica este estudo de caso. Além disso, apresenta os objetivos previstos, define e apresenta os locais do estudo, bem como descreve a estrutura deste trabalho.

- *Capítulo II:* descreve os métodos de sondagem rotativa diamantada testemunhada e sondagem rotopercussiva. Apresenta uma revisão bibliográfica sobre o fluido de perfuração, definindo o conceito e tipos de fluido, suas funções, características e propriedades. Além disso, conceitua e apresenta os fundamentos teóricos sobre reologia, tixotropia, polímeros e bentonita, bem como relata os principais problemas na sondagem. Também descreve os fundamentos da perfilagem geofísica gama-gama, e apresenta os procedimentos utilizados nas descrições geológicas e geotécnicas.

- *Capítulo III:* apresenta a descrição da Geologia Regional do Quadrilátero Ferrífero, detalhando suas unidades litoestratigráficas. Apresenta um resumo dos principais estudos e teorias desenvolvidos com o intuito de explicar a evolução estrutural e tectônica do QF. Aborda também a descrição da Geologia Local, com foco no Sinclinal Gandarela, e mais especificamente, na Mina de Brucutu, área utilizada para estudo. Apresenta ainda a descrição das principais tipologias utilizadas na Mina de Brucutu.

- *Capítulo IV:* detalha a metodologia aplicada, bem como a coleta de dados e informações referentes aos furos de sondagem.

- *Capítulo V:* apresenta e promove uma análise dos dados coletados em sua aplicação, o que compreende a execução dos furos utilizados, com acompanhamento do fluido de perfuração e monitoramento de suas propriedades, além do monitoramento dos parâmetros de perfuração. Utiliza os dados de perfilagem geofísica para auxiliar na interpretação dos problemas operacionais ocorridos, e para melhor fixar os contatos,

além das medidas das alterações de diâmetro do furo, evidenciando os desmoronamentos. Relata também as descrições geológicas e geotécnicas dos furos; Apresenta uma análise do custo com base no aumento da produtividade.

Adicionalmente, com o objetivo de investigar as possíveis interferências positivas e negativas das litologias perfuradas, apresenta os dados das amostras coletadas nos horizontes onde houve perda frequente de fluido. Nestas amostras foram executadas a caracterização química, avaliação de geração de lama da própria amostra e sua caracterização, o estudo mineralógico, além da avaliação da distribuição granulométrica das rochas.

- Capítulo VI: apresenta as conclusões deste estudo, além de sugestões ligadas a trabalhos futuros.

- Capítulo VI: apresenta as referências bibliográficas utilizadas neste estudo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITOS APLICADOS

2.1 – INTRODUÇÃO

A sondagem é bastante utilizada em vários segmentos, e podemos destacar o seu uso na mineração, na indústria do petróleo e na construção civil.

A sondagem na mineração de ferrosos ainda tem um longo caminho a percorrer para atingir um nível de evolução como já se tem na indústria do petróleo. Na indústria petrolífera, a utilização de tecnologia de ponta e processos automatizados, a mão de obra especializada e monitoramento contínuo dos parâmetros de perfuração, o acompanhamento sistemático da composição e manutenção das propriedades do fluido de perfuração, além da utilização de ferramentas geofísicas, dentre outras, confirmam um grau de evolução diferenciado e serve como referência e inspiração para a evolução da sondagem no ramo da mineração.

2.2 – MÉTODOS DE SONDAGEM

Na Vale S/A, para execução de sondagem de ferrosos, utiliza-se em grande escala o método de sondagem rotativa testemunhada diamantada (Figura 3). Nos últimos tempos, tem sido crescente a utilização da sondagem rotopercussiva em circulação reversa (Figura 4).

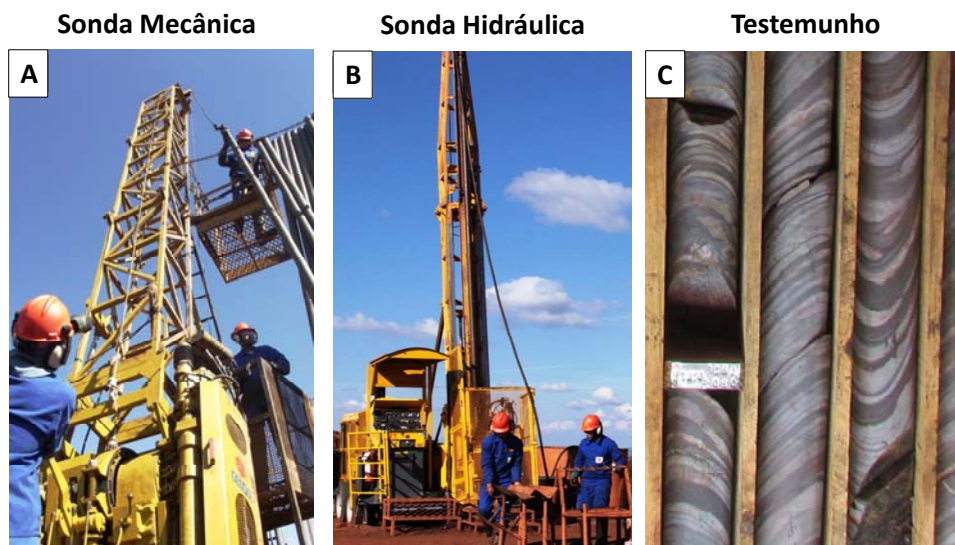


Figura 3 - Sondagem rotativa diamantada testemunhada. Sonda mecânica MAQ 1200 - Maquesonda (A), sonda hidráulica CS 14 - Atlas Copco (B), testemunho de sondagem (C).



Figura 4 - Sondagem rotopercussiva. Equipamento de sondagem 750 da Foremost (A), e E-100 da Explorac (B). Amostra em campo (C) e amostra de Chip (D).

2.2.1 – SONDAGEM ROTATIVA TESTEMUNHADA DIAMANTADA

Na sondagem rotativa testemunhada diamantada, as rochas perfuradas são cortadas segundo uma seção circular, pelo movimento de rotação de um elemento cortante, em geral uma coroa cravejada de diamantes sintéticos de alta qualidade, de forma anelar. A sonda emite forças à coluna de perfuração que tem a coroa em sua extremidade, fazendo com que todo o ferramental gire em alta velocidade e supere a resistência da rocha. O

material perfurado fica retido em um tubo interno do barrilete, e é retirado periodicamente dos furos. Desta forma são recuperadas amostras íntegras em forma cilíndrica das formações atravessadas, que constituem os testemunhos de sondagem (Figura 5).

Os furos podem ser verticais ou inclinados, em diversos diâmetros e com alta variação de profundidade. Os detritos produzidos, seja pelo corte do testemunho ou provenientes da parede do furo, são levados até a superfície através do fluido de perfuração ou lama química, que circula sob pressão no interior do furo.

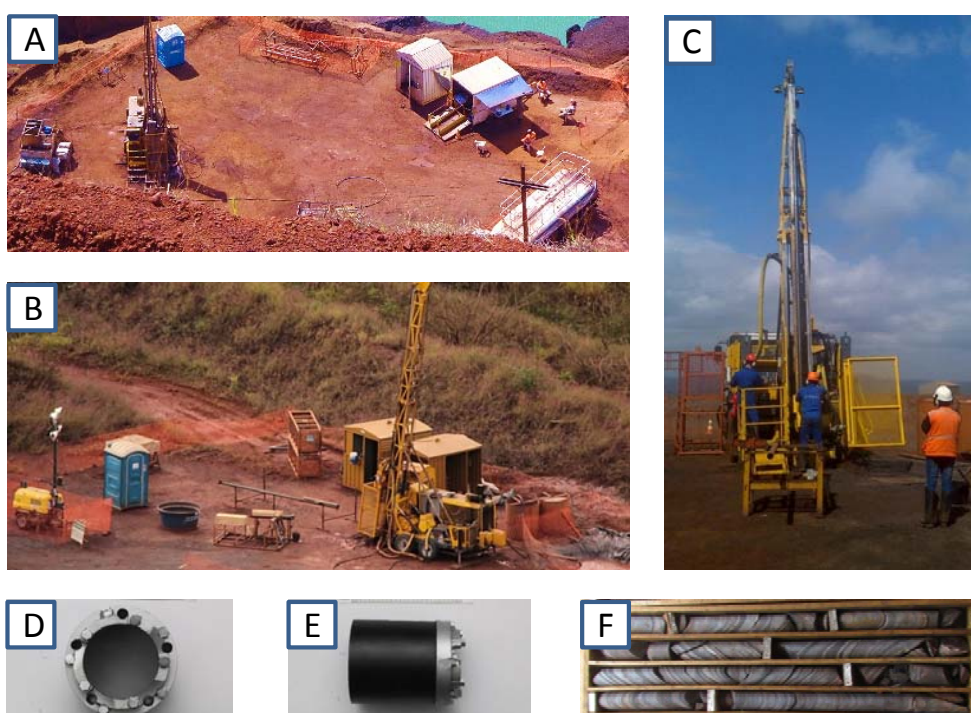


Figura 5 - Detalhes de uma praça de sondagem (A e B). Equipamento de sondagem CS 14 da Atlas Copco (C). Coroa de saída frontal (D e E). Testemunho de sondagem (F).

A sondagem rotativa testemunhada diamantada pode ser do tipo Convencional ou *WireLine*. No sistema Convencional, pouco utilizado nos dias de hoje, cada vez que se conclui uma manobra, ou seja, o corte de um segmento de rocha, toda a assembleia de perfuração é trazida à superfície para coleta do testemunho, recolhendo as sucessivas hastes.

No sistema *WireLine*, após cada manobra, somente o tubo interno do barrilete que aloja o testemunho, denominado “camisa” é trazido até a superfície, através do *over shot*, que é fixado por um cabo de aço ligado ao guincho da sonda.

Devido à utilização do barrilete de tubo retrátil, não há necessidade de remover toda a assembleia de perfuração do furo. A camisa é içada internamente às hastes. O barrilete de tubo retrátil consiste de um tubo externo cujo cabeçote é atarraxado a uma coluna de hastes especiais com diâmetro interno maior. Esse tubo externo tem na extremidade inferior um calibrador e uma coroa de diamantes. No interior tem-se um tubo interno retrátil com uma mola de retenção de testemunho na extremidade inferior e, na parte superior, uma cabeça giratória com rolamentos, assim como o *over shot*, que é um sistema de travas e de lançadeira com o respectivo pegador (Figura 6).

O sistema *WireLine* é o mais utilizado na sondagem de minério de ferro, pois é mais produtivo, mais barato, mais seguro, mais rápido, além de apresentar menor desmoronamento das paredes e menor bloqueamento do testemunho, maior vida útil das coroas, menor desgaste físico do operador, e conseqüentemente, menor custo de perfuração por metro e maior eficiência.

BARRILETE WIRE LINE MONTADO E EXPLODIDO

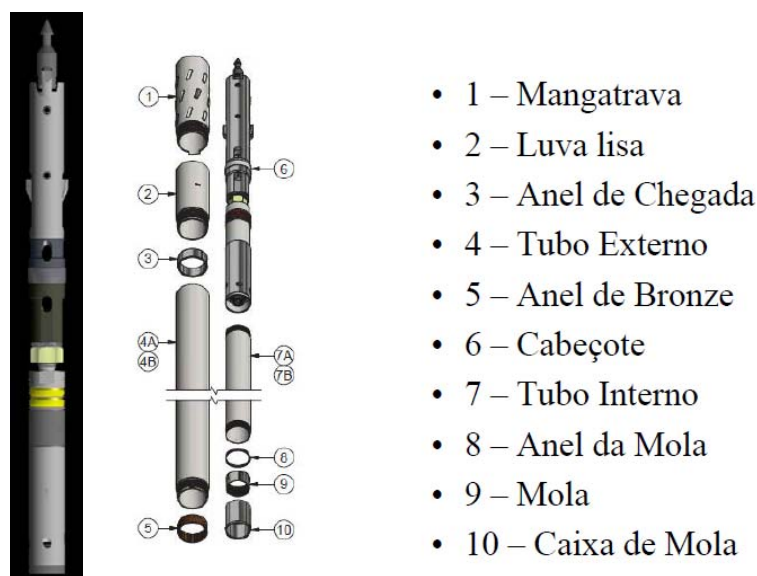


Figura 6 - Barrilete wireline montado e explodido. Modificado de <http://www.atlascopco.com/usus/products/drilling-tools/1528804>

2.2.2 – SONDAGEM ROTOPERCUSSIVA

A sondagem rotoperfussiva em circulação reversa não preserva a amostra, pois a perfuração se dá por meio do avanço de uma broca tricônica (Button bit) para rochas friáveis, ou martelo de fundo para rochas duras (Figura 7).

A perfuração com martelo de fundo se dá com a utilização de um compressor de alta pressão. A pressão do ar injetado entre as hastes interna e externa aciona o martelo para proporcionar a frequência de batidas em cima do bit que, com o impacto, tira lascas da rocha.

A reversão de ar na face da peça de corte é que promove a entrada dos fragmentos por dentro do bit, retornando pelo interior da haste interna até a superfície, em um sistema que acumula sequencialmente, por meio de um ciclone, os fragmentos de rocha correspondentes ao intervalo fraturado, gerando uma amostragem contínua no momento da perfuração. As amostras são separadas e acondicionadas em sacos plásticos para análise.



Figura 7 - Equipamento de sondagem rotoperfussiva Explorac 100 (A). Martelo de fundo (B e C). Hastes de paredes duplas (D). Amostrador rotaport (E). Amostras de chip (F).

2.3– FLUIDO DE PERFURAÇÃO

2.3.1 –CONCEITO

O Fluido de Perfuração ou Lama Química é o fluido de circulação usado em perfurações rotativas para desempenhar algumas funções durante a perfuração, sendo um componente indispensável na perfuração de poços (Lummus e Azar, 1986).

Thomas *et al.* (2001) consideram os fluidos de perfuração como misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e por vezes até gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensões, dispersões coloidais ou emulsões, dependendo do estado físico dos componentes.

Do ponto de vista físico, os fluidos de perfuração assumem comportamentos de fluidos não-newtonianos, ou seja, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação não é constante (Machado, 2002).

O fluido de perfuração é como o sangue: flui, transporta, cicatriza, transmite força, estabiliza as pressões internas, enfim, perpassa todas as etapas da sondagem como se fosse a extensão viva do ato de perfurar (Pereira, 2003).

As figuras 8 e 9 mostram o sistema de circulação de fluidos para sondagem rotativa diamantada e suas etapas.

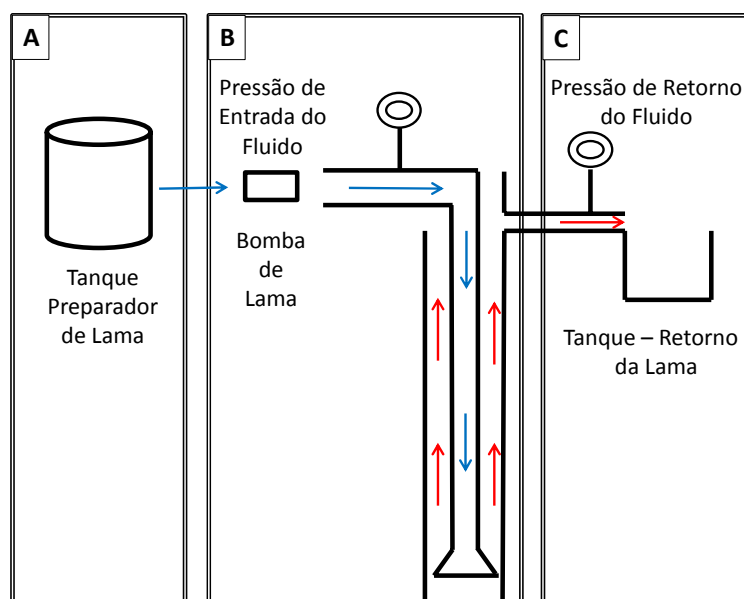


Figura 8 - Sistema de circulação de fluidos para sondagem rotativa diamantada. Preparação do fluido (A). Etapas de circulação do fluido (B). Retorno do fluido (C).

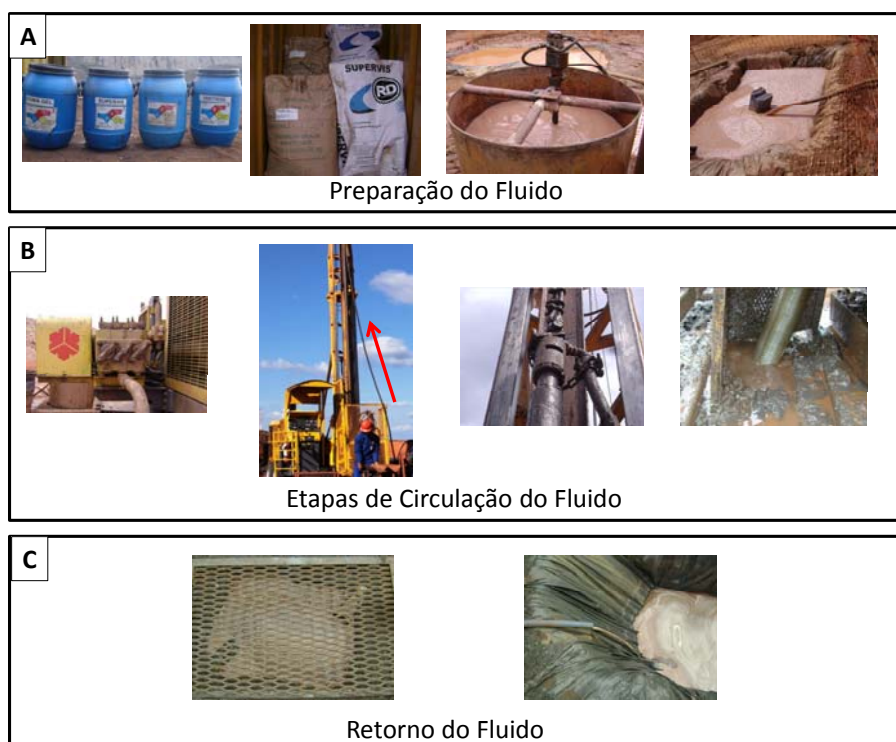


Figura 9 - Etapas do sistema de circulação de fluido. Preparação do fluido (A). Etapas de circulação do fluido (B). Retorno do fluido (C).

2.3.2–TIPOS DE FLUIDOS

A água foi o primeiro fluido a ser utilizado como fluido de perfuração, mas rapidamente observou-se a necessidade de um fluido com características específicas para determinadas situações, e alguns insumos foram incorporados.

Ainda assim, por apresentar limitações relacionadas à elevada pressão hidrostática exercida em perfurações bastante profundas, outros tipos de fluidos foram desenvolvidos.

Os fluidos podem, basicamente, ser classificados em três grandes grupos, de acordo com o seu constituinte principal, ou fase predominante, também chamada de contínua. Desta forma, temos os fluidos à base de água, óleo ou gás. Em todos eles são incorporados outros elementos sólidos e líquidos que fornecem a lama características adequadas.

Fluido a Base de Água

São aqueles cuja fase líquida contínua é constituída por água. São utilizados na maioria das operações de perfuração em todo o mundo, incluindo a sondagem rotativa diamantada para minério de ferro. São fluidos mais baratos e simples, que atendem perfeitamente a necessidade das mineradoras de minério de ferro, desde que sejam incorporados os aditivos necessários para cada situação.

- Fluido a Base de Óleo

São aqueles cuja fase líquida contínua é constituída por óleo, contendo água em pequena quantidade, na forma de emulsão. São utilizados em situações especiais, como altas temperaturas e pressões, formações geológicas hidratáveis, elevadas profundidades e em formações geológicas salinas (Burke e Veil, 1995).

Segundo Darley *et al.* (1988), algumas das principais vantagens dos fluidos de base oleosa, quando comparados aos de base aquosa, são a maior estabilidade térmica e

estrutural (para poços profundos e horizontais), a melhor capacidade de lubrificação e de resfriamento da broca e da coluna, e a menor taxa de corrosão dos equipamentos.

Como desvantagens, podemos destacar maior custo de aquisição, maiores problemas ambientais (elevada toxicidade) e um maior custo de tratamento e processamento dos resíduos gerados.

Os fluidos a base de óleo contém quantidade de água inferior a 5%. Quando a quantidade de água é maior, podendo atingir até 50%, constituem as emulsões inversas (Lummus & Azar, 1986).

- Fluido a Base de Ar ou Gás

É constituído por um fluxo de ar ou gás natural injetado no poço a alta velocidade. O componente a ser injetado pode ser ar seco ou gás, o fluido composto de agente espumante e ar, e espuma a base de surfactante ou fluidos aerados.

2.3.3 – FUNÇÕES DO FLUIDO DE PERFURAÇÃO

O fluido, durante o processo de perfuração de sondagem rotativa diamantada, tem como principais funções:

- Limpar o furo, transportando os detritos de perfuração para a superfície.

O fluido é bombeado por dentro da coluna de perfuração, indo até a parte cortante, onde sai em jatos pelos orifícios da coroa e retorna até a superfície pelo espaço anelar, situado entre a coluna de perfuração e as paredes do poço, carregando os fragmentos gerados. Desta forma, evita-se a prisão de ferramental e diminui os esforços da coroa.

A força gel faz com que, em condições de repouso do fluido, os recortes ou detritos permanecem em suspensão na coluna de fluido, evitando assim a decantação destes no fundo do poço. Deve também garantir a sedimentação dos sólidos após chegar à superfície.

- Lubrificar e resfriar o sistema de perfuração

O fluido tem a função de resfriar e lubrificar a parte cortante, pois quando a coroa gira em contato com a rocha, ocorre alta geração de atrito e conseqüente aquecimento que, se não controlados, aceleram o desgaste e reduzem a eficiência da coroa. A lubrificação e o resfriamento reduzem o desgaste e estendem a vida útil da coroa, além de garantir sua eficiência.

Além disso, o contato de toda a coluna de perfuração com a parede do furo gera atrito e faz com que esta seja constantemente submetida a grandes esforços como torção, que provocam sérios desgastes.

Este problema é minimizado com a lubrificação e o resfriamento fornecido pelo fluido. Quanto mais inclinado o furo maior o atrito e maior a importância desta função do fluido.

- Conter os fluidos existentes na formação

As pressões no interior do furo devem ser controladas pelo fluido. Este deve ser projetado para promover o equilíbrio, já que a pressão do fluido de perfuração contra as paredes do poço deve ser suficiente para anular a pressão exercida pelas formações rochosas (Figura 10).

Uma pressão hidrostática do fluido muito maior que a necessária pode provocar o fraturamento das paredes, permitindo a fuga do fluido e colocando em risco a estabilidade do mesmo.

Uma pressão hidrostática do fluido muito menor que a necessária pode provocar o colapso do furo.

JANELA OPERACIONAL

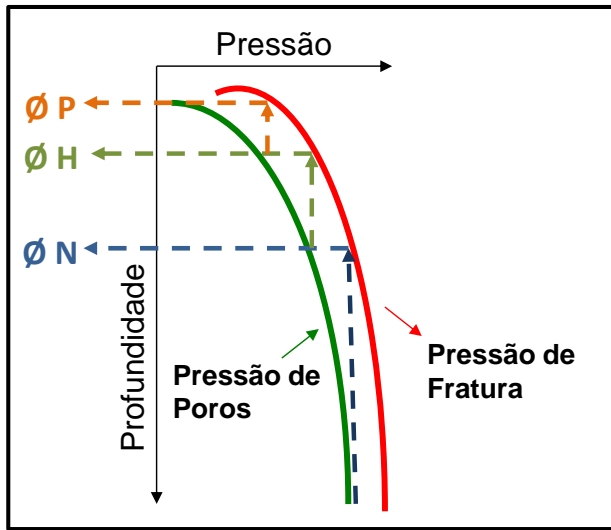


Figura 10 - Janela Operacional – Desenho esquemático das pressões presentes na execução de um furo de sondagem. Ø P, Ø H e Ø N são diâmetros diferentes e decrescentes de um furo de sondagem telescópado.

Segundo Pereira (2004), o equilíbrio de pressões em um furo de sondagem pode ser visto da seguinte forma (Figura 11):

P_h = pressão hidrostática do furo.

P_f = pressão da formação.

Se $P_h = P_f \Rightarrow$ equilíbrio desejável, porém perigoso.

Se $P_h < P_f \Rightarrow$ podem ocorrer invasões de fluidos (“kick”), desmoronamentos, estreitamentos do furo.

Se $P_h > P_f \Rightarrow$ situação normal para estabilização do furo; o filtrado invade a formação e forma o reboco.

Se $P_h \gg P_f \Rightarrow$ danos à formação pelo excesso de pressão do fluido; podem ocorrer fraturamento da formação e fugas de fluido com perdas de circulação.

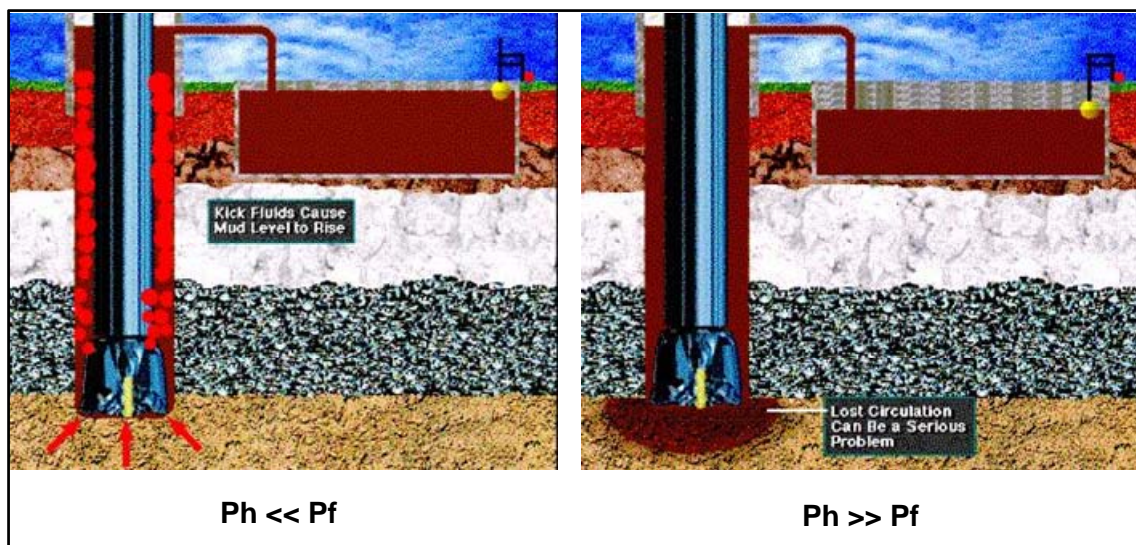


Figura 11 - Controle de pressões de subsuperfície. Fonte: Pereira, 2004.

- Selar e estabilizar as paredes do furo, do ponto de vista químico e mecânico.

O filtrado é a parte do fluido que penetra nos poros e fraturas da formação, quando o fluido exerce pressão nas paredes do furo. As partículas sólidas presentes no filtrado se depositam, formando um filme de baixa permeabilidade, chamado “reboco” (*Filtercake* ou *mudcake*).

O reboco estabiliza as paredes do furo e reduz a absorção de fluido pelas formações, impermeabilizando as paredes do furo.

- Obter a máxima informação de recuperação

O fluido de perfuração é fundamental para alcançar uma ótima recuperação dos testemunhos perfurados e, para sondagem rotativa testemunhada diamantada, deve permitir a obtenção de um testemunho íntegro e sem contaminação, evitando a destruição do testemunho.

2.3.4 – FATORES A SEREM CONSIDERADOS/CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO DE PERFURAÇÃO

Além de atender a todas as funções já descritas, o fluido de perfuração deve ser estável quimicamente, ser inerte em relação às formações rochosas, facilitar as interpretações geológicas do furo, ser facilmente separável dos detritos na superfície e ser ambientalmente amigável. Deve ainda apresentar baixo custo de operação. Isso tudo sem comprometer a formação ou causar grandes perturbações no espaço anelar do furo.

Para obter um fluido que atenda a todas essas necessidades, devemos considerar alguns fatores que afetam o fluido de perfuração durante uma operação.

Propriedades físicas e químicas do fluido devem ser controladas. Proporções ideais de insumos para garantir padrões ideais de viscosidade, consistência de gel, controle de filtrado, reboco, pH, tipo de misturador, tempo de mistura, dentre outros, são fatores relacionados ao fluido.

Fatores relacionados às condições da região a ser perfurada, como litologia a ser perfurada, parâmetros geotécnicos, grau de fraturamento, variações de profundidade, etc, também devem ser considerados.

Sendo assim, obter um fluido compatível com o sistema a ser perfurado permitirá que sejam evitados vários problemas durante a perfuração.

Alguns fatores interferem diretamente na limpeza do poço, como:

- Taxa de penetração;
- Estabilidade do poço;
- Velocidade da lama no espaço anelar;
- Propriedades reológicas do fluido;
- Tempo de circulação;
- Inclinação do poço.

2.3.5 – PROPRIEDADES DO FLUIDO DE PERFURAÇÃO

Para perfurações simples e pouco profundas, um fluido constituído de água e argila bentonítica em baixa concentração é adequado. Contudo, em situações de difícil perfuração e/ou em grandes profundidades, é necessário um fluido mais elaborado, com introdução de um ou vários aditivos (Amorim, 2003).

Os aditivos provocam modificações nas propriedades físicas, químicas e reológicas do fluido de acordo com a proporção utilizada e as possíveis interações entre eles (Thomas, 2001).

Lummus e Azar (1986) classificamos aditivos em:

✓ Viscosificantes e Agentes Tixotrópicos

Os aditivos viscosificantes têm a função de aumentar a viscosidade, que representa a medida da resistência interna do fluido ao escoamento. O agente viscosificante mais utilizado é a bentonita. Alguns polímeros, como o carboximetilcelulose (CMC) de alta viscosidade, poliácridamida (polímero sintético de alto peso molecular) e a goma xantana (polímero natural), são também utilizados para aumentar a viscosidade do fluido, garantindo a suspensão dos sólidos perfurados e maior eficiência na limpeza do poço. Os produtos viscosificantes têm as seguintes vantagens (Pereira, 2006a):

- incrementam a reologia;
- reduzem as perdas por filtrações em formações permeáveis;
- aumentam a estabilidade do poço;
- melhoram a limpeza dos detritos durante a perfuração;
- evitam desagregação e desmoronamento nas formações inconsolidadas, estabilizando-as;

✓ Redutores de filtrado

Os redutores de filtrado tem a função de reduzir o volume de filtrado, promovendo o controle da espessura do reboco.

Segundo Pereira (2006a), os redutores de filtrado têm as seguintes vantagens:

- reduzem as perdas por filtrações em formações permeáveis;
- podem ser aplicados mesmo em altas concentrações para controles de filtrados rigorosos, sem viscosificar o fluido em excesso;
- aumentam a estabilidade do poço;
- controlam filtrado e reboco de fluidos hidroargilosos;
- melhoram a qualidade das amostragens;
- colaboram como defloculante de sódios incorporados.

Controlar a viscosidade do fluido é importante para uma limpeza eficiente do furo. O fluido deve ser viscoso, gelificante e bombeável.

Os agentes tixotrópicos tem a função de manter os detritos em suspensão durante as conexões, quando o fluido está em repouso, para não ocorrer refluxo.

✓ Controladores de pH

O pH ideal para o fluido de perfuração é em torno de 8,5 a 10. O pH é influente para valores acima de 10. Entre 10 e 12 a argila flocula com aumento instantâneo da viscosidade. A partir disso ela desidrata (Pereira, 2006a). Portanto, um pH elevado inibe argilas expansivas e é um recurso utilizado no controle pelo fluido de perfuração. Também reduzem as taxas de corrosão e estabilizam as emulsões.

No pH muito baixo, < 5 , não ocorre a hidratação da bentonita nem do polímero.

✓ Lubrificantes

Reduzem o coeficiente de atrito do fluido de perfuração, diminuindo o atrito entre a coluna de perfuração e as paredes do poço e, conseqüentemente, o torque e o arraste. Vários óleos, líquidos sintéticos, surfactantes, glicóis e glicerina são usados com este objetivo.

Segundo Pereira (2006a), as vantagens dos lubrificantes em fluidos de perfuração são:

- aumento da lubrificação e dos efeitos sinérgicos com outros fluidos ou aditivos, reduzindo torques e oxidações do aço;
- aumento da velocidade de penetração;
- prolongamento da vida útil das tubulações e equipamentos de perfuração;
- melhoria da qualidade de testemunhos;
- compatibilidade com ampla gama de aditivos de perfuração;
- alta capacidade em reter calor, proporcionando intensa refrigeração na área de atrito.

Controlar a lubricidade do fluido garante a lubrificação e o resfriamento da broca ou coroa.

✓ Dispersantes ou Defloculantes

Os dispersantes ou defloculantes, também conhecidos como redutores de viscosidade, apresentam como principal função reduzir a atração entre as partículas dos aditivos, tornando-as dispersas no meio líquido, com conseqüente redução na viscosidade e no limite de escoamento. Segundo Pereira (2006a), a defloculação é a correção do processo de floculação pela adição de dispersantes químicos que irá neutralizar as cargas insatisfeitas resultantes. O fluido irá afinar pela dispersão de partículas agregadas. Em caso de floculação, os dispersantes funcionam como defloculantes, desmanchando as porções gelificadas, afinando-o e homogeneizando-o. A função principal dos dispersantes na sondagem é auxiliar no destrancamento da coluna de perfuração quando ocorrem colagens na parede do furo provenientes da prisão diferencial, fato muito comum nos trabalhos de pesquisa.

✓ Densificantes

Os agentes densificantes tem a função de aumentar a densidade do fluido de perfuração, com o objetivo de controlar a pressão hidrostática no interior do furo. O aditivo mais utilizado é a barita (BaSO₄). Uma alternativa à Barita é a hematita ou o carbonato de cálcio ou fluidos salgados.

Controlar a massa específica e a pressão hidrostática possibilita a contenção dos fluidos existentes na formação, estabilizando as pressões de subsuperfície. Também possibilita manter a integridade estrutural, permitindo uma adequada avaliação da formação geológica.

2.3.5.1 – DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO FLUIDO

As propriedades dos fluidos de perfuração são medidas conforme mostrado a seguir:

Densidade ou Peso da Lama (lb/gal): é a massa do fluido por unidade de volume. A densidade é comumente chamada de peso da lama. Tem como aplicação o controle da pressão hidrostática no interior do furo, que assegura a estabilidade das paredes e a correta pressão exercida sobre elas. Para determinação do peso específico utiliza-se a balança densimétrica (Figura 12).



Figura 12 - Balança de Densidade. Modificado de 2010, OFI TestingEquipment, Inc.

Viscosidade Marsh (seg/quart) ou Viscosidade Funil: medida pelo funil marsh. Mede o tempo gasto para escoar 946 ml do fluido pelo funil. É um indicativo de alteração no comportamento do fluido (Figura 13).



Figura 13 - Funil Marsh. Modificado de 2010, OFI TestingEquipment, Inc.

Parâmetros reológicos (cP): o comportamento do fluxo de um fluido é definido pelos parâmetros reológicos. O controle das propriedades reológicas é necessário, pois elas garantem a eficiência na remoção dos fragmentos gerados durante a perfuração, e têm grande influencia na taxa de penetração.

Se não controladas, podem levar a trancamento de ferramenta devido a obstrução do furo, redução da taxa de penetração, alargamento do furo, perda de circulação, dentre outros.

Esses parâmetros são medidos através do Reômetro, também conhecido como viscosímetro (Figura 14).



Figura 14 - Viscosímetro FAN. Modificado de 2010, OFI TestingEquipment, Inc.

pH: o controle do pH (intervalo alcalino) evita a corrosão da coluna de perfuração e aumenta a eficiência dos dispersantes, além de aumentar a eficiência da bentonita no fluido convencional.

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+], \text{ onde } [\text{H}^+] \text{ é a concentração molar no íon } \text{H}^+$$

O pH é medido através do papel indicador de pH (Figura 15).

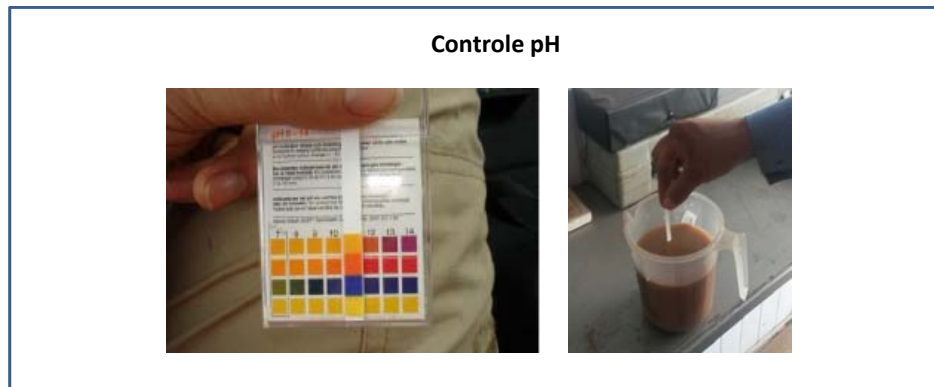


Figura 15 - Medidor de pH.

Filtrado API: durante a perfuração, é necessário evitar o influxo de fluidos da formação para o furo. Portanto a pressão da coluna hidrostática deve ser maior que a pressão da formação.

Porém, há que se obter um reboco obstruindo os poros, para evitar que o fluido de perfuração invada continuamente a formação, ocasionando perda de fluido. O filtrado é a medida da fase líquida do fluido que invade a formação. Para formação do reboco, o influxo da fase líquida para a formação é necessário, e o processo é conhecido como filtração.

Esse controle é importante por causa das argilas hidratáveis, que incham em contato com a água, causando a redução do diâmetro, desmoronamento, e conseqüentemente, o trancamento de ferramentas ou prisão diferencial.

O Filtrado API é medido através do Filtro Prensa. Emite-se uma pressão de 100 psi, em condição estática, no fluido sobre o papel filtro, formando um reboco. Determina-se o volume de água livre (Figura 16).



Figura 16 - Filtro Prensa API. Modificado de 2010, OFI TestingEquipment, Inc.

Teor de Areia (% vol): o conteúdo de areia no fluido é definido como todo material retido na peneira de 200 mesh (74 microns- μ). A fração areia interfere diretamente no controle de outras propriedades, como peso, viscosidade e força gel.

O seu descontrole leva à prisão de ferramental e à redução da taxa de penetração, afetando a limpeza do furo. Leva também a alterações na pressão da coluna hidrostática, ocasionando fraturas na formação. O teor de areia é medido através do Kit teor de areia (Figura 17).



Figura 17 - Kit teor de areia. Modificado de 2010, OFI TestingEquipment, Inc.

Cake: o controle do reboco O reboco estabiliza as paredes do furo, impermeabilizando-as e reduzindo a absorção de fluido pelas formações (Figura 18).



Figura 18 - Determinação do reboco em papel filtro.

2.3.6 – REOLOGIA

Reologia é a ciência que estuda como a matéria se deforma ou escoam quando está submetida a esforços originados por forças externas.

O escoamento de um fluido, líquido ou gás, é caracterizado por leis que descrevem a variação contínua da taxa ou grau de deformação em função das forças ou tensões aplicadas (Machado, 2002).

Quanto à direção da trajetória, o escoamento pode ser classificado em:

- ✓ Escoamento Laminar - as partículas descrevem trajetórias paralelas em camadas ou lâminas. O fluxo é organizado e ocorre em situações de baixa velocidade. A relação entre a velocidade e pressão é função das propriedades de viscosidade do fluido.
- ✓ Escoamento Turbulento – as partículas do fluido movimentam-se de forma aleatória em todas as direções, porém a velocidade média é orientada na direção do eixo

do escoamento. É impossível traçar o movimento de uma partícula individual. O fluxo é desordenado e ocorre em situações de alta velocidade.

✓ Escoamento de Transição – Representa a passagem do escoamento laminar para o turbulento ou vice-versa.

O experimento de Reynolds demonstra a existência destes regimes, mostrando que um fluido escoando em um tubo circular de diâmetro pequeno ou com baixa velocidade gera um escoamento laminar, também chamado de escoamento viscoso. Em altas velocidades ou através de tubos de grandes diâmetros, o escoamento torna-se turbulento (Machado, 2002).

A reologia investiga as propriedades e o comportamento mecânico dos corpos que sofrem uma deformação (sólidos elásticos) ou um escoamento (fluido: líquido ou gás) devido à ação de uma tensão de cisalhamento (Barnes *et al*, 1993).

Tensão de cisalhamento é a força aplicada por unidade de área cisalhante para manter o escoamento do fluido (Machado, 2002).

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Onde:
F = Força Aplicada
A = Área

Taxa de cisalhamento - é a taxa de deformação quando a matéria é submetida a uma tensão cisalhante, ou seja, é a variação da deformação em relação ao tempo. É também conhecida como grau de deformação ou gradiente de velocidade.

$$\gamma = \frac{dv}{dx}$$

A Lei de Newton da Viscosidade descreve a relação entre a tensão aplicada e taxa de deformação do fluido. Descreve o movimento de fluxo de um fluido ideal. A equação abaixo representa a Lei de Newton da Viscosidade: μ

$$\tau = \mu \cdot \gamma$$

Onde:
 τ = Tensão de Cisalhamento
 μ = Viscosidade (Pa.s)
 γ = Taxa de Cisalhamento (s^{-1})

A relação matemática entre a tensão e a taxa de cisalhamento é conhecida como equação do fluxo, e sua representação gráfica como curva de fluxo. Desta forma, temos a tensão cisalhante variando em função da taxa de cisalhamento, que de certa forma, define o comportamento reológico dos líquidos considerados puramente viscosos.

Os fluidos viscosos são classificados em Newtonianos e Não Newtonianos, dependendo da relação entre a taxa e a tensão de cisalhamento.

Fluidos Newtonianos apresentam viscosidade constante e seguem a Lei de Newton da Viscosidade. Sua representação gráfica é uma reta. Os fluidos Não Newtonianos são aqueles onde a viscosidade não é constante. Geralmente apresentam alguma variação em seu comportamento reológico, que os afastam do modelo de Newton (Figura 19).

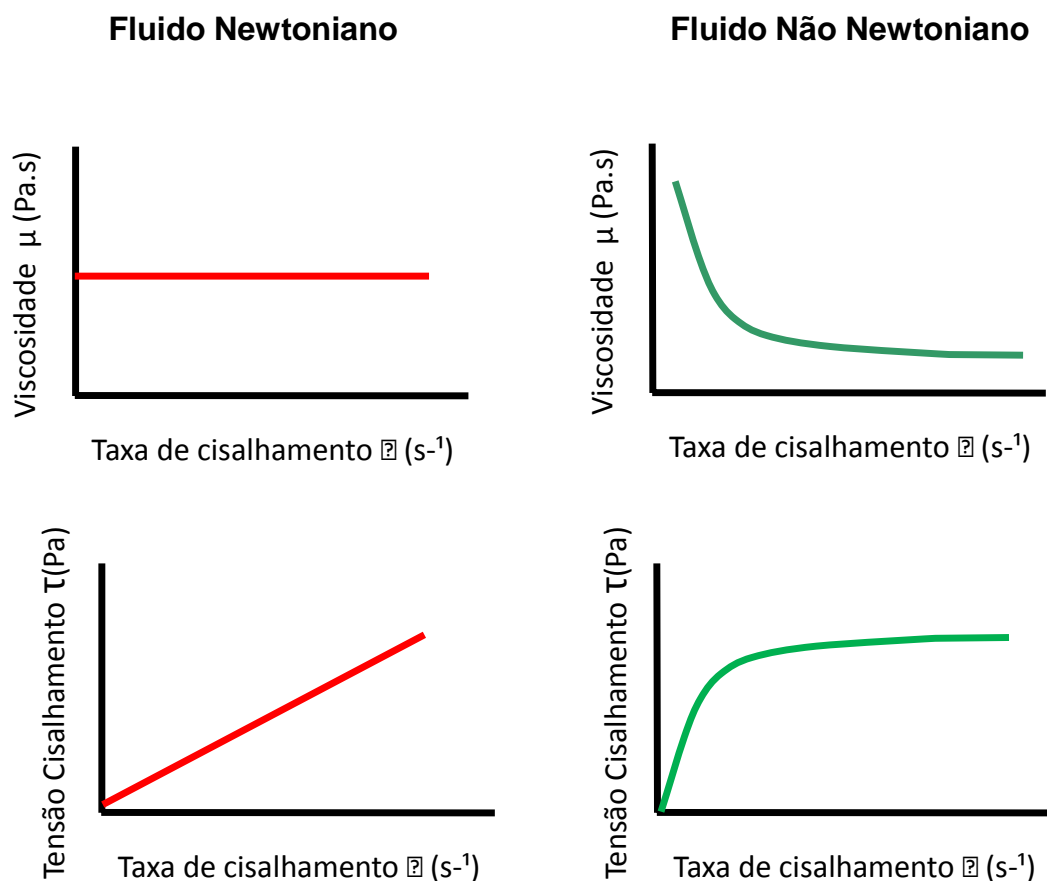


Figura 19 - Curva da viscosidade e fluxo para fluido newtoniano e não newtoniano. Fonte Diaz (2002) apud Melo, K. C. (2008).

Uma curva de fluxo é um registro gráfico que mostra como a tensão cisalhante varia em relação à taxa de cisalhamento (Machado, 2002). A Figura 20 apresenta curvas de fluxo para alguns tipos de fluido, característicos de alguns modelos matemáticos.

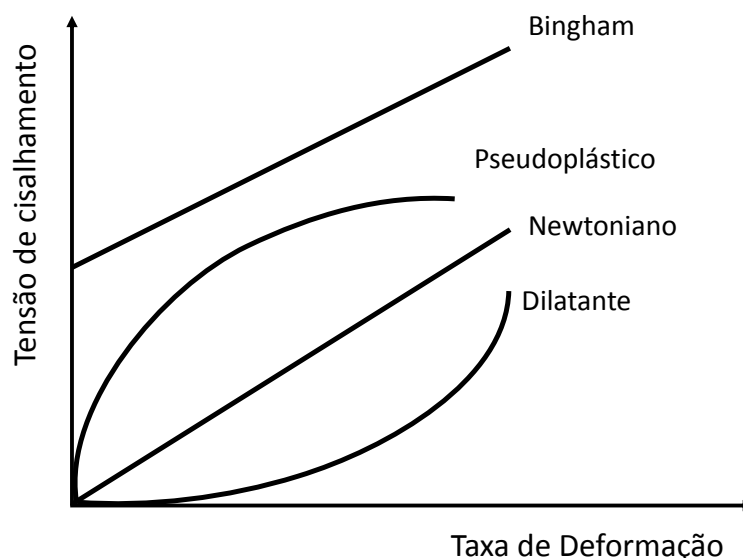


Figura 20 - Curvas de fluxo características dos modelos matemáticos.

Fonte: Melo (2005) apud Farias, Kassie V. (2009).

O modelo mais utilizado no tratamento dos fluidos de perfuração é o modelo de Bingham ou Plástico Ideal. Este modelo determina que um plástico de Bingham só flui a partir de uma tensão de cisalhamento mínima (τ). Após esta tensão, variações na tensão de cisalhamento são proporcionais às variações na taxa de cisalhamento, e a constante de proporcionalidade é chamada de viscosidade plástica. Para o modelo de Bingham, as componentes de viscosidade são a viscosidade plástica (VP) e o limite de escoamento (YP), (Machado, 2002b).

Equação do modelo matemático de Bingham:

$$\tau = YP + VP \gamma$$

Onde:

τ = Tensão de Cisalhamento

VP = Viscosidade Plástica (Pa.s)

γ = Taxa de Cisalhamento (S^{-1})

YP = Limite de Escoamento

A viscosidade representa a medida da resistência do fluido ao escoamento. As propriedades reológicas e gelificantes são: viscosidade aparente (VA), viscosidade plástica (VP), limite de escoamento (YP) e os géis.

Viscosidade Aparente (VA) é a viscosidade de um fluido Não-Newtoniano que depende da taxa de cisalhamento aplicada. É a viscosidade que um fluido teria se fosse Newtoniano (Machado, 2002).

Viscosidade Plástica (VP) é a propriedade relacionada com o atrito entre as partículas dispersas, responsável pela resistência ao escoamento.

Limite de Escoamento (YP) é fisicamente o valor mínimo de tensão cisalhante, que deve ser aplicada ao fluido para iniciar o escoamento.

O viscosímetro Fann é utilizado para determinar experimentalmente os parâmetros reológicos dos fluidos de perfuração, e as seguintes equações são utilizadas:

✓ Viscosidade Aparente (VA)

$$VA = L600/2$$

Onde VA = viscosidade aparente em centipoise (CP);

L600= leitura no viscosímetro a 600 rpm após 2 min de agitação;

✓ Viscosidade Plástica (VP)

$$VP = L600 - L300$$

Onde VP = viscosidade plástica em centipoise (CP);

L600= leitura no viscosímetro a 600 rpm após 2 min de agitação;

L300= leitura no viscosímetro a 300 rpm após 15 seg de agitação;

✓ Limite de Escoamento (YP)

$$YP = L300 - VP$$

Onde L300= leitura no viscosímetro a 300 rpm após 15 seg de agitação;

VP = viscosidade plástica em centipoise (CP);

✓ Força Gel Inicial e Final (Gel I e Gel F)

A Força Gel Inicial é a medida da resistência inicial para um fluido entrar em fluxo, e a força Gel Final é a medida da resistência para um fluido reiniciar o fluxo após repouso. A diferença entre as duas forças indica o Grau de Tixotropia do fluido.

$$\text{Gel I} = L3 \text{ "10 seg"}$$

$$\text{Gel F} = L3 \text{ "10 min"}$$

Tem como aplicação o controle da eficiência do transporte dos fragmentos até a superfície, e sua sustentação durante as paradas de circulação.

2.3.7 – TIXOTROPIA

Fluido tixotrópico é aquele em que a viscosidade do fluido diminui com o tempo para uma taxa de deformação constante. Isso se dá em função da quebra de uma estrutura organizada no fluido.

Segundo Barnes *et al* (1993), quando um sistema tixotrópico fica em repouso durante algum tempo, a viscosidade aparente aumenta devido à formação de uma estrutura mais organizada das partículas em suspensão que “imobiliza” o líquido entre as partículas. Se após, submetemos o sistema ao cisalhamento, mantendo a velocidade de agitação constante, a viscosidade aparente decresce com o tempo até atingirmos o equilíbrio entre quebra e reconstrução da estrutura (Barnes *et al*, 1993).

O fluido deve ter características tixotrópicas para evitar a decantação dos detritos gerados durante a perfuração e em situações em que é necessário interromper a circulação do fluido. Nessa situação, o fluido permanece em repouso no poço e deve

manter os sólidos em suspensão. Porém esta propriedade deve ser controlada, pois seu excesso poderá causar erosão nas paredes do poço (Amorim, 2003).

Portanto, é grande a importância do controle da reologia, pois essas características são necessárias, se não controladas, interferem na limpeza e erosão do poço, na suspensão e carregamento de sólidos e, conseqüentemente, no sucesso da perfuração.

2.3.8 – POLÍMEROS

Os polímeros podem ser classificados em Polímeros Naturais, Polímeros Naturais Modificados e Polímeros Sintéticos.

a) Polímeros Naturais - são basicamente os biopolímeros e polímeros à base de amido. O amido é considerado um polímero hidrofílico, pois a sua molécula estrutural apresenta um caráter ligeiramente aniônico. Essa característica possibilita a absorção de grande quantidade de água. O amido é, portanto, um controlador da perda de fluido para a formação. Por possuir grandes partículas em sua cadeia, reduz a penetração do fluido de perfuração na formação.

Os biopolímeros são polímeros de alto peso molecular, geralmente polissacarídeos produzidos a partir da fermentação bacteriana. Sua molécula estrutural também apresenta um caráter ligeiramente aniônico e é hidrofílico. Por isso os biopolímeros são usados no controle reológico e melhoram o processo de transporte dos detritos durante a perfuração. Os exemplos mais comuns dessa classe é a goma xantana, que trata-se de um biopolímero classificado como ramificado, aniônico, e produzido por fermentação, empregando a bactéria *Xanthomonas Campestris*.

b) Polímeros Naturais Modificados – os mais utilizados são os CMC ou carboximetilcelulose. A principal função é aumentar a viscosidade do fluido, melhorando a capacidade de carregamento de detritos. São também agentes hidrofílicos capazes de absorver grande quantidade de água.

c) Polímeros Sintéticos – basicamente formados pelos poliacrilatos e pelas poliacrilamidas, que são copolímeros de variasproporções de acido acrílico e acrilamida. Ospoliacrilatostêm seu uso variando de acordo com seu pesomolecular.

Os de baixo peso molecular (< 1000) são utilizadas comoafinadores e defloculantes. Adsorvem as cargaspositivas dos fluidos deixando-os com excessode cargas negativas, o que causa forte repulsão,resultando na defloculação.

Apoliacrilamida de peso molecular médio (entre 1000 e 100.000)são utilizados como floculantes e controladoresde parâmetros reológicos.

As moléculas comalto peso molecular (>100.000) são usadascomo floculantes. A poliacrilamida possui altopeso molecular e atua como um controlador dos fluidos, por sercapaz de encapsular os sólidos (contaminantes)presentes nos fluidos e formar flocos que se depositam no fundo dos tanques de decantação.A ação de captura de contaminantes pelapoliacrilamida se deve à diferença de cargasexistentes. Apoliacrilamida é aniônica e ossólidos/partículas apresentam cargas positivas(Caennet *al.*, 1995).

2.3.9 – BENTONITA

Conceito

As argilas são agregados em pacotes laminares. Cada lâmina mede 10 Å, portanto cada milímetro comporta um milhão de lâminas. Em contato com a água, os pacotes de argila se separam à medida que a água penetra entre as camadas. Esse efeito é chamado de dispersão. A separação das lâminas aumenta a superfície exposta com as cargas atraindo as moléculas de água e criando o efeito gel. O termo bentonita é utilizado comercialmente para denominar a montmorilonita de sódio, que é um tipo de esmectita (Pereira, 2003).

Oliveira (2008) reforça esse conceito, informando que bentonita é o nome genérico da argila composta predominantemente pelo argilomineralmontmorilonita, do grupo das esmectitas, independentemente de sua origem ou ocorrência.

A estrutura da montmorilonita compreende duas folhas de silicato tetraédricas, com uma folha central octaédrica, unidas entre si por oxigênios comuns às folhas (Souza Santos, 1989).

As camadas sucessivas estão ligadas frouxamente entre si e camadas de água ou moléculas polares, de espessuras variáveis, podem ser adsorvidas entre elas, chegando a separá-las totalmente, deixando-as livres. Quando argilominerais montmoriloníticos anidros são colocados em água ou ambientes úmidos, os cátions trocáveis se hidratam e o espaçamento basal aumenta: nessas condições, os cátions interlamelares são suscetíveis de serem trocados por outros cátions por uma reação química estequiométrica (Souza Santos, 1989).

As esmectitas possuem como características principais o alto poder de inchamento (até 20 vezes seu volume inicial), atingindo espaços interplanares de até 100 Å, alta área de superfície exposta (até 800m²/g), capacidade de troca catiônica na faixa de 60 a 170 meq/100 g e tixotropia. Essas características conferem à bentonita propriedades bastante específicas, que têm justificado uma vasta gama de aplicações nos mais diversos segmentos (Oliveira, 2008).

Segundo Lummus e Azar (1986), quando o cátion associado à estrutura da argila é o cálcio, o inchamento interlamelar varia de 11,8 Å, quando em estado seco, a um máximo de 18,0 Å. Quando o cátion associado à estrutura é o sódio, o seu inchamento interlamelar pode atingir um máximo de 40,0 Å. A diferença no inchamento das montmorilonitas sódicas e cálcicas deve-se à força de atração entre as camadas, que é acrescida pela presença de cálcio, reduzindo a quantidade de água que poderá ser adsorvida. Já o cátion sódio provoca uma menor força atrativa, permitindo que uma maior quantidade de água penetre entre as camadas e seja então adsorvida (Figura 21).

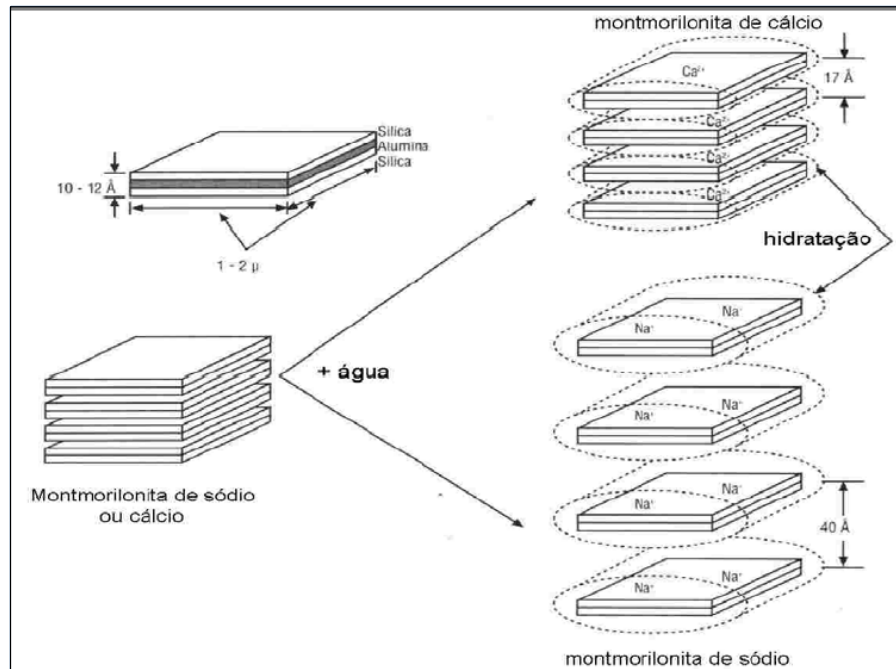


Figura 21. Representação do inchamento entre montmorilonita de cálcio e sódio.

Características da bentonita utilizada

Neste estudo foi utilizada a bentonita ativada com Na_2CO_3 (barrilha) e aditivada de polímeros. Em sua composição já contém alguns corretores em pequena quantidade para controle de viscosidade, tixotropia, filtrado, dentre outros. Ainda assim, necessita de inserção de aditivos.

A bentonita é uma argila hidratável plástica. A bentonita é pré-hidratada fora do furo e ocorre a inserção de aditivos.

Na preparação de lama com bentonita ou lama convencional, devem-se ter alguns cuidados para evitar a floculação do fluido, ou separação das fases.

Dados históricos mostram que essa separação ocorre sempre que o pH da água é baixo (bastante ácido), ou a dureza elevada (Ca e Mg). Água com mais que 100 ppm de dureza não é ideal para utilização em fluidos à base de bentonita. Também devemos considerar a quantidade de cloreto dissolvido, que deve ser inferior a 250 ppm. Em água com estas características, não se deve utilizar bentonita, mas é possível utilizar polímero. Se houver presença significativa de ativadores de dureza (Ca e Mg), a

viscosidade tende a diminuir. Se houver separação das fases, a lama perde todas as suas características: a viscosidade e gel diminuem, filtrado e reboco aumentam, etc. (Fonte: Geosol, 2013).

Na preparação da lama para este estudo, primeiramente foi inserida barrilha na água, controlador de dureza e pH, depois houve a inserção de bentonita e, posteriormente, inserção de polímeros. Esta ordem é importante pois, caso contrário, pode haver separação de fases, uma vez que a apoliacrilamida ou PHPA pode encapsular a argila.

Problemas

Para formações friáveis ou argilosas, a bentonita, produz reboco bastante espesso e hidrata facilmente.

Quando se trabalha com bentonita nas formações argilosas, esta se incorpora à lama, levando sólido para dentro do furo e aumentando a viscosidade. O gel aumenta a ponto de gelificar o furo. Se a argila da formação for hidratável, esta expande e fecha o furo, aumentando instantaneamente o torque do ferramental.

Para rocha, esse efeito acontece com menos ou nenhuma intensidade. Normalmente não hidrata e não forma reboco, pois o número de poros é infinitamente menor. Operacionalmente, na rocha não há necessidade de reboco, a não ser que tenha fraturamento.

O excesso de bentonita na lama ou a perfuração em material argiloso produz uma lama ineficiente, que forma um reboco espesso por dentro e por fora da haste, e facilita o trancamento. Diminui a vazão dentro da haste, aumenta a pressão do bombeamento, eleva o torque e tranca.

A lama produzida corretamente ou lama eficiente, seja com bentonita ou polímero, se bem homogeneizada, produz o reboco fino, porém eficiente (Figura 22).

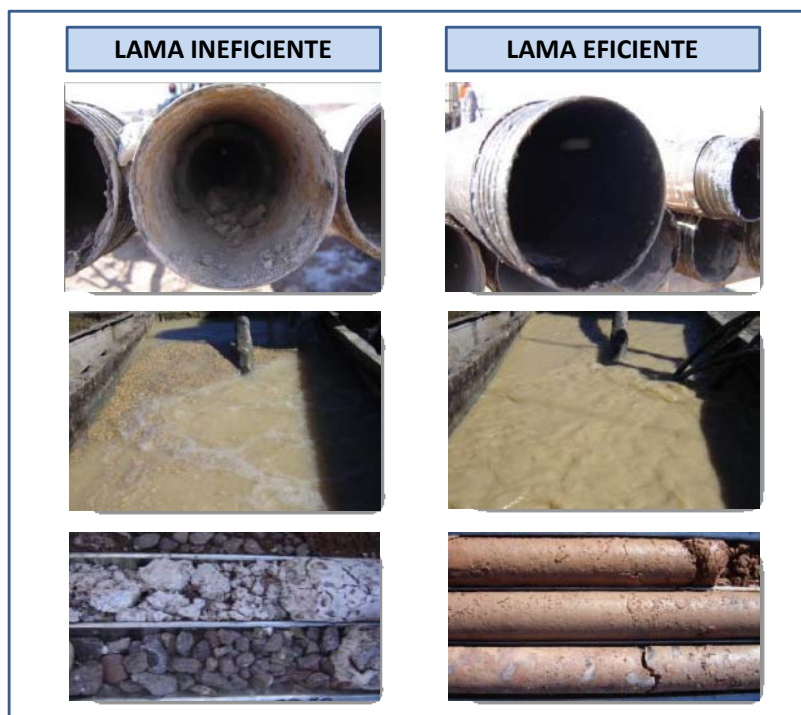


Figura 22. Representação das diferenças entre lama ineficiente e lama eficiente. Fonte: Geosol.

2.3.10 – PRINCIPAIS PROBLEMAS NA SONDAGEM

Problemas Relacionados ao Peso do Fluido – em muitos casos a perda de lama é “induzida” pelo operador ou pelo tipo de fluido utilizado. Essa perda de fluido está relacionada ao excesso de peso ou a um bombeamento com alta vazão em relação à litologia perfurada, gerando abertura de fenda ou buraco dentro do furo. Dessa forma, o fluido para de retornar, aumentando a sujeira dentro do furo, pois o fluido começa a lavar o material e alargar o furo na parte inferior. Isso provoca trancamentos, desmoronamento no fundo do furo e quebra de hastes.

Importante ressaltar que quando nos referimos ao peso do fluido, como é comumente chamado no campo, na verdade trata-se da massa específica, que é a massa do fluido por unidade de volume.

Se o peso do fluido for insuficiente, pode provocar desmoronamento das paredes do furo, e até o fechamento deste.

Se o peso do fluido for excessivo, pode provocar prisão de coluna por diferencial de pressão, perda de circulação parcial ou total, e redução na taxa de penetração.

Perda de Circulação ou Perda de Retorno – perda do volume de fluido para a formação, de forma natural, através de espaços porosos, fraturas ou cavernas da formação. A perda pode também ser induzida, devido ao peso do fluido ser superior ao gradiente de fratura da rocha, ou seja, pressão hidrostática muito maior que a pressão da formação; ou ainda devido ao bloqueio do espaço anelar por argilas. Como medida preventiva, destaca-se o controle da taxa de penetração e o controle da reologia do fluido, além de um reboco compatível. Para minimizar o efeito, destaca-se a redução do peso do fluido, o aumento da viscosidade e a injeção de tampão de LCM (“LostCirculationMud”), além da injeção de produto específico para selar os poros e fraturas.

Prisão ou Trancamento de Ferramenta/Coluna – os movimentos da coluna ficam bloqueados durante a operação de sondagem. Normalmente se deve a desmoronamentos, acunhamento, reboco espesso, retirada da coluna com arraste elevado, pressão hidrostática elevada, etc. No trancamento não passa lama e a tratativa é mecânica, quase sempre com haste esquerda, ou pescador ou cortador de haste (Figura 23).

No sistema “wireline” a limpeza do furo deve ser eficiente, pois o espaço anelar (espaço entre a ferramenta e a parede do furo) é reduzido, aumentando as possibilidades de trancamento.

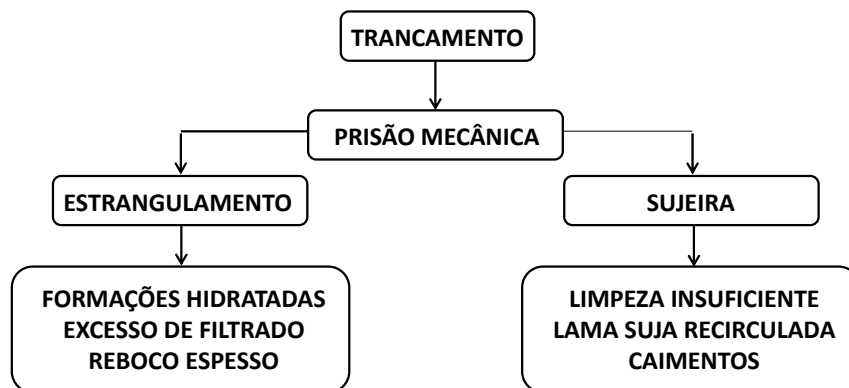


Figura 23. Esquema simplificado mostrando causas de problemas relacionados a trancamento – tratativa mecânica.

Prisão Diferencial - consiste na fixação da coluna à parede do poço devido a uma força causada pela diferença de pressão entre a coluna hidrostática do fluido e a pressão de poros da formação. Ocorre geralmente em frente a formações porosas e permeáveis e em fluidos com alto filtrado e alta espessura de reboco (Figura 24).

Filtrado alto e reboco espesso geram vários problemas durante a perfuração, como geração de torque e arrastes elevados. Além disso, aumenta a possibilidade de prisão diferencial por pressão, diminui o diâmetro do furo e aumenta problemas associados a pressão de surge e swab, dentre outros. Na prisão diferencial passa lama e a tratativa é química, normalmente afinamento do fluido e utilização de tampão viscoso (Figura 25).

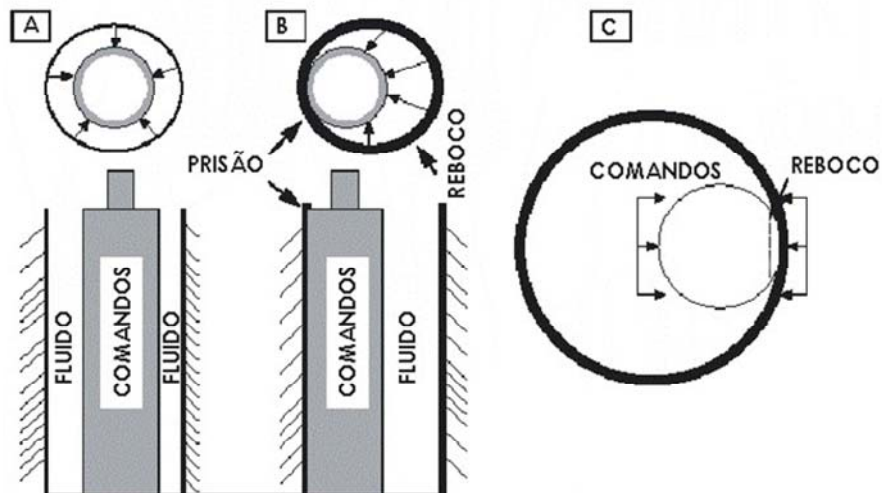


Figura 24. Esquema simplificado da prisão diferencial da coluna de perfuração – tratativa química. Modificado de Pereira (2003 a).

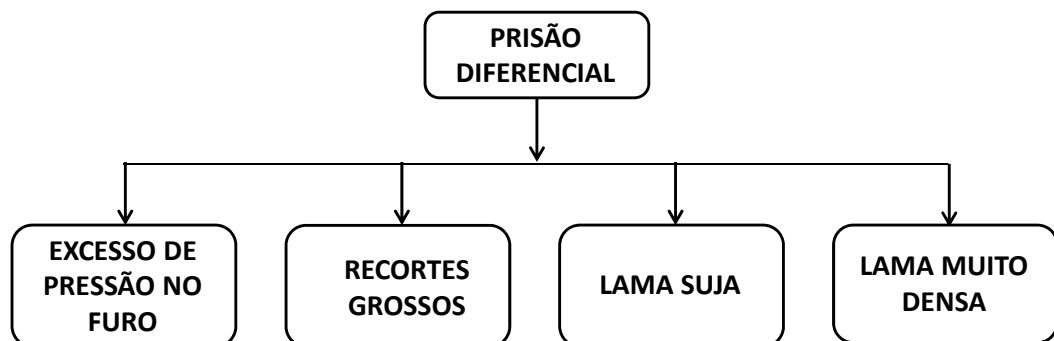


Figura 25. Esquema simplificado mostrando causas de problemas relacionados à prisão diferencial – tratativa química.

Pistoneio Mecânico/Efeito Seringa -Após a perda de lama, a sujeira que estava sendo carregada pelo fluido deposita-se no espaço anelar, causando o entupimento do furo. Observa-se o aumento de torque ou a “ferramenta rodando pesada”. A pressão de bombeamento aumenta ou não passa mais lama. É nítida a mudança no som do motor, mostrando que a máquina está sendo forçada. Ao tentar retirar, a camisa não sai e, por muitas vezes, chega a arrebentar o cabo do wireline. Ao tentar retirar a ferramenta com a camisa dentro do barrilete, em algum momento esta trava como se tivesse trancada ou se tivesse algum obstáculo no meio do caminho. Nesse momento o furo está sendo pistoneado. A camisa dentro do barrilete faz o efeito de “embolo dentro da seringa”, e o efeito é de sucção (Figura 26).



Figura 26. Resumo simplificado do pistoneamento mecânico ou efeito seringa – tratativa química.

Pistoneio Hidráulico/Swab -a movimentação da coluna causa variações nas pressões de fundo de furo devido ao efeito de “pistoneio”.

- Movimento axial da coluna para baixo (descida de coluna) → Aumento de pressão de fundo (SURGE).

- Movimento axial da coluna para cima (subida de coluna) → Diminuição de pressão de fundo (SWAB).

Este tipo de pistoneio cria uma pressão negativa que reduz a hidrostática na formação portadora (Campos, W. 1986).

2.4– PERFILAGEM GEOFÍSICA

A perfilagem geofísica de furos de sondagem é utilizada na determinação de propriedades físicas *in situ*, com base na existência de contrastes das propriedades das rochas (Fullagar e Fallon, 1997). É a metodologia eficaz para estimar a densidade “*in situ*” (real time) ao longo de todo o furo de sondagem de minério e rochas encaixantes.

Consiste na obtenção de um perfil das camadas perfuradas, através de sensores que percorrem o furo medindo diversos parâmetros.

Os sensores constituem uma assembleia, denominada sonda geofísica, que consiste em hastes de metal que podem atingir até dezenas de metros e que percorrem todo o furo após o término da perfuração, registrando os parâmetros de interesse. Após atingir o fundo do furo, a sonda geofísica é içada a uma determinada velocidade, efetuando o registro dos parâmetros.

A representação gráfica entre as profundidades reais e as propriedades petrofísicas é denominada perfil geofísico.

É possível a conexão de diversas sondas entre si para facilitar o registro de mais parâmetros simultaneamente em furos muito profundos.

A identificação de rochas e algumas propriedades destas, como porosidade, densidade e saturação em água, podem ser caracterizadas através da perfilagem geofísica, utilizando métodos elétricos, perfilagem sônica ou acústica e perfilagem nuclear, dentre outros.

O método utilizado neste estudo foi o método nuclear, com utilização da radiação gama.

Das três radiações nucleares identificadas - alfa, beta e gama - apenas a radiação gama pode ser utilizada em perfilagem de furos, já que 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). As partículas α e β não penetram muito os materiais e, por isso, não atravessam de forma efetiva as formações rochosas, fluídos de perfuração e revestimentos metálicos que podem existir em furos de sondagem.

2.4.1– MÉTODO GAMA NATURAL

Os raios gama são ondas eletromagnéticas de alta energia emitidas por núcleos atômicos na forma de radiação. O perfil é a medição da radioatividade natural em função da profundidade.

Alguns tipos de detectores podem ser utilizados na sonda para medição dos raios gama, incluindo câmara de ionização, contadores Geiger-Mueller e cintilômetros. Estes detectores são afetados pelos raios gama, que não são detectados diretamente como energia eletromagnética, mas por intermédio de interações desses raios com os átomos ou moléculas existentes no interior dos detectores (Carrasquila, 2012).

A profundidade de investigação, em sondas de medição de radiação gama natural, varia dependendo da densidade do material que está sendo perfilado. Em materiais densos a profundidade de investigação diminui.

2.4.2– MÉTODO GAMA-GAMA

O perfil de densidade registra, em contagens por segundo, as variações das massas específicas das rochas atravessadas por um poço e expressa suas medições em g/cm^3 . A medição da densidade total de uma rocha é realizada utilizando uma ferramenta que dispõe de um patim metálico com uma fonte monoenergética radioativa direcional, geralmente de Césio 137, que é pressionada contra a parede do furo e um feixe monoenergético de raios gama bombardeia as paredes do furo.

As fontes mais comuns de raios gama são de Césio 137 e Cobalto 60. No caso de rochas porosas, a medição realizada pelo perfil inclui tanto a densidade da matriz que constitui a rocha, como a do fluido contido no espaço poroso (Nery, 2003).

Dessa forma, a parede do furo é irradiada com fontes de raio gama e um contador gama grava a quantidade dos raios refletidos, sendo que a comparação do número de raios gama que retornam a fonte com aqueles espalhados no meio, é relacionada com a densidade da formação (Hart's E&P, 2002).

Os fótons de raios gama colidem com os elétrons e têm sua energia reduzida, caracterizando o Espalhamento Compton. Quando um fóton incidente colide com um elétron, e tem sua energia dividida entre a energia cinética do elétron e um fóton, tem-se o Efeito Compton. Este efeito é proporcional à densidade eletrônica da formação, gerando assim uma curva de densidade.

As perfilagens utilizadas neste trabalho foram executadas por uma sonda produzida pela Weatherford, que utiliza detectores múltiplos que fornecem uma medida de densidade compensada acurada dentro de furos de sondagem.

Trata-se de uma sonda tipo SDD-DD6 (Dual Density), que é constituída de uma fonte de Césio 137 de 7,4 GBq de atividade contida dentro da ferramenta e 3 detectores de Na (TI) cintilômetros, denominados LSD (Long Space Density), BRD (Bed-ResolutionDensity) e HRD (High ResolutionDensity). Esta ferramenta, por possuir uma fonte de Césio 137, emite raios gama (γ) para efetuar as medições e correlações das medições com a densidade de rocha nos furos de sondagem.

2.4.3– CAMPO DE CALIBRAÇÃO GAMA-GAMA

Neste estudo, os dados referentes ao método gama-gama são utilizados para refinar a interpretação dos contatos geológicos, obtendo um controle da exata localização dos corpos e contatos geológicos. Juntamente com a descrição geológica dos testemunhos e análise dos dados químicos, determina as litologias perfuradas. Essas definições são essenciais para a detecção exata da litologia onde houve perda de fluido de perfuração.

As unidades de perfilagem utilizam vários tipos de sensores, que devem estar calibrados, aferidos e monitorados para garantir a precisão dos dados.

Baseado nisso, a Vale desenvolveu um Campo de Aferição Gama-Gama. O campo é constituído de uma torre metálica que abriga um poço de provas estratificado com intervalo de densidades diferentes e um bunker, para armazenamento da fonte radioativa de baixa intensidade. Portanto, a torre é utilizada para aferição da ferramenta de perfilagem gama-gama através de um ambiente controlado (Figura 27).



Figura 27. Campo de calibração Gama-Gama com certificação do IPT - Vale.

Para simular a perfuração, foram construídos 4 blocos cilíndricos com altura de 1 m, com um furo central, simulando as dimensões de um furo HQ, por onde é possível descer a ferramenta gama-gama para verificar a aferição do equipamento.

Cada bloco possui uma densidade distinta e controlada que serve de base para esta calibração. Os blocos estão empilhados e dispostos, de baixo para cima, do bloco de maior densidade para o bloco de menor densidade (Tabela 1).

Tabela 1. Densidade dos blocos do campo de calibração.

Bloco	Densidade (kg/m ³)
1	4500
2	3500
3	2500
4	1500

2.4.4– UNIDADE DE PERFILAGEM GEOFÍSICA DE CAMPO

A unidade utilizada está montada em um caminhão, e consiste em uma sonda, um guincho para promover a descida da sonda e uma central computadorizada para leitura e armazenamento digital dos dados, além dos procedimentos iniciais de descida e subida do conjunto de ferramentas dentro do furo. As leituras são sempre realizadas na subida do conjunto, em função do caliper.

A sonda é composta por uma haste tubular de metal cilíndrico, com diâmetro variando entre 40 e 60 mm e com 1,5 a 3 m de comprimento. Geralmente contém uma combinação de sensores que não interferem uns com os outros. Esta sonda fica suspensa no furo por um cabo blindado multinúcleo e é levada até o fundo do furo, sendo as leituras registradas no retorno da ferramenta até a superfície. Os dados são armazenados na central computadorizada para posterior processamento.

A instrumentação de superfície fica instalada no caminhão estacionado próximo a boca do furo. Trata-se de polias de cabos e guinchos, registradores, dentre outros (Figura 28).

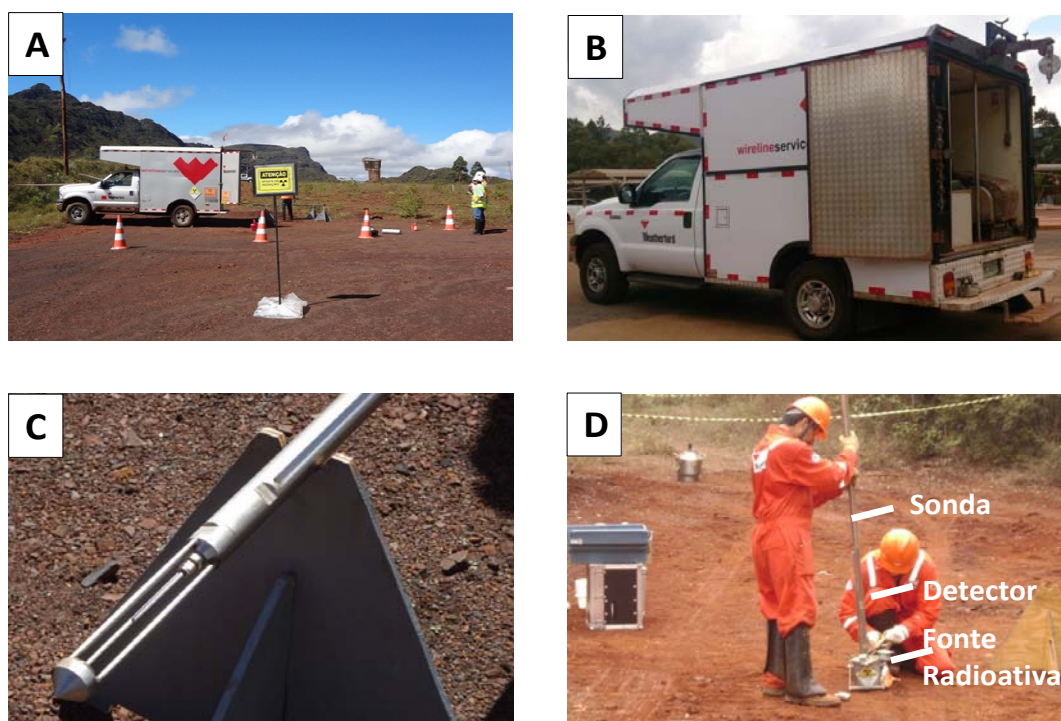


Figura 28. Perfilagem geofísica em campo (A). UPG - Unidade de perfilagem geofísica (B). Detalhe da ferramenta gama-gama (C). Preparação da sonda (D).

2.5– DESCRIÇÕES GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA

2.5.1 – DESCRIÇÃO GEOLÓGICA

Para descrição geológica dos furos, utilizou-se os seguintes critérios:

- Minério:

Os minérios limpos são avaliados considerando duas variáveis, litologia e compacidade (Tabela 2).

Tabela 2. Litotipos de minérios limpos com nomenclatura padrão Vale.

MINÉRIOS LIMPOS	
Hematitito Compacto	HC
Hematitito Semi-Compacto	HS
Hematitito Friável	HF
Hematitito Pulverulento	HP
Itabirito Compacto	IC
Itabirito Friável	IS
Itabirito Semi-compacto	IF
Itabirito Pulverulento	IP

Os minérios contaminados são avaliados considerando três variáveis, sendo litologia, contaminação e compacidade (Tabela 3).

Tabela 3. Litotipos de minérios contaminados com nomenclatura padrão Vale.

MINÉRIOS CONTAMINADOS				
LITOLOGIAS	CONTAMINANTES	HEMATITAS	COMPACIDADE	SIGLAS
H	CT	Hematítico Contaminado	(C) Compacto	HCTC / HCTS / HCTF / HCTP
H	AL	Hematítico Aluminoso		HALC / HALS / HALF / HALP
H	AN	Hematítico Anfibolítico	(S) Semi-Compacto	HANC / HANS / HANF / HANP
H	AR	Hematítico argiloso		HARC / HARS / HARF / HARP
H	DO	Hematítico dolomítico	(F) Friável	HDOC / HDOS / HDOF / HDOP
H	GO	Hematítico goethítico		HGOC / HGOS / HGOF / HGOP
H	MN	Hematítico manganêsífero	(P) Pulverulento	HMNC / HMNS / HMNF / HMNP
LITOLOGIAS	CONTAMINANTES	ITABIRITOS	COMPACIDADE	SIGLAS
I	CT	Itabirito Contaminado	(C) Compacto	ICTC / ICTS / ICTF / ICTP
I	AL	Itabirito Aluminoso		IALC / IALS / IALF / IALP
I	AN	Itabirito Anfibolítico	(S) Semi-Compacto	IANC / IANS / IANF / IANP
I	AR	Itabirito argiloso		IARC / IARS / IARF / IARP
I	DO	Itabirito dolomítico	(F) Friável	IDOC / IDOS / IDOF / IDOP
I	GO	Itabirito goethítico		IGOC / IGOS / IGOF / IGOP
I	MN	Itabirito manganêsífero	(P) Pulverulento	IMNC / IMNS / IMNF / IMNP
I	OC	Itabirito ocre		IOCC / IOCS / IOCF / IOCP

- Estéris:

Estéreis são avaliados considerando duas variáveis, litologia e compactidade. Para estas litologias não será empregado o termo pulverulento para a compactidade (Tabela 4).

Tabela 4. Litotipos de estéreis com nomenclatura padrão Vale.

ESTÉREIS			
LITOLOGIAS	HEMATITAS	COMPACIDADE	SIGLAS
AN	Anfibolito	(C) Compacto	ANC / ANS / ANF
DO	Dolomito		ACC / ACS / ACF
FL	Filito		FLC / FLS / FLF
FD	Filito Dolomítico		FDC / FDS / FDF
FS	Filito Sericítico		FSC / FSS / FSF
QZ	Quartzito		QZC / QZS / QZF
QF	Quartzito Ferruginoso	(S) Semi-Compacto	QFC / QFS / QFF
IN	Rocha Intrusiva		INC / INS / INF
XT	Xisto	(F) Friável	XTC / XTS / XTF
QX	Quartzito Xisto		QXC / QXS / QXF
SX	Sericita Xisto		SXC / SXS / SXF

As exceções são VQ – Veio de quartzo / ZT – Zona de transição / ZC – Zona de cisalhamento / SR – Sem recuperação / DT – Rocha destruída

- Coberturas:

Coberturas não são caracterizadas quanto a compacidade ou contaminação (Tabela 5).

Tabela 5. Litotipos de cobertura com nomenclatura padrão Vale.

COBERTURAS	
AT	Aterro
CG	Canga
CO	Colúvio
LT	Laterita
PE	Pilha de Estéril
PI	Pilha de Itabirito
RO	Rolado
RA	Rolado Argiloso
SO	Solo

2.5.2 – DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA

Para descrição geotécnica dos furos utilizados utilizam-se os seguintes critérios:

- ✓ *Grau de Alteração*

São características de alteração da fase mineral, a desagregação física dos grãos (Tabela 6).

Tabela 6. Classificação da rocha em relação ao grau de alteração. Baseada em sistema RMR, Bieniawski (1989), adaptada para Vale.

ALTERAÇÃO	
1	Fresca
2	Levemente Alterada
3	Moderadamente Alterada
4	Altamente Alterada
5	Completamente Alterada
6	Solo Residual

✓ *Consistência*

Definida de forma tátil-visual com base na tenacidade, dureza e friabilidade das rochas (Tabela 7).

Tabela 7. Classificação da rocha em relação ao grau de consistência. Baseada em sistema RMR, Bieniawski (1989), adaptada para Vale.

CONSISTÊNCIA		
0	Extremamente Macia	Penetrável pelo polegar. Marcado com unha. Esfarela facilmente sob pressão dos dedos e dissolve completamente quando agitado em água.
1	Macia	Penetrável por lâmina, provoca sulcos profundos, desagregáveis manualmente. Esfarela ao golpe do martelo.
2	Média Macia	Facilmente penetrável por lâmina, quebra-se facilmente ao golpe do martelo. Somente as bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos.
3	Média	Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo, as bordas do fragmento não podem ser quebradas pela pressão dos dedos. A Lâmina de aço provoca sulcos rasos na superfície.
4	Média Dura	A lâmina de aço dificilmente provoca sulcos na superfície. Quebra-se ao golpe do martelo.
5	Dura	Quebra-se com vários golpes de martelo. Não riscável pela lâmina de aço.
6	Extremamente Dura	São impenetráveis por lâminas de aço. Os fragmentos possuem bordas ásperas e cortantes. Quebra-se com dificuldade e vários golpes de martelo.

✓ *Faturamento*

É uma particularidade da descontinuidade. O termo fraturamento é utilizado como coletivo para juntas, planos de acamamento, foliações, contatos e falhas (Tabela 8). Quebras mecânicas não podem ser consideradas.

Tabela 8. Classificação da rocha em relação ao fraturamento. Baseada em sistema RMR, Bieniawski (1989), adaptada para Vale.

Maciço	Pouco Fraturado	Moderadamente Fraturado	Muito Fraturado	Intensamente Fraturado	Fragmentado	Desagregado
1	2	3	4	5	6	-
Espaçamento das descontinuidades > 2 m	Espaçamento das descontinuidades entre 60 cm e 2 m	Espaçamento das descontinuidades entre 20 cm e 60 cm	Espaçamento das descontinuidades entre 6 cm e 20 cm	Espaçamento das descontinuidades entre 2 cm e 6 cm	Espaçamento das descontinuidades < 2 cm	Sem possibilidade de determinar a descontinuidade
Uma descontinuidade a cada 3 m	2 a 3 descontinuidades a cada 3 m	4 a 10 descontinuidades a cada 3 m	11 a 30 descontinuidades a cada 3 m	30 a 60 descontinuidades a cada 3 m	60 descontinuidades a cada 3 m	Material destruído pela sondagem
	0 a 1 descontinuidade por metro	2 a 5 descontinuidades por metro	6 a 10 descontinuidades por metro	11 a 20 descontinuidades por metro	> 20 descontinuidades por metro	

✓ *RQD - Rock Quality Designation (Índice de Designação de Qualidade da rocha).*

Índice qualitativo para recuperação percentual modificada de testemunho no qual se consideram todos os pedaços recuperados de mais de 10 cm de comprimento, sendo expressa como porcentagem do material perfurado.

Qualquer família de fratura pode ser considerada. Fraturas de quebra mecânica (superfícies frescas) são contadas como uma peça, desde que tenham o comprimento requerido de 10 cm. Materiais mais fracos que a rocha circundante, como preenchimentos consolidados, são descontados, mesmo aparecendo em pedaços intactos maiores que 10 cm (Figura 29).

Como medir:

Para medir, define-se o intervalo, somam-se os comprimentos das peças maiores que 10 cm, e divide-se o valor encontrado acima pelo comprimento total do intervalo.

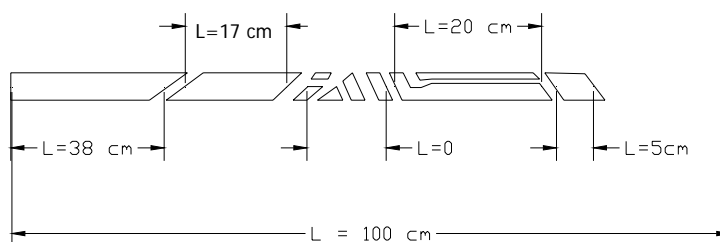


Figura 29. Desenho esquemático RQD. Baseada em sistema RMR, Bieniawski (1989), adaptada para Vale.

$$\text{RQD} = \frac{\Sigma (\text{Comprimento das peças} > 10\text{cm})}{(\text{Tamanho total do intervalo})} \times 100\%$$

$$\text{Exemplo: RQD} = \frac{38 + 17 + 20 \text{ cm}}{100\text{cm}} \times 100\% = 75\%$$

De acordo com o percentual de RQD, a rocha é classificada conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Classificação da rocha em relação ao índice de designação da qualidade (RQD).

Baseada em sistema RMR, Bieniawski (1989), adaptada para Vale.

RQD - Rock Quality Designation	
%	Descrição
0 - 25	Muito Pobre
25 - 50	Pobre
50 - 75	Regular
75 - 90	Bom
90 - 100	Excelente

CAPÍTULO 3

GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

3.1–GEOLOGIA REGIONAL

O Quadrilátero Ferrífero é uma região de grande interesse, devido a sua geologia pré-cambriana e aos depósitos minerais associados, como ferro, ouro e topázio, dentre outros. Está localizado na porção central do estado de Minas Gerais, em uma área aproximada de 7.000 Km². Situa-se na borda sul do Cráton São Francisco (Almeida, 1977), conforme figura 30.

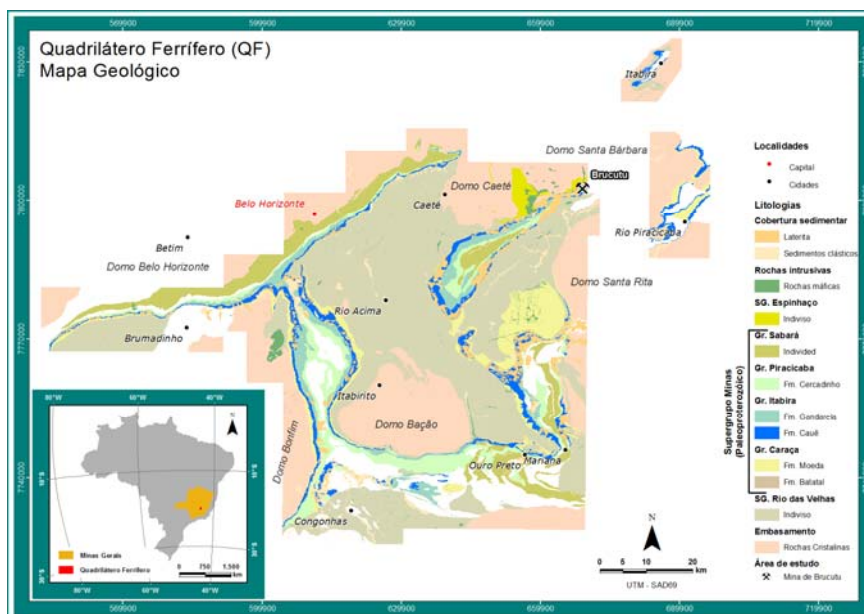


Figura 30 - Mapa geológico regional do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de Lobato et al. 2005. A área utilizada neste estudo, Brucutu, está indicada. Em detalhe o Mapa do Brasil, destacando o estado de MG.

3.1.1 – LITOESTRATIGRAFIA

As formações que compõem o QF englobam as unidades estratigráficas: Embasamento Cristalino Arqueano, o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas, as intrusivas Pós-Minas e o Grupo Itacolomi (Alkmin e Marshak, 1998). Ver Figura 31.

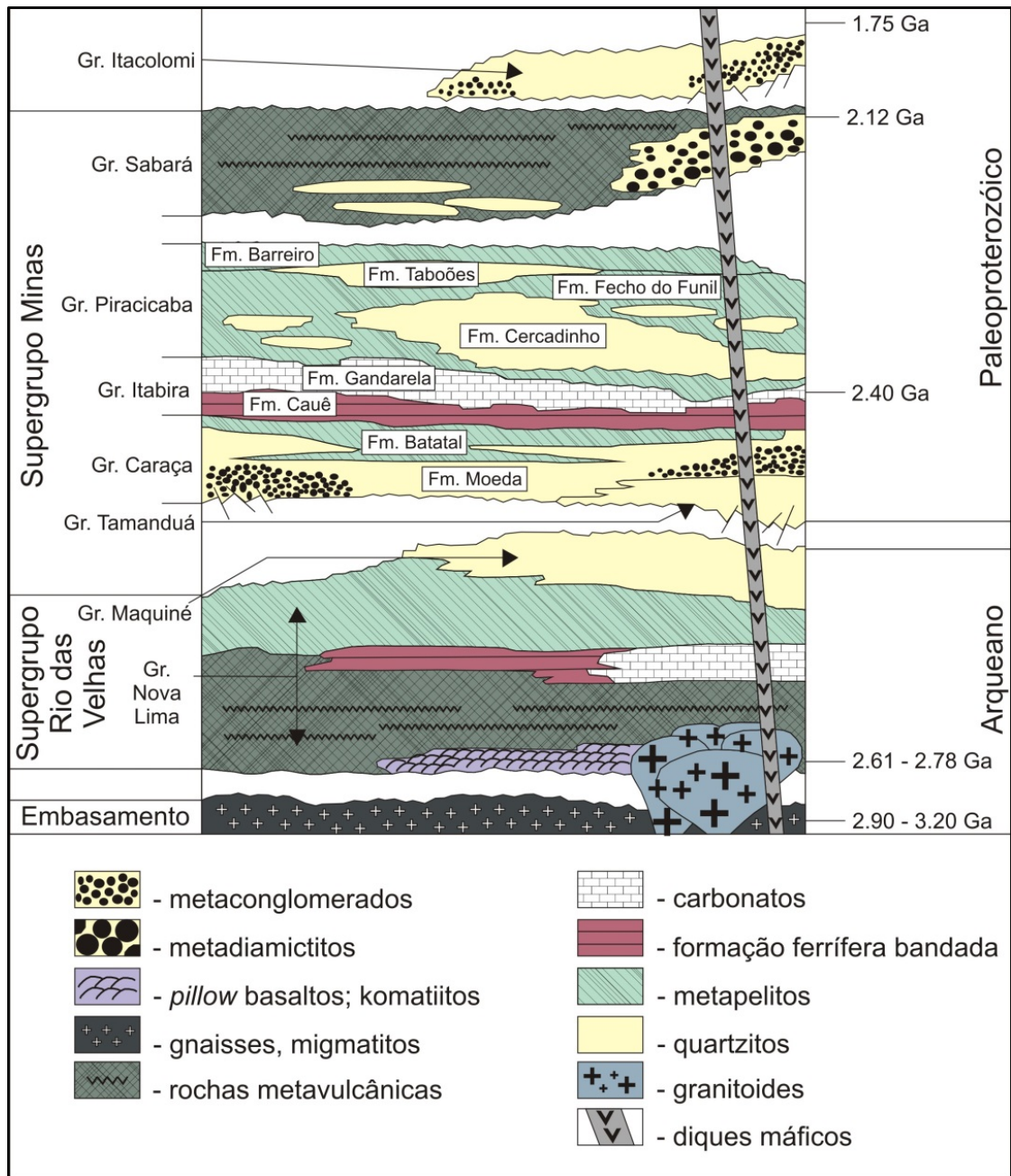


Figura 31 - Coluna estratigráfica generalizada do Quadrilátero Ferrífero. Modificado de Alkmin e Marshak (1998).

Embasamento Cristalino

Dorr (1969) considerou as rochas cristalinas do QF como sendo corpos intrusivos, não levando em consideração a existência de um possível embasamento.

Outros autores, como Ladeira (1980); Teixeira (1982); e Jordt Evangelista e Muller (1986), consideram esses complexos como parte de um antigo embasamento.

Dados radiométricos indicam idade arqueana superior para a maioria dos complexos (Carneiro 1992, Carneiro *et al.* 1993 e Carneiro *et al.* 1995).

As rochas são constituídas essencialmente de terrenos granito-gnaissicos com intrusões de máficas e ultramáficas (Herz 1970, Cordaniet *al.* 1980, Jordt Evangelista e Muller 1986).

O embasamento cristalino é constituído na sua maioria por gnaisses de idade arqueana, formado entre 3,0 e 2,6 Ga e retrabalhado durante o evento Transamazônico (Machado *et. al* 1989). Foram observadas duas gerações de plútons do final do Arqueano, a geração calco-alcalinis e os granitos anorogênicos (Alkmin e Marshak, 1998).

Supergrupo Rio das Velhas

As sequências vulcano-sedimentares tipo greenstonebelts estão representadas pelo Supergrupo Rio das Velhas, que é composto por rochas metassedimentares e metavulcânicas de idade arqueana. O Supergrupo Rio das Velhas encontra-se subdividido nos grupos Nova Lima e Maquiné(Dorret *al.* 1957).

O Grupo Nova Lima é composto por uma sequência de rochas de deposição em bacia marginal ativa (Machado *et al.* 1989) com basalto, komatiito e lava riolítica, intercalados a metassedimentos, e formação ferrífera bandada (BIF) do tipo Algoma, e carbonatos e siliciclastos (Alkmin e Marshak, 1998).

O Grupo Maquiné, uma unidade clástica com até 200 m de espessura, é constituído por duas formações, da base para o topo, denominadas de Palmital (O´ Rourke 1957) e Casa Forte (Gair 1962).

Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas é constituído de metassedimentos plataformais de idade paleoproterozóica, que sobrepõe ao Supergrupo Rio das Velhas, com contato discordante e erosivo (Dorr, 1969).

Encontra-se subdividido nos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Alkmin e Marshak, 1998).

O Grupo Tamanduá, assim como o Grupo Caraça, tem os metassedimentos formados por conglomerados aluvionares e arenitos, gradando para pelitos marinhos em águas rasas.

O Grupo Caraça sobrepõe o Grupo Tamanduá e corresponde a uma sequência clástica basal, aluvial a deltaica ou marinha rasa, composta por conglomerados e quartzitos (Renger *et. al.*, 1994). É composto pelas Formações Moeda (Wallace, 1958) e Batatal (Maxwell, 1958).

O grupo Itabira, de sedimentação químico-clástica, sobrepõe-se ao Grupo Caraça em contato gradacional, e é representado pela Formação Cauê na base, e pela Formação Gandarela no topo (Dorr, 1969).

A Formação Cauê contém essencialmente formações ferríferas do tipo Lago Superior, e algumas lentes de quartzitos ferruginosos e camadas manganésíferas (Dorr, 1969).

A Formação Gandarela é composta principalmente por rochas carbonáticas calcíticas e dolomíticas e, subordinadamente por filitos, metaconglomerados intraformacionais e finas camadas de itabiritos (Dorr, 1969).

O Grupo Piracicaba foi primeiramente dividido em cinco formações, sendo elas a Formação Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões, Barreiro e Sabará (Dorr, 1957).

Mais recentemente, devido às diferenças sedimentológicas da Formação Sabará em relação às outras, associadas a datações de zircões detríticos de 2150 Ma, Renger *et. al.*, (1994), propõem a elevação desta unidade à categoria de grupo.

Essa mudança é reforçada por Alkmin e Marshak (1998), considerando que o Grupo Sabará é, dentre as outras unidades do Supergrupo Minas, uma das mais novas, caracterizando-a como uma unidade depositada em bacia do tipo *foreland*.

Reforçam ainda, que o Grupo Piracicaba é constituído principalmente por metarenitos e filitos e com uma nova mudança na bacia, ocorrendo sedimentação terrígena em águas rasas.

Dessa forma, o Grupo Piracicaba é atualmente dividido nas Formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro.

O Grupo Sabará é constituído por turbiditos, rochas vulcanoclásticas, tufos, conglomerados e diamictitos (Alkmin e Marshak, 1998). A idade de sedimentação, com base na datação do zircão detrítico em grauvaça, é igual ou inferior a 2125 Ma (Machado *et al.* 1989).

Intrusivas Pós-Minas

Herz (1970) relata a presença de veios pegmatíticos pouco espessos que cortam as rochas do Supergrupo Minas.

A norte e noroeste, diques máficos que cortam as rochas do Supergrupo Minas foram datadas com idade de 1,714 Ga (Silva *et al.* 1995)

Alkmin e Marshak (1998), também relatam a presença de diques máficos direcionados para nordeste, e também de veios pegmatíticos pouco espessos cortando as rochas do Supergrupo Minas.

Grupo Itacolomi

O Grupo Itacolomi tem contato discordante erosivo com as rochas do Supergrupo Minas e é composto por quartzitos, quartzitos conglomeráticos e lentes de conglomerado com seixos de itabirito, filitos, quartzitos e veios de quartzo, depositados em ambiente litorâneo ou deltaico (Dorr, 1969).

3.1.2 – GEOLOGIA ESTRUTURAL/TECTÔNICA

Teorias com o intuito de explicar a evolução estrutural e tectônica do Quadrilátero Ferrífero foram propostas por vários autores, mas avanços só ocorreram a partir de 1946, através de um convênio entre o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e o United States Geological Survey (USGS), que resultou em um mapeamento geológico do Quadrilátero Ferrífero na escala de 1:25.000.

Barbosa (1961) propôs 2 fases tectônicas compressivas pós-Minas para a formação desta complexa estruturação.

Dorr (1969) propôs um modelo com três fases deformacionais, com base na morfologia das megaestruturas, sendo a primeira pré-Minas, com deformação dos estratos do Supergrupo Rio das Velhas, a segunda de idade pós-Minas e pré-Itacolomi, de caráter obscuro, e a terceira de idade pós-Itacolomi, a mais expressiva delas, envolvendo todas as rochas pré-cambrianas.

Chemale Jr. *et. al* (1994) propõem a divisão das estruturas do QF em dois grandes grupos, geradas em dois eventos, um extensional e outro compressional. No primeiro, extensional, com idade de 2100 a 1700 Ma, as rochas supracrustais em contato com os terrenos granito-gnáissicos sofreram metamorfismo na fácies xisto verde em zonas de cisalhamento dúctil a dúctil-rúptil. No segundo, compressional EW, com idades entre 650 e 470 Ma, seria constituído de três fases. A primeira, onde as condições de metamorfismo variaram de anquimetamorfismo a anfibolito, e a segunda e a terceira dominadas por retrometamorfismo na fácies xisto-verde. O evento é dominado por um cinturão de dobramentos e empurrões.

Alkmin e Marshak (1998) propõem a ocorrência de pelo menos dois eventos associados à orogenia Transamazônica, sendo primeiro constituído de dobras com vergência para NW e falhas de empurrão que afetaram as rochas supracrustais. O segundo engloba as estruturas que definem a arquitetura em domos e quilhas no QF. A colocação dos domos ocorreria a 2,095 Ga, sendo interpretado como reflexo do colapso orogénico, podendo ter originado bacias intermontanas, onde seriam depositados estreitos pacotes de conglomerados e os sedimentos do Grupo Itacolomi.

Esta superposição de diferentes eventos orogênicos resultou na formação de um gradiente deformacional, com intensidade crescente de oeste para leste (Rosière *et al.* 2001).

3.2 – GEOLOGIA LOCAL

A área utilizada para estudo, a Mina de Brucutu, está localizada na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, no extremo leste do Sinclinal Gandarela, que se formou durante o evento Transamazônico que afetou o QF (Figura 32).

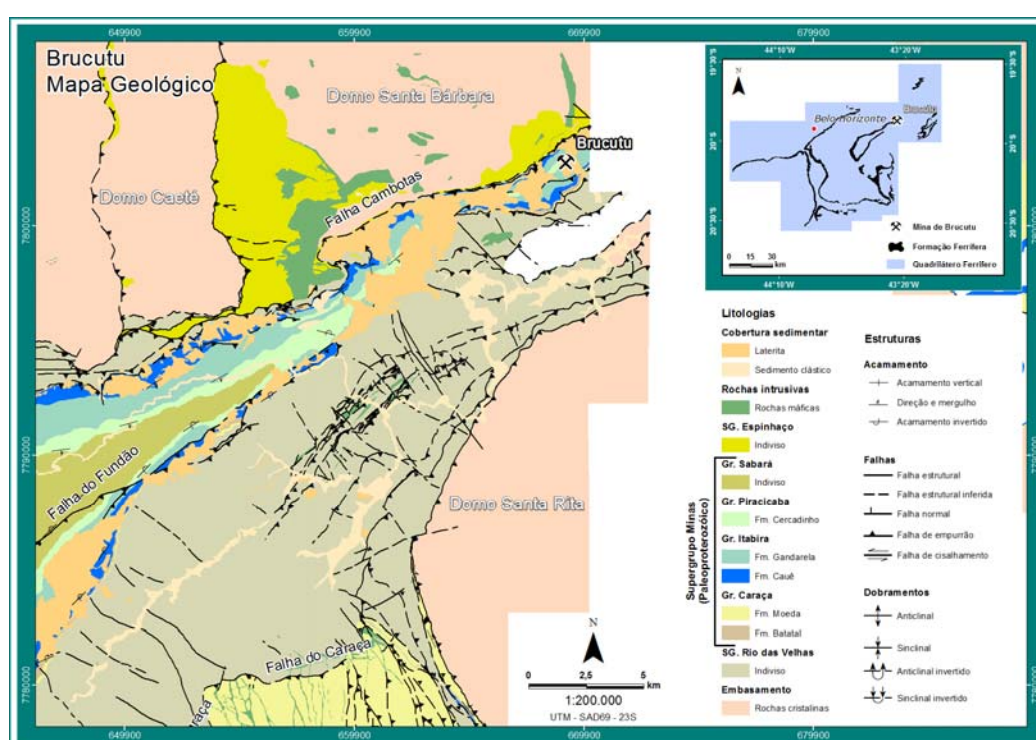


Figura 32. Mapa geológico detalhado e estrutural da área do Sinclinal Gandarela. Modificado de Lobato et al. (2005).

O Sinclinal Gandarela é orientado segundo a direção NE-SW, com estilos estruturais distintos a sudoeste e a nordeste. A estruturação principal das rochas da região apresenta orientação plano axial N45°E e mergulho em torno de 30° para SE (Dorr, 1969).

O Sinclinal Gandarela é cortado por falhas brasileiras, que causaram redobramentos especialmente em sua região nordeste.

No segmento sudoeste, o eixo se bifurca para sul com caimento para norte e para oeste. No outro segmento, o caimento é para SW. Da parte central para NE da estrutura, os limbos, que apresentam mergulhos de 40° a 60°SE, convergem tornando a dobra apertada a isoclinal, produzindo inversão do flanco leste.

Segundo Endo *et al.*, 2004 – (Relatório interno VALE), na região da Mina de Brucutu encontram-se cinco unidades litoestratigráficas, conforme descritas abaixo:

- gnaisses migmatíticos, pertencente ao embasamento cristalino de idade arqueana;
- sequências meta-vulcano-sedimentares, pertencentes ao Grupo Nova Lima, de idade arqueana;
- rochas metassedimentares de origem clástica e clasto-química do Supergrupo Minas, de idades proterozóicas;
- rochas intrusivas máficas a intermediárias metamorfisadas de idades pós-Minas;
- coberturas sedimentares de idade terciária.

3.2.1 – PRINCIPAIS TIPOLOGIAS UTILIZADAS NA MINA DE BRUCUTU

Os principais litotipos encontrados na Mina de Brucutu, assim como as rochas encaixantes que ocorrem na região são descritos abaixo, conforme relatório intitulado “Revisão dos Recursos da Mina de Brucutu” – Relatório Interno Vale – DIPP – Outubro/2011).

- **Hematita Friável (HF):** resultado do enriquecimento supergênico em ferro a partir dos itabiritos. De coloração cinza escura, mostra uma foliação bem desenvolvida, constituída principalmente por especularita fina. Os contatos geológicos com os itabiritos são marcados por descontinuidades no teor de ferro, embora algumas vezes possa apresentar-se gradacional. O teor médio de ferro global é de 64,65% e os teores de contaminantes são baixos;

- **Hematita Semi-Compacta (HS):** hematita de coloração cinza escuro, com teor médio de ferro global de 65,45%, e possui baixos teores de contaminantes. Possui ocorrência restrita na mina, apresentando-se normalmente na forma de pequenos corpos lenticulares;
- **Hematita Compacta (HC):** hematita compacta de coloração cinza escura, apresentando uma foliação incipiente, com planos de fraturas bem desenvolvidos. Geralmente ocorre como corpos lenticulares de pouca espessura e continuidade, com ocorrência restrita na mina. O teor médio de ferro global é de 66,39%.
- **Hematita Aluminosa (HAL):** hematita friável de coloração amarela, foliada, mostrando níveis e/ou bolsões argilosos associados com rochas intrusivas, ora concordantes ora discordantes. O teor médio de ferro global é de 60,75% e o teor médio de alumina global igual a 3,96%.
- **Hematita Goethítica (HGO):** hematita de coloração avermelhada, rica em goethita, ocorrendo de friável a semi-compacta. Apresenta valores altos de perda ao fogo, em média 4,65%. Ocorre em corpos lenticulares geralmente entre a canga e as hematitas friáveis. O teor médio de ferro global é de 62,26%;
- **Hematita Anfibolítica (HA):** é friável, resultado do enriquecimento supergênico a partir dos itabiritos anfibolíticos. Apresenta-se geralmente como uma massa argilosa de coloração amarelo-ocre, podendo ser facilmente diferenciada visualmente dos outros litotipos quando são observados pseudomorfos de anfibólio. Tem ocorrência mais notável na porção centro sul da mina, próximo à superfície. Contém teor médio de ferro global de 60,50% e valores mais elevados de contaminantes como perda ao fogo (valor médio global de 7,26%) e fósforo (teor médio global de 0,120%);
- **Hematita Manganésifera (HMN):** friável, de cor bem marcada pela tonalidade cinza escuro fosco devido aos teores mais altos de manganês. Apresenta teor médio de ferro global de 60,17%, teores médios de manganês de 2,31%, com ocorrência bastante restrita;

- **Itabirito Friável (IF):** é o litotipo predominante na Mina de Brucutu. Tem coloração cinza e apresenta-se bastante friável. O bandamento de quartzo e hematita é, entretanto, bem visível. Os teores de contaminantes são baixos e o teor médio de ferro global é de 47,54%. Podem ser observados itabiritos friáveis ricos próximos à superfície, logo abaixo das hematitas, passando a itabiritos friáveis pobres em profundidade;

- **Itabirito Semi-Compacto (IS):** compreende itabiritos com teor médio de ferro global de 38,62%. Tem coloração cinza claro e ocorre muitas vezes associado ao itabirito compacto. Pode ser observado em poucos afloramentos na mina;

- **Itabirito Compacto (IC):** ocorre em profundidade, com raros afloramentos na mina. Tem coloração cinza claro, com bandamentos bem marcados por hematita e quartzo. Contém teor médio de ferro global de 37,71% e baixos teores de contaminantes.

- **Itabirito Aluminoso (IAL):** friável, possui coloração amarela, constituído por alternância de bandas de hematita, quartzo e/ou bandas de material argiloso. Mostra uma foliação bem desenvolvida. Ocorre associado com rochas intrusivas básicas. O teor médio de ferro global é de 39,99% e de alumina de 4,90%.

- **Itabirito Goethítico (IGO):** itabirito hidratado, rico em goethita, de coloração marrom-avermelhada. A goethita ocorre principalmente preenchendo poros de itabiritos friáveis ou pela hidratação de martita. Ocorre em regiões próximas à superfície e associado a zonas de falhas e fraturas. Apresenta teor médio de ferro global de 49,95% e valor médio de perda ao fogo de 3,98%;

- **Itabirito Dolomítico (IDO):** apresenta ocorrência restrita à porção oeste e central da mina, sendo esta última muito pouco expressiva. Aparece na base da formação ferrífera, em contato com xistos. Compreende itabiritos compactos, com teor médio de ferro global de 32,50% e valores globais mais elevados de cálcio e/ou magnésio, quando comparados com os demais litotipos. Apresentam em média teores globais de cálcio de 2,79%, de magnésio de 4,39% e perda ao fogo de 7,68%;

- **Itabirito Manganésífero (IMN):** ocorre geralmente no contato com os quartzitos do Grupo Piracicaba. É friável e possui cor cinza escuro fosco devido ao alto teor de manganês. Apresenta teor médio de ferro global de 32,28% e teor médio de manganês global mais elevado, igual a 2,26%. Localmente podem ocorrer teores mais altos de manganês, inclusive acima de 10%;

- **Itabirito Anfibolítico (IA):** itabirito de coloração amarelo-ocre, geralmente bandado, com bandas de quartzo, hematita/martita e anfibólio, quando não alterado. Durante o intemperismo o anfibólio é alterado, resultando na formação de goethita. As goethitas ocorrem como pseudomorfos de anfibólio, com *habitus* fibroso. Os itabiritos anfibolíticos ocorrem próximo à base da formação ferrífera e constituem níveis bastante contínuos. Apresentam teor médio de ferro global de 43,73% e valores altos de perda ao fogo, em média 5,31%.

- **Canga (CG):** de coloração avermelhada, é formada por fragmentos de hematita e itabirito cimentados por goethita. Tem espessura variável na mina, desde poucos metros até cerca de 60 m. O teor médio de ferro global é de 58,53%. Apresenta teores médios altos de contaminantes, sendo Al_2O_3 de 4,51 % e P igual a 0,126%. O valor médio de perda ao fogo é de 7,10%;

- **Aterro (AT):** aterros diversos (forros, pilhas, etc.);

- **Intrusiva (IN):** rochas metabásicas, encontradas na forma de massas argilosas de coloração amarela. Na mina, apresentam-se bastante alteradas, com granulação fina e foliação irregular. Ocorrem geralmente concordantes com a estruturação principal das rochas encaixantes (formação ferrífera);

- **Quartzito (QT):** predominantemente quartzitos ferruginosos, subordinadamente ocorrem xistos e filitos carbonosos. Têm ocorrência mais restrita à porção oeste da mina, distribuindo-se ao longo de uma faixa de direção NE-SW com a espessura diminuindo de SW para NE;

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA APLICADA

4.1 – INTRODUÇÃO

O fluido denominado convencional, comumente conhecido por lama convencional, tem como principal componente a bentonita, e possui as seguintes características:

- ✓ Requer controle de bentonita;
- ✓ Permite altas perdas por filtrações em formações permeáveis - alto filtrado;
- ✓ Hidrata a argila (bentonita);
- ✓ Altamente sensível a mudanças de litologia (cálcio e magnésio floculam a lama, ou seja, desidratam a lama e separam as fases);
- ✓ Produz cake muito espesso, aumentando o torque da ferramenta;
- ✓ Exige menor taxa de penetração. É necessário grande quantidade de bentonita. Esta dispersa, contribuindo para o aumento de percentual de sólidos na lama;
- ✓ Acelera a hidratação da argila, pois tem filtrado elevado;
- ✓ Gelifica após 24 horas em repouso;
- ✓ Custo mais baixo, de aproximadamente R\$ 12,00/ m³ (Fonte Geosol).

Já no fluido denominado polimérico, comumente conhecido por Lama Polimérica, tem-se a utilização de polímeros. Possui as seguintes características:

- ✓ Permite total controle reológico;
- ✓ Permite controle total de filtrado API da formação;
- ✓ Permite controle do reboco, evitando aumento de torque;
- ✓ Permite maior recuperação do material friável, minimizando os problemas de limpeza do furo, reduzindo “*sujeira*”;

- ✓ Permite maior taxa de penetração, pois não gera sólido. O polímero dissolve, não contribuindo para aumento no teor de sólidos. É utilizado em dosagens 25 vezes menores que bentonita;
- ✓ Os polímeros minimizam os efeitos da perda de lama, aumentando assim a possibilidade de se trabalhar com toda ou parte da coluna preenchida por fluido permitindo maior flutuação da ferramenta e reduzindo o desgaste prematuro da coroa e ferramental, e mantendo o furo estável;
- ✓ Permite o controle de decantação dentro do furo quando cessado o bombeamento, através do controle tixotrópico;
- ✓ Custo mais alto, de aproximadamente R\$ 63,00/ m³ (Fonte Geosol).

4.2 – METODOLOGIA

Com o intuito de se obter dados para análise da influência do fluido e do monitoramento dos parâmetros de perfuração na eficiência da sondagem do minério de ferro, foram executados cinco furos de sondagem. A metodologia utilizada compreende as etapas descritas abaixo:

ETAPA 01 - Desenvolvimento Operacional

Devido às dificuldades históricas encontradas na perfuração em Brucutu, a metodologia escolhida para este trabalho define a telescopagem dos furos, ou seja, os furos iniciaram com Diâmetro P, ocorrendo primeiramente a redução para o Diâmetro H e posteriormente a redução para o diâmetro N. Desta forma, toda a parte inicial do furo, predominante friável, e com maior possibilidade de desmoronamento e perda de lama, fica automaticamente revestida pela haste P (Tabela 10).

Anteriormente, a perfuração iniciava com diâmetro H. Após passar pela parte friável, o furo era reaberto com broca tricône (5,5”), para posterior inserção de revestimento HWL. A perfuração continuava em diâmetro H e a redução para diâmetro N somente ocorria devido a trancamento dos furos.

Portanto, em caso de trancamentos e outros problemas operacionais, acrescentamos mais uma opção de redução do furo, aumentando as possibilidades de atingir a profundidade programada e o objetivo previsto.

Importante salientar que historicamente no diâmetro P a recuperação é melhor, porém a taxa de penetração é menor. À medida que o furo se aprofunda e encontra rochas mais compactas, de melhor recuperação, é possível reduzir o diâmetro e imprimir maior rotação na coluna de perfuração, produzindo melhores taxas de avanço, sem prejuízo da recuperação global do furo.

Adicionalmente, foi adotado o regime *full time* na realização desses furos, ou seja, a sondagem ocorreu sem interrupções nos finais de semana, operando por 24 horas durante todo o período de execução dos furos. Dessa forma, aumentou-se o tempo de utilização, evitando paradas com, por exemplo, lavagem do furo.

Tabela 10. Medidas de componentes de perfuração.

Diâmetro	Haste (Ø int)	Haste (Ø ext)	Testemunho (Ø)
PQ	101,60	114,30	84,80
HQ	77,80	88,90	63,30
NQ	60,00	69,90	47,40
Unidade	mm	Tolerância	± 0,1 mm

Foram também considerados os relatos dos sondadores, os problemas operacionais encontrados e as alterações nos parâmetros de perfuração.

Com o objetivo de “fixar” a litologia, os furos foram escolhidos visando atravessar a mesma sequência estratigráfica dentro da formação ferrífera de Brucutu, que está alinhada na direção NE-SW.

Outro fator considerado foi a fixação do equipamento e das equipes para reduzir as influências externas. A empresa responsável pela execução dos furos de sondagem foi a Geosol Geologia e Sondagens S/A. O equipamento utilizado foi a sonda Hidráulica, CS-14, da Atlas Copco.

A figura 33 mostra os locais da realização dos furos de sondagem rotativa na Mina de Brucutu.

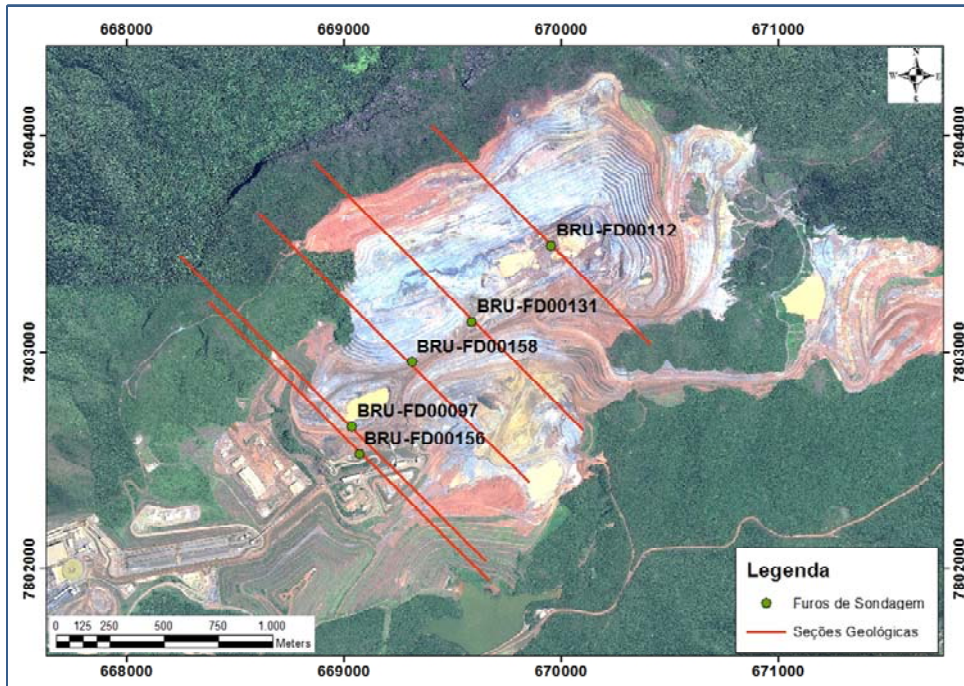


Figura 33. Localização dos furos de sondagem utilizados no estudo.

Os furos foram executados conforme informações da Tabela 11.

Tabela 11. Furos utilizados para coleta de dados.

<i>FURO</i>	<i>PROFUNDIDADE (m)</i>	<i>RECUPERAÇÃO (%)</i>	<i>INCLINAÇÃO (°)</i>	<i>TEMPO EXECUÇÃO (dias)</i>
BRUFD00131	362,05	95,97	80	18
BRUFD00158	370,05	88,11	75	18
BRUFD00156	470,50	94,75	90	24
BRUFD00112	324,80	90,90	80	14
BRUFD00097	373,05	88,25	90	26

ETAPA 02 - Formulação do Fluido e Monitoramentos Executados

Para permitir a comparação dos resultados, cada furo foi executado com variações diferentes no fluido e também com diferentes escalas de monitoramento.

Para o furo BRUFD00112, foi utilizado somente o fluido polimérico. Para os outros quatro furos, foi utilizada a combinação de ambos os fluidos, iniciando com o fluido convencional e alterando para polimérico no decorrer da perfuração.

Além disso, os monitoramentos ocorridos durante a perfuração foram diferenciados por furo, sendo monitorados os principais parâmetros de perfuração ou as propriedades do fluido, ou a combinação de ambos os monitoramentos.

Para todos os cinco furos, foram monitoradas e ajustadas a composição do fluido, de acordo com os resultados apresentados. A figura 34 demonstra o descrito acima.

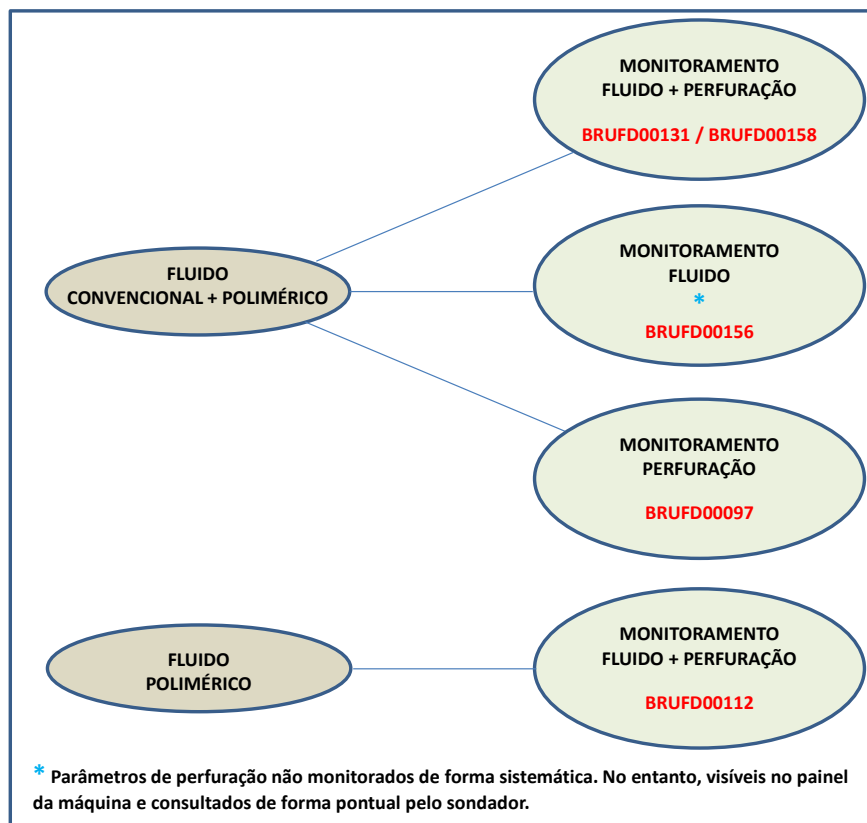


Figura 34. Resumo simplificado da metodologia aplicada – execução dos furos.

ETAPA 03 – Confirmação dos Litotipos, Contatos, e Avaliação do Maciço Rochoso

Para garantir a confiabilidade das informações utilizadas, além da formulação do fluido, foram considerados na avaliação e comparação os seguintes itens:

- perfilagem geofísica executada nos furos, por meio do métodos gama natural e gama-gama, para garantir a confiabilidade dos dados, com uma melhor definição dos contatos, e auxiliar na interpretação dos problemas operacionais. Dados provenientes do caliper também contribuíram para avaliação de possíveis desmoronamentos das paredes do furo. Com exceção do furo BRUFD00097, todos os demais contaram com a execução da perfilagem, sendo que para o furo BRUFD00158, a execução foi parcial.
- descrições geológicas dos furos, com características de cada litologia;
- descrições geotécnicas, com parâmetros para classificação do maciço rochoso.

ETAPA 04 - Investigação de Possíveis Interferências das Litologias Perfuradas

Com o intuito de investigar as interferências positivas e negativas das litologias perfuradas, foram coletadas amostras, nos furos BRUFD00131 e BRUFD00158, nos horizontes onde houve perda frequente de lama. Estas foram submetidas às seguintes análises:

- ✓ Peneiramento a úmido para avaliar a geração de lama da própria amostra e obter a distribuição granulométrica das rochas;
- ✓ Caracterização química, buscando identificar elementos maiores e traços (cálcio, magnésio);
- ✓ Confecção e análise de seções polidas, feitas com as porções restantes, para identificação de óxidos e contaminantes;
- ✓ Caracterização da lama produzida por difratometria de raios X.

ETAPA 05 - Efeitos da Metodologia na Produtividade e Custo

Além disso, procurou-se avaliar os efeitos da metodologia com foco na produtividade e no custo, quando se utiliza um fluido de perfuração adequado, com monitoramento dos parâmetros de perfuração.

4.2.1 – COLETA DE DADOS E INFORMAÇÕES REFERENTES AOS FUROS DE SONDAGEM

Para cada furo, foram coletados os seguintes dados e informações:

Problemas relacionados ao Fluido de Perfuração: foi observado, por intervalo geológico, se a perfuração ocorreu normalmente, se houve perda de lama, e se houve prisão da camisa, trancamento de ferramental ou prisão diferencial.

Acompanhamento dos parâmetros de perfuração: diâmetro do furo, avanço, recuperação, taxa de penetração, RPM, pressão e torque.

Descrição Geológica: litologias perfuradas e descrição detalhada.

Descrição Geotécnica: grau consistência, grau alteração, grau faturamento e % RQD.

Perfilagem Geofísica: perfilagens gama natural e gama gama, com confirmação/ajuste dos contatos e Caliper, com a medição contínua das alterações do diâmetro dos furos.

Formulação do fluido: fluido convencional ou polimérico, com inserção de aditivos.

Propriedades da Lama: viscosidade funil, pH, peso, % sólidos poço, % sólidos retorno, cake, filtrado, gel inicial, gel final, viscosidade aparente, viscosidade plástica, e limite de escoamento.

4.2.2 – PRODUTOS UTILIZADOS NO FLUIDO DE PERFURAÇÃO

Neste tópico serão apresentados os produtos utilizados na confecção do fluido de perfuração, com composição, função e dosagem, dentre outras informações (Tabela 12).

Importante observar que, apesar da avaliação da influência do tempo de mistura dos componentes do fluido e do tipo de misturador utilizado não ser objeto deste estudo, observa-se, na prática, que as recomendações dos fabricantes não são respeitadas. Uma preparação adequada deve melhorar o desempenho.

Tabela 12. Produtos utilizados no fluido de perfuração.

VISCOSIFICANTES				
PRODUTO	Empresa	COMPOSIÇÃO	FUNÇÃO	DOSAGEM
CELUTROL HV1 (Alta Viscosidade)	System Mud	Carboximetilcelulose de sódio (CMC)	Controle de filtrado Redutor de filtrado de alta viscosidade / Reduz perdas por filtrações em formações permeáveis / Aumenta a estabilidade do furo / Melhora a limpeza dos recortes durante a perfuração	1 a 5 kg/1000 l
SUPERVIS RD (Rápida Dispersão)	System Mud	PHPA (Policrilamida parcialmente Hidrolizada)	Viscosificante encapsulador de argilas Evita a expansão das argilas com alto poder de encapsulação	0,5 kg/1000 l
GOMA GEL	System Mud	Biopolímero Goma Xantana	Agente tixotrópico Proporciona excelentes características tixotrópicas e reológicas para o fluido / Minimiza os problemas de limpeza do furo / Evita desagregação / desmoronamento nas formações inconsolidadas, estabilizando-as.	Até 2 kg/1000 l
SM 2000	System Mud	Polímero Sintético Policrilamida de Sódio	Viscosificante líquido de alto rendimento Previne o aprisionamento de brocas e coroas em formações argilosas / Maior limpeza e estabilidade dos furos / Lubrifica a coroa e coluna de perfuração, reduzindo atritos abrasivos	1 a 2 l/1000 l
LUBRIFICANTES				
PRODUTO		COMPOSIÇÃO	FUNÇÃO	DOSAGEM
CASE LUBE	System Mud	Graxa Vegetal	Graxa lubrificante para Hastes Utilizado para perda de retorno de fluido durante a operação / Reduz significativamente o torque necessário para movimentar a coluna de perfuração	Camada de 2 a 3 mm sobre a haste ou 200 g/m
CASE LUBE R	System Mud	Graxa Vegetal	Graxa lubrificante para Revestimentos Utilizado para facilitar a retirada do revestimento	Camada de 2 a 3 mm sobre o revestimento ou 200 g/m
TORQ LUBE	System Mud	À Base de Óleo Vegetal	Lubrificante para rocha dura Lubrificante de corte / Aumenta a lubrificação / Aumenta a velocidade de penetração /	1 a 10 kg / 1000 l
ÓLEO DE SOJA	-	Lubrificante Umectante	Lubrificação Para evitar prisão diferencial	1 l/1000 l

ADITIVOS				
PRODUTO		COMPOSIÇÃO	FUNÇÃO	DOSAGEM
SM THIM	System Mud	Polímeros de baixo peso molecular	Afinante / Dispersante ou redutor de Viscosidade Afinante de fluido de perfuração a base de bentonita / Dispersante de argila / Evita aprisionamento de coroas / Evita entupimento de hastes e coroas. Utilizado em prisão diferencial (tratativa química)	Até 10 kg/m ³
CAKE FIX	System Mud	Emulsão Polimérica	Agente Fixador de reboco Recobre a parede do furo com uma camada flexível e plastificada	1 l/1000 l
SUPER EXPAND	System Mud	Polímero (policrilamida) expansivo	Selamento/ Formação de Tampões Controlador de perda de circulação/Alto poder de hidratação/Utilizado para tapar fissuras e fraturas responsáveis por perdas de circulação (até 30 mm)	1,20%
BLACK FURE	MI SWACO	Polímero	Formador de reboco Função similar à do Cake Fix	1 l/1000 l
SAND FIX	System Mud	PHPA Com PLUG	Viscosificante e Controlador de Perda de Circulação Tampa os poros do material friável evitando penetração do fluido	1 a 2 kg/m ³
MAXCAP	System Mud	Polímero	Formador de Reboco e Viscosificante líquido Função similar à do Cake Fix. Produto em pó, precisa de agitação.	1 a 2 kg/m ³
AMC BV (baixa Viscosidade)	System Mud	CMC baixa viscosidade	Controle de Filtrado Redutor de Filtrado de baixa viscosidade	1 kg/m ³
BIO GRAXA	VGBIO	Graxa Vegetal	Graxa lubrificante para Revestimentos Utilizado para facilitar a retirada do revestimento	Camada de 2 a 3 mm sobre o revestimento ou 200 g/m
BARRILHA	System Mud	Sal inorgânico solúvel na forma de carbonato de sódio (Na ₂ CO ₃)	Controlador de Dureza e pH	De 0,1 kg/m ³ a 5 kg/m ³
DRILLPAPER	MI SWACO	Basicamente Mistura de Papel Picado e Algodão	Selamento/ Perda de Circulação Para tapar fissuras/fraturas responsáveis por perdas de circulação (> 30 mm)	1 kg/1000 l
BENTONITA				
BENTONITA	CBB	Argila cálcica transformada para sódica. Bentonita ativada e aditivada. Na sua composição já possui alguns corretoras (CMC, Goma Xantana, CMC de baixa viscosidade)	Agente tixotrópico e formador de reboco A bentonita tem todas as características (doa viscosidade, reduz filtrado, lubrifica), porém não nas quantidades corretas. Apesar de aditivada, ainda é preciso inserir os corretores.	25 kg/1000 l

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

5.1 – DADOS HISTÓRICOS DA PERFURAÇÃO EM BRUCUTU

A execução de sondagem na mina de Brucutu sempre foi marcada por episódios de prisão de ferramental em furos de sondagem. Utilizando a base de dados da Vale de 2011, 2012 e 2013, é possível destacar os seguintes dados:

Em 2011, houve trancamento em 47% dos furos com profundidade > 100,00 m, sendo que 59% não atingiram o objetivo ou atingiram de forma parcial, e 18% foi perdido, havendo necessidade de reiniciar o furo, ou de iniciar outro furo dando continuidade.

Em 2012, houve trancamento em 57% dos furos com profundidade > 100,00 m, sendo que 53% não atingiram o objetivo ou atingiram de forma parcial, e 21% foi perdido, devendo havendo a necessidade de reiniciar o furo, ou iniciar outro furo dando continuidade.

Em 2013 a estatística não foi diferente. Houve trancamento em 59% dos furos com profundidade > 100,00 m, sendo que 55% não atingiram o objetivo ou atingiram de forma parcial, e 23% foi perdido, devendo havendo a necessidade de reiniciar o furo, ou iniciar outro furo dando continuidade. A tabela 13 detalha estas informações:

Tabela 13. Resumo simplificado dos dados dos furos executados em Brucutu nas campanhas de 2011, 2012 e 2013.

Campanha	Total Furos (> 100 m)	Total Furos Trancamento		Total Furos Objetivo não Atingido		Total Furos Perdidos ou Reiniciados	
		Furos	%	Furos	%	Furos	%
2011	17	8	47	10	59	3	18
2012	47	27	57	25	53	10	21
2013	22	13	59	12	55	5	23
Média	29	16	54	16	56	6	21

Dos registros existentes, pode-se avaliar que a maioria dos problemas operacionais não foram detectados a tempo de se aplicar uma solução. A redução de diâmetro e consequente revestimento do furo era praticamente a única forma de intervenção, quando o furo, devido às ocorrências não percebidas, já estava com alto grau de comprometimento.

Importante ressaltar que a medida é eficiente, porém só se podia aplicar uma vez, visto que o furo não era iniciado com diâmetro P, e sim com diâmetro H, com possibilidade de redução somente de H para N.

A tabela 14 complementa as informações anteriores, e apresenta detalhes sobre os furos com profundidade > 300,00 m, para futura comparação com os furos selecionados para este estudo.

Tabela 14. Resumo simplificado da performance de execução dos furos com profundidade superior a 300 m, executados em Brucutu nas campanhas de 2011, 2012 e 2013.

Campanha	Furos (> 300 m)	Período (dias)	Taxa Penetração (m/dia)	Média Profundidade (m)	Produtividade Média (m)
2011	5	41	8,02	329	241
2012	8	26	14,08	337	422
2013	12	30	12,50	375	375
Média	8	34	10,80	363	346

5.2 – FUROS EXECUTADOS COM APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

5.2.1–BRUFD00131

A. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA

Em relação à compacidade, é possível dividir o furo BRUFD00131 em duas faixas, como descrito a seguir (Anexo I.1):

A primeira faixa (0,00 m - 175,00 m) é predominantemente friável, compostapricipalmente de itabiritos friáveis, com passagens de itabirito manganésífero friávele itabirito argiloso friável.

Nasegunda faixa (175,00 m- 362,05 m), a predominância é de itabiritos compactos, com intercalações de itabiritosanfíbolíticos friáveis a compactose algumas passagens de quartzitos ferruginosos friáveis e veios de quartzo, finalizando com xistos friáveis a compactos.

B. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA

Na primeira faixa (0,00 m - 175,00 m), as passagens rochosas se apresentam predominantemente friáveis, e são,em sua maioria,extremamente macias, alteradas e desagregadas ou fragmentadas.

Na segunda faixa (175,00 - 362,05 m), as passagens rochosas predominantemente compactas apresentam grau de consistência de médio duro a duro, estandofragmentadas a intensamente fraturadas.

C. HISTÓRICO DA PERFURAÇÃO

- ✓ Escala de perfuração – 3 turnos de 8 horas sem paralisação ecom perfuração constante.
- ✓ Diâmetro inicial – PQ.

- ✓ Fluidos Utilizados – fluido convencional + fluido polimérico.
- ✓ Monitoramentos – propriedades do fluido + parâmetros de perfuração.

Formulação Inicial do fluido de perfuração – convencional à base de bentonita, até a profundidade de 153,70 m (Tabela 15).

Tabela 15. Formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00131.

Produto	Quantidade	Função
Bentonita	25 kg	Agente tixotrópico e formador de reboco, componente principal do fluido.
Celutrol	400 g	Redutor de filtrado de alta viscosidade, para reduzir perdas por filtrações e auxiliar na limpeza do furo.
Supervis	50 g	Viscosificante encapsulador de argilas, para evitar a expansão de argilas.
Barrilha	400 g	Controle de dureza e pH.

0,00 m - 91,00 m =>Aperfuração ocorreu normalmente, sem problemas operacionais.

91,00 m - 96,00 m => Surgem asprimeiras alterações no torque e na pressão, com considerável perda de lama em torno de 91,00m, na litologia IF. Como ação controladora, acrescentou-sealguns produtos à formulação do fluido, conforme Tabela 16.

Tabela 16. Complemento à formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00131.

Produto	Quantidade	Função
Goma Gel ou Goma Xantana	300 g	Agente tixotrópico, para minimizar os problemas de limpeza do fluido e auxiliar na estabilização das paredes do furo.
Cake Fix	500 ml	Agente fixador de reboco.
Super Expand	1 l /1000 l	Controlador de perda de circulação, para tapar fissuras e fraturas de até 30 mm (adicionado juntamente com papel picado).

96,00 m – 116,65 m =>As ações reparadoras foram suficientes para manter a coluna preenchida por fluido, mas a perda de lama manteve-se em menor escala nas litologias IMNF e IARF, e o torque seguiu descontrolado, indicando que a limpeza não estava sendo eficiente, devido à perda de fluido.

116,65 m =>Como solução, o diâmetro do furo foi reduzido para HQ, uma vez que todo o intervalo já perfurado foi revestido em HW, eliminando assim a possibilidade de perda de lama no intervalo perfurado em P.

153,70 m => Ao perfurar a camada de itabirito argiloso friável, a camisa não saiu. Foi injetado no furo um tampão viscoso, cuja formulação é dada na Tabela 17.

Tabela 17. Formulação do tampão viscoso para o furo BRUFD00131.

Produto	Quantidade	Função
Goma Gel ou Goma Xantana	600 g	Agente tixotrópico, para minimizar os problemas de limpeza do fluido e auxiliar na estabilização das paredes do furo.
SM 2000 ou Policrilamida de sódio	500 ml	Viscosificante líquido de alto rendimento, para prevenir o aprisionamento de coroas em formações argilosas, garantir maior limpeza e estabilidade do furo, lubrificar coroa e coluna de perfuração, reduzindo atritos abrasivos.
Óleo de Soja	3 l/m ³	Lubrificante para evitar prisão diferencial.

Após, adicionou-se ao fluido 200 ml de Maxicap para formar novamente um reboco, e 400 ml de Black Fure para garantir um reboco fino e consistente.

157,20 m => Substituição do fluido convencional pelo fluido polimérico na camada de itabirito argiloso friável. O objetivo é obter melhor controle dos parâmetros reológicos e hidrostáticos. A formulação do fluido polimérico passa a ser conforme Tabela 18.

Tabela 18. Formulação do fluido polimérico para o furo BRUFD00131.

Produto	Quantidade	Função
Celutrol	400 g	Redutor de filtrado de alta viscosidade, para reduzir perdas por filtrações e auxiliar na limpeza do furo.
Barrilha	400 g	Controle de dureza e pH.
Goma Gel ou Goma Xantana	600 g	Agente tixotrópico, para minimizar os problemas de limpeza do fluido e auxiliar na estabilização das paredes do furo.
Cake Fix	300 ml	Agente fixador de reboco.
Óleo de Soja	1 a 4 l/m ³	Lubrificante para evitar prisão diferencial.
Óleo Solúvel	1 l/m ³	Lubrificante para evitar prisão diferencial.
SM 2000 ou Policrilamida de sódio	200 ml	Viscosificante líquido de alto rendimento, para prevenir o aprisionamento de coroas em formações argilosas, garantir maior limpeza e estabilidade do furo, lubrificar coroa e coluna de perfuração, reduzindo atritos abrasivos.

175,10 m => A camisa não saiu, ao perfurar uma passagem de xisto friável. Foi inserido novo tampão viscoso e, posteriormente, Maxicap e Black Fure.

A partir desta profundidade, as litologias perfuradas são predominantemente compactas, porém bastante fraturadas.

175,10 – 362,05 m => A perfuração seguiu normalmente, sem problemas operacionais, até a conclusão do furo em 362,05 m, havendo apenas pequenos sinais de perda de lama em torno de 236,35 m, na litologia IC, e a adição de Maxicap e Black Fure foram suficientes para eliminar as perdas.

362,05 m => Conclusão do furo.

5.2.2 – BRUFD00158

A. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA

Em relação à compacidade, é possível dividir o furo BRUFD00158 em cinco faixas, como descrito a seguir (ver Anexo I.2):

A primeira faixa (0,00 m - 96,00 m) é predominantemente friávele composta principalmente de itabiritos friáveis, com passagens de itabirito manganésífero friável e itabirito goethítico friável.

Na segunda faixa (96,00 m- 122,30 m), mais hidratada, a predominância de litotiposé de itabiritos goethíticos friáveis a compactos.

A terceira faixa (122,30 m - 179,55 m) é friável, composta por itabirito friável e quartzito ferruginoso friável.

Na quarta faixa (179,55 m -285,00 m) ocorre a predominância de itabirito compacto, com intercalação de itabirito goethíliccompacto.

Na quinta faixa (285,00 m - 370,05 m) predominam formações friáveis, passando por itabiritos e quartzitos, e finalizando o furo com filitosséricíticos friáveis a compactos.

B. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA

Na primeira faixa (0,00 m - 96,00 m) as passagens rochosas, por se apresentarem predominantemente friável, são em sua maioria macias, alteradas e intensamente fraturadas.

A segunda faixa (96,00 m - 122,00 m) apresenta-se intensamente alterada e completamente fraturada.

A terceira faixa (122,30 m - 179,55 m) apresenta grau de consistência macio, sendo altamente alterada e muito fraturada.

A quarta faixa (179,55 m - 285,00 m) apresenta grau de consistência duro, e mostra-se moderadamente alterada e muito fraturada.

A quinta faixa (285,00 m - 370,05 m) apresenta grau de consistência macio a médio, estando altamente alterada e muito fraturada. Os filitos apresentam-se menos alterados, porém igualmente fraturados, sendo mica a descontinuidade observada.

C. HISTÓRICO DA PERFURAÇÃO

- ✓ Escala de perfuração – 3 turnos de 8 horas, sem paralisação e com perfuração constante.
- ✓ Diâmetro inicial – PQ
- ✓ Fluidos Utilizados – fluido convencional + fluido polimérico.
- ✓ Monitoramentos – propriedades do fluido + parâmetros de perfuração

Formulação inicial do fluido de perfuração - convencional à base de bentonita, até a profundidade de 122,30 m (Tabela 19).

Tabela 19. Formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00158.

Produto	Quantidade	Função
Bentonita	25 kg	Agente tixotrópico e formador de reboco, componente principal do fluido.
Celutrol	400 g	Redutor de filtrado de alta viscosidade, para reduzir perdas por filtrações e auxiliar na limpeza do furo.
Supervis	50 g	Viscosificante encapsulador de argilas, para evitar a expansão de argilas.
Barrilha	400 g	Controle de dureza e pH.
Goma Gel ou Goma Xantana	300 g	Agente tixotrópico, para minimizar os problemas de limpeza do fluido e auxiliar na estabilização das paredes do furo.

0,00 m - 65,45 m =>A perfuração ocorreu normalmente, sem problemas operacionais.

65,45 m => A partir de 65,45 m,observa-se aumento de pressão ao perfurar a litologia IMNF. Provavelmente houve entupimento das saídas da coroa.

71,55 m => Promoveu-se a troca total do fluido para limpeza do furo e acrescentou-se alguns produtos na formulação do fluido conforme Tabela 20.

Tabela 20. Complemento à formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00158.

Produto	Quantidade	Função
Cake Fix	500 ml	Agente fixador de reboco.
SM 2000 ou Policrilamida de sódio	500 ml	Viscosificante líquido de alto rendimento, para prevenir o aprisionamento de coroas em formações argilosas, garantir maior limpeza e estabilidade do furo, lubrificar coroa e coluna de perfuração, reduzindo atritos abrasivos.
Super Expand	0,01 %	Controlador de perda de circulação, para tapar fissuras e fraturas de até 30 mm (adicionado juntamente com papel picado).

71,55 m – 103,95 m =>A operação ocorreu normalmente, mas nas passagens das camadas hidratadas friáveis para compacto (IGOF/IF/IGOC), provavelmente houve liberação de material muito fino, e a ferramenta “pesou”, causando alteração no torque. Como ação reparadora, acrescentou-se ao fluido:

Óleo Solúvel – 1 L/m³ => lubrificante para evitar prisão diferencial

110,60 m =>Redução do diâmetro do furo para HQ como solução, uma vez que todo o intervalo já perfurado foi revestido em HW, eliminando assim a possibilidade de perda de lama por todo o intervalo perfurado em P.

117,40 m => Substituição do fluido convencional pelo fluido polimérico na camada de itabirito goethíticosemi-compacto. O objetivo é obter melhor controle dos parâmetros reológicos e hidrostáticos.

179,55 m - 180,60 m =>Ocorreu perda de lama no furo, e observou-se a presença de caimento. Houve aumento do torque. Manteve-se a perda de lama no furo. Foi inserido tampão viscoso para recuperar retorno, e também houve a inserção de produtos LCM (LostCirculationMud) conforme Tabela 21.

Tabela 21. Formulação do tampão viscoso para o furo BRUFD00158.

Produto	Quantidade	Função
Celutrol	800 g	Redutor de filtrado de alta viscosidade, para reduzir perdas por filtrações e auxiliar na limpeza do furo.
Goma Gel ou Goma Xantana	800 g	Agente tixotrópico, para minimizar os problemas de limpeza do fluido e auxiliar na estabilização das paredes do furo.
Óleo de Soja	3 l/m ³	Lubrificante para evitar prisão diferencial.
Óleo Solúvel	1 l/m ³	Lubrificante para evitar prisão diferencial.
SM 2000 ou Policrilamida de sódio	3200 ml	Viscosificante líquido de alto rendimento, para prevenir o aprisionamento de coroas em formações argilosas, garantir maior limpeza e estabilidade do furo, lubrificar coroa e coluna de perfuração, reduzindo atritos abrasivos.

187,10 m =>Houve fechamento do reboco. Como tratamento químico, utilizou-se dispersante. Mesmo com tempo de circulação, a camisa não saiu. Na tentativa de retirá-la, imprimiu-se força excessiva resultando no rompimento do cabo. Após troca do cabo, houve injeção de tampão viscoso e o problema foi resolvido.

187,10 m => Redução do diâmetro do furo para NQ como solução, uma vez que todo o intervalo já perfurado fica protegido pela haste HQ, eliminando assim a possibilidade de perda de lama por todo o intervalo perfurado em H.

285,15 m =>A perfuração ocorreu normalmente, sem problemas operacionais.

285,15 m – 320,95 m =>Observou-seo aumento da pressão, e a ferramenta “pesou”. Como estava próximo da programação de troca de coroa, foi feita a retirada do ferramental e detectou-se que a coroa estava descalibrada. Houve queda na recuperação do furo.

331,75 m => Houve perda de lama. Aumentou-se a viscosidade e foram inseridos produtos de LCM para fazer reboco fino e duro (CakeFix).

331,75 m – 370,05 m => perfuração ocorreu normalmente, sem problemas operacionais, até conclusão do furo.

370,05 m => Conclusão do furo.

5.2.3 – BRUFD00156

A. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA

Em relação à compacidade, é possível dividir o furo BRUFD00156 em duas faixas, como descrito a seguir (ver Anexo I.3):

A primeira faixa (0,00 m - 301,00 m) é predominantemente friável, composta principalmente de itabiritos friáveis, com passagens goethitizadas e passagens de itabirito manganésífero friável e itabirito anfíbolítico friável.

A segunda faixa (301,00 m - 470,50 m) é predominantemente compacta, composta principalmente por itabirito anfíbolítico compacto, com intercalações de rocha intrusiva e finalizando com itabirito dolomítico.

B. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA

Na primeira faixa (0,00 m - 301,00 m), as passagens rochosas, por se mostrarem predominantemente friáveis, apresentam grau de consistência extremamente macio, estando alteradas e fragmentadas.

Na segunda faixa (301,00 - 470,50 m), as passagens rochosas predominantemente compactas apresentam grau de consistência duro, sem alteração, ou seja, fresca e maciça, sem fraturamento.

C. HISTÓRICO DA PERFURAÇÃO

- ✓ Escala de perfuração – 3 turnos de 8 horas, sem paralisação e com perfuração constante.
- ✓ Diâmetro inicial – PQ
- ✓ Fluidos utilizados – fluido convencional + fluido polimérico.
- ✓ Monitoramento – propriedades do fluido

Formulação inicial do fluido de perfuração - convencional, à base de bentonita, até a profundidade de 197,60 m (Tabela 22).

Tabela 22. Formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00156.

Produto	Quantidade	Função
Bentonita	25 kg	Agente tixotrópico e formador de reboco, componente principal do fluido.
Celutrol	400 g	Redutor de filtrado de alta viscosidade, para reduzir perdas por filtrações, e auxiliar na limpeza do furo.
Cake Fix	200 ml	Agente fixador de reboco.
Barrilha	400 g	Controle de dureza e pH.
Goma Gel ou Goma Xantana	300 g	Agente tixotrópico, para minimizar os problemas de limpeza do fluido, e auxiliar na estabilização das paredes do furo.

*Parâmetros de perfuração observados somente de forma pontual.

0,00 m - 117,50 m =>A perfuração ocorreu normalmente, sem problemas operacionais.

117,50 m => Surgem os primeiros sinais de perda de lama em torno de 117,50m, na litologia IF. Houve queda na recuperação. Como ação controladora, foi feita a intervenção com produtos para recuperar retorno.

118,00 m => Redução do diâmetro do furo para HQ como solução, uma vez que todo o intervalo já perfurado foi revestido em HW, eliminando assim a possibilidade de perda de lama no intervalo perfurado em P.

118,00 m – 187,70 m => Apesar de todas as ações controladoras como redução do diâmetro, revestimento da parte aberta e intervenção com produtos, perdas de lama

continuaram sendo registradas durante o restante do intervalo IF, em 133,50 m, 163,50 m e 187,70 m.

197,60 m => Troca da lama para polímero na litologia IGOF.

205,70 m => Houve perda de lama ao entrar no intervalo IF.

205,70 m – 232,50 m => furo segue sem perder lama em IF, contudo a recuperação diminui.

232,50 m – 301,00 m => Observa-se pequenos sinais de perda de lama nas litologias IANF, IMNF e QFF. Foram registradas perdas de lama em 232,50 m, 243,10 m, 253,35 m e 291,40 m. Foram aplicadas as ações controladoras com intervenção com produtos para recuperar retorno. Não houve retorno, mas foi possível trabalhar com fluido na coluna.

312,00 m => Redução do diâmetro do furo para NQ como solução, uma vez que todo o intervalo já perfurado fica protegido pela haste HQ, eliminando assim a possibilidade de perda de lama por todo o intervalo perfurado em H.

312,00 m – 470,50 m => Conclusão do furo. Perfuração ocorreu normalmente em litologia compacta fresca ou levemente alterada, sem problemas operacionais.

470,50 m => Conclusão do furo.

5.2.4 – BRUFD00112

A. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA

Em relação à compacidade, é possível dividir o furo BRUFD00112 em quatro faixas, como descrito a seguir (ver Anexo I.4):

A primeira faixa (0,00 m – 143,40 m) é predominantemente friável e composta principalmente de itabiritos friáveis, com passagens de rocha intrusiva friável e quartzito ferruginoso friável.

Na segunda faixa (143,40 m - 250,35 m), mais hidratada, a predominância de litotipos é de itabiritos goethíticos compactos e itabirito compactos, com intercalação com itabirito friável.

A terceira faixa (250,35 m - 284,40 m) é friável, composta por xisto friável, itabirito friável e quartzo xisto friável.

A quarta faixa (284,40 m - 324,80 m) é compacta e composta por quartzo xisto compacto e xisto compacto.

B. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA

Na primeira faixa (0,00 m - 143,40 m), as passagens rochosas são predominantemente friáveis, com grau de consistência macio, estando completamente alteradas, fragmentadas ou desagregadas.

Na segunda faixa (143,40 m - 250,35 m), as rochas apresentam grau de consistência duro, sendo macio somente no itabirito friável. As rochas compactas mostram-se pouco alteradas.

A terceira faixa (250,35 m - 284,40 m) apresenta grau de consistência macio, estando a rocha completamente alterada e fragmentada.

A quarta faixa (284,40 m - 324,80 m) é compacta e apresenta rochas frescas, com grau de consistência duro.

C. HISTÓRICO DA PERFURAÇÃO

- ✓ Escala de perfuração – 3 turnos de 8 horas, sem paralisação e com perfuração constante.
- ✓ Diâmetro inicial – PQ
- ✓ Fluido utilizado – fluido polimérico.
- ✓ Monitoramentos – propriedades do fluido + parâmetros de perfuração

Formulação do fluido de perfuração – polimérico durante toda a extensão do furo. Não foi utilizado fluido convencional (Tabela 23).

Tabela 23. Formulação do fluido polimérico para o furo BRUFD00112.

Produto	Quantidade	Função
Celutrol	600 g	Redutor de filtrado de alta viscosidade, para reduzir perdas por filtrações e auxiliar na limpeza do furo.
Supervis	50 g	Viscosificante encapsulador de argilas, para evitar a expansão de argilas.
Barrilha	300 g	Controle de dureza e pH.
Goma Gel ou Goma Xantana	600 g	Agente tixotrópico, para minimizar os problemas de limpeza do fluido e auxiliar na estabilização das paredes do furo.

Além da formulação básica, utilizou-se SuperExpand de forma contínua na perfuração. Este produto é um polímero (policrilamida) expansivo cuja função é controlar a perda de circulação. É utilizado para tapar fissuras e fraturas responsáveis por perdas de circulação (até 30 mm).

0,00 m – 104,65 m =>A perfuração ocorreu normalmente, sem problemas operacionais.

104,65 m – 133,15 m => Observa-se aumento da pressão do fluido e aumento do torque, além de redução na recuperação. Como ação controladora aumentou-se a quantidade de Celutrol e Goma Gel, buscando minimizar os problemas de limpeza do furo.

133,15 m => Redução do diâmetro do furo para HQ como solução, pois apesar da não ocorrência de perdas consideráveis de fluido, observou-se redução da coluna hidrostática. Todo o intervalo perfurado foi revestido em HW, eliminando assim a possibilidade de perda de lama por todo o intervalo perfurado em P.

133,15 m – 199,85 m =>A perfuração ocorreu normalmente.

199,85 m =>Observaram-se aumento da pressão e do torque e queda na recuperação. Ocorreu uma leve prisão da camisa que foi solucionada com a inserção de óleo solúvel/óleo de soja e CakeFix.

212,85 m =>Ao perfurar a litologia IC, que se apresentou muito fraturada, optou-se por reduzir o diâmetro do furo para NQ, para evitar trancamentos e outros problemas

operacionais pois, apesar de não ter havido perdas consideráveis de fluido, observou-se redução da coluna hidrostática. Dessa forma, todo o intervalo ficou protegido pela haste HQ, eliminando assim a possibilidade de perda de lama por todo o intervalo perfurado em H.

212,85 m – 324,80 m => perfuração ocorreu normalmente, sem problemas.

324,80 m => Conclusão do furo.

5.2.5 – BRUFD00097

A. DESCRIÇÃO GEOLÓGICA

Em relação à compacidade, é possível dividir o furo BRUFD00097 em duas faixas, como descrito a seguir (ver Anexo I.5):

A primeira faixa (0,00 m – 234,95 m) é predominantemente friável e composta principalmente de itabiritos friáveis, com passagens de itabirito manganésífero friável, itabirito goethítico friável e filitosericítico friável.

Na segunda faixa (234,95 m - 373,05 m) ocorre a predominância de itabirito compacto, com intercalações de itabirito anfíbolítico compacto, veio de quartzo e itabirito dolomítico compacto.

B. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA

Na primeira faixa (0,00 m - 234,95 m), as passagens rochosas são predominantemente friáveis e apresentam grau de consistência macio, estando moderadamente a completamente alteradas e intensamente fraturadas.

A segunda faixa (234,95 m – 373,05 m) apresenta grau de consistência duro, estando moderadamente alterada e muito fraturada.

C. HISTÓRICO DA PERFURAÇÃO

- ✓ Escala de perfuração – 3 turnos de 8 horas, sem paralisação e com perfuração constante.
- ✓ Diâmetro inicial – PQ
- ✓ Fluidos utilizados – fluido convencional + fluido polimérico.
- ✓ Monitoramento – parâmetros de perfuração

Formulação inicial do fluido de perfuração - convencional à base de bentonita, até a profundidade de 116,80 m (Tabela 24).

0,00 m - 31,20 m =>A perfuração ocorreu normalmente, sem problemas operacionais.

Tabela 24. Formulação do fluido convencional para o furo BRUFD00097.

Produto	Quantidade	Função
Bentonita	25 kg	Agente tixotrópico e formador de reboco, componente principal do fluido.
Celutrol	400 g	Redutor de filtrado de alta viscosidade, para reduzir perdas por filtrações e auxiliar na limpeza do furo.
Supervis	50 g	Viscosificante encapsulador de argilas, para evitar a expansão de argilas.
Barrilha	300 g	Controle de dureza e pH.
Goma Gel ou Goma Xantana	300 g	Agente tixotrópico, para minimizar os problemas de limpeza do fluido e auxiliar na estabilização das paredes do furo.

31,20 m => Surgem as primeiras alterações no torque e pressão e pequenos sinais de perda de lama, na litologia IS. Como ação controladora, foi feita a intervenção com produto formador de reboco (Black Fure).

31,20 m – 42,30 m =>A perfuração ocorreu normalmente, sem problemas operacionais.

42,30 m – 51,05 m =>Ao perfurar a camada de IGOF, foi observado aumento da pressão e do torque, e a ferramenta “pesou”. Houve perda de lama e observou-se a presença de caimento. Houve queda na recuperação do furo. Como ação controladora, foi inserido produto formador de reboco e redutor de filtrado.

51,05 m => Houve aumento da pressão e do torque, e queda da recuperação. Ocorreu a prisão da camisa através do “efeito seringa”, o que foi solucionado com a inserção de óleo solúvel/óleo de soja e CakeFix. Houve também a inserção de SM2000 para prevenir o aprisionamento da coroa, contribuindo para a limpeza e dando maior estabilidade ao furo, além de lubrificar a coroa.

58,00 m => Redução do diâmetro do furo para HQ como solução pois, na continuidade da perfuração na porção friável, o furo continuou perdendo lama. Todo o intervalo já perfurado foi revestido em HW, eliminando assim a possibilidade de perda de lama em todo o intervalo perfurado em P.

58,00 m – 116,80 m => Apesar da ação anterior, a pressão e torque se mantiveram altos. Foram registradas perdas de lama em 60,75 m, 67,15 m. Foram aplicadas as ações controladoras com intervenção com produtos para recuperar retorno. Houve redução da coluna hidrostática, caimento, baixa recuperação.

116,80 m => Troca da lama para polímero na litologia HF.

116,80 m – 234,95 m => Mantem-se a dificuldade de controle de pressão e torque. Continuam sendo registradas perdas de lama durante toda a perfuração da porção friável, até 234,95 m. As ações controladoras com intervenção com produtos para recuperar retorno permitem apenas manter a coluna hidrostática, ou parte dela.

234,95 m – 284,35 m => A partir de 234,95 m iniciou-se a perfuração na porção compacta do furo. Torque e pressão mantiveram-se altos. Observou-se maior dificuldade em manter a coluna hidrostática preenchida.

284,35 m => Optou-se pela redução do diâmetro do furo para NQ como solução para evitar trancamentos e outros problemas operacionais. Dessa forma, todo o intervalo fica protegido pela haste HQ, eliminando assim a possibilidade de perda de lama por todo o intervalo perfurado em H.

284,35 m – 373,05 m => O torque e pressão permaneceram alterados, com ocorrência de perda de lama e queda na recuperação. Foram mantidas as ações para recuperar retorno, permitindo manter a coluna hidrostática preenchida.

373,05 m =>Ocorreu prisão diferencial. Utilizou-se o produto SM Thim, que é um dispersante ou redutor de viscosidade, para afinar o fluido.

373,05 m =>Conclusão do furo.

5.3 – ANÁLISE DOS DADOS REFERENTES À EXECUÇÃO DOS FUROS

5.3.1 – MONITORAMENTO

Na execução dos furos, as pressões foram controladas por meio do monitoramento das propriedades do fluido, para evitar colapso. Durante toda a execução foram feitas pequenas modificações na formulação do fluido, para que a relação massa/volume, comumente chamada de peso, permanecesse em torno de 8,33 lb/gal. Esse monitoramento é bastante útil quando se quer evitar por excesso de pressão hidrostática, a perda induzida.

No controle dos dados da viscosidade funil ou viscosidade Marsh, que mede o tempo gasto para escoar 946 ml do fluido pelo funil, não foi detectada nenhuma alteração relevante que pudesse indicar alteração no comportamento do fluido. As alterações detectadas correspondem aos ajustes na formulação do fluido.

Como, em todos os furos, a coluna esteve preenchida por fluido, foi possível o monitoramento dos parâmetros reológicos viscosidade aparente, viscosidade plástica, limite de escoamento, géis inicial e final, filtrado e “cake”.

O controle do filtrado e seu tratamento, por meio de ajustes na formulação do fluido, permitiu reduzir o risco de prisão diferencial principalmente em rocha macia.

O controle dos parâmetros de viscosidade e limite de escoamento permitiu monitorar se o fluido estava lixiviando as paredes do furo, tornando o reboco ineficiente. Se os valores do limite de escoamento e da viscosidade plástica estiverem próximos, a parede está sendo lavada pelo fluido, conforme observado na prática (Fonte Geosol, 2013).

Excepcionalmente no furo BRUFD00097, não houve monitoramento das propriedades do fluido. Assim, as pressões do furo não foram totalmente controladas, possibilitando o colapso em alguns pontos. Sem este controle, acredita-se que a perda de fluido, constante durante toda a perfuração, pode ter sido em alguns casos, induzida por excesso de pressão hidrostática.

O monitoramento dos parâmetros de perfuração foi essencial para a boa evolução dos furos, evitando consequências maiores e contribuindo para minimizar os problemas ocorridos.

Para todos os furos foi utilizada a coroa de passagem de água frontal, para obter melhor recuperação e estabilidade das paredes do furo, além da manutenção de um reboco fino e consistente.

No capítulo 02 foram descritos os principais problemas que podem ocorrer durante a perfuração. Suas consequências vão desde pequenas perdas de produtividade e consequentemente, perdas de horas de utilização, passando pelo não atingimento do objetivo, até a perda total do furo.

Durante a execução dos cinco furos selecionados para o estudo, vários problemas operacionais ocorreram.

No furo BRUFD00131, no intervalo 91,00 m a 96,00 m, ao perfurar a litologia IF, ocorreu perda quase total de lama no furo. Houve redução de pressão, aumento do torque, o que levou a concluir que o furo estava “bebendo”, ou seja, estava ocorrendo perda de lama para a formação.

Não foi constatada a presença de fratura expressiva. Como a recuperação vinha diminuindo, tendo como consequência o aumento de detritos ou “sujeira” na lama, e não foi observado nenhuma variação brusca no perfil de densidade, avalia-se que a perda de lama foi induzida pela operação, provavelmente por excesso de peso do fluido, por incorporação de detritos na lama. Assim, o monitoramento possibilitou a tomada de decisões como troca da lama “suja” por uma lama “limpa”, evitando um possível trancamento. Na Figura 35 é possível verificar as alterações citadas nos

parâmetros de perfuração, ao passo que a densidade e a litologia permanecem inalteradas.

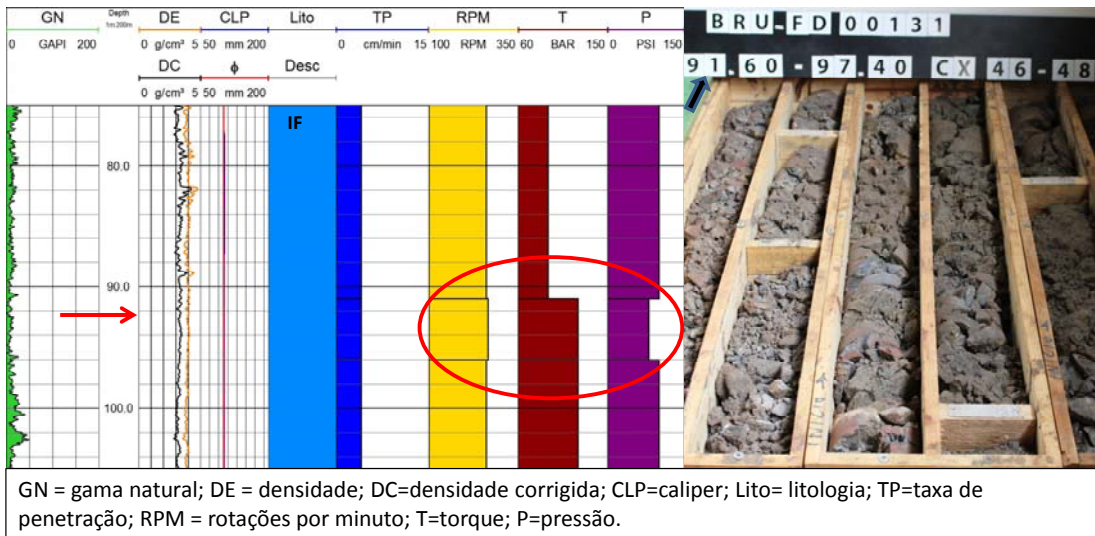


Figura 35. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 91,00 m a 96,00 m - BRUFD00131.

No furo BRUFD00156, próximo a 117,50 m, foi perceptível a queda de flutuação e aumento de vibração da coluna dentro do furo. O monitoramento permitiu a constatação que estava ocorrendo perda de circulação ou perda de retorno, e que o próximo passo seria o trancamento (Figura 36). Foi então feita a intervenção com produtos LCM para recuperar retorno. Conforme já relatado, os produtos LCM (“LostCirculationMud”) atuam tapando fendas e fraturas (superexpand, algodão, papel picado).

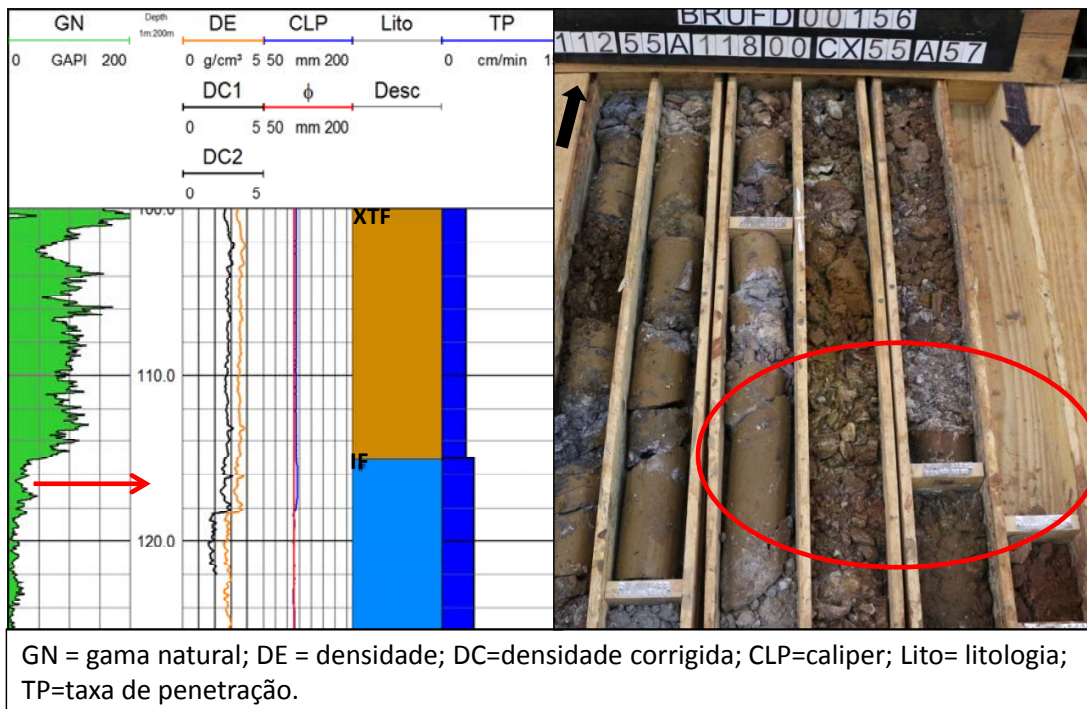


Figura 36. Perfil composto geofísica + taxa penetração – zoom no intervalo de 100,00 m a 130,00 m - BRUFD00156.

Também no furo BRUFD0097, no intervalo 42,30 m a 51,05 m, em uma passagem hidratada (IGOF), houve aumento do torque e da pressão, aliado à presença de caimento de rochas da parede do furo (Figura 37). O sondador relatou que a ferramenta pesou, ou seja, houve perda de flutuação, e observou-se queda na recuperação. Tudo isso leva a pensar que pode ter ocorrido perda de lama induzida pela operação, pois os detritos foram incorporados à lama, fazendo com que houvesse desequilíbrio na janela operacional.

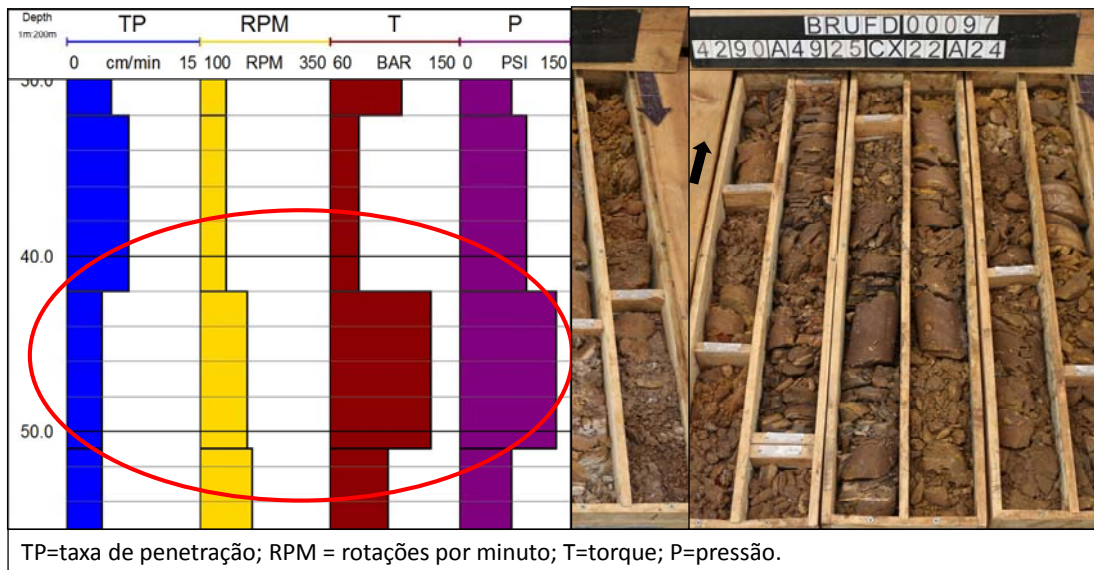


Figura 37. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 30,00 m a 56,00 m - BRUFD00097.

A “sujeira” provocou o “efeito seringa” em 51,05 m, o que foi solucionado através de inserção de produto. O monitoramento fez com que a ação controladora pudesse ser tomada antes do trancamento.

A perda induzida pela operação é comum na perfuração de formação friável, e pode levar ao trancamento e até mesmo à perda do furo. Neste estudo, esse fato ocorreu com maior frequência nas camadas hidratadas, o que mostra que nessas passagens o monitoramento deve ser contínuo para evitar problemas maiores. Além disso, o acúmulo de detritos dentro do furo pode levar ao pistoneio mecânico ou “efeito seringa”, como ocorreu no furo BRUFD00097.

No furo BRUFD00131, em 153, 70 m, na litologia IARF, devido ao aumento da pressão da lama e do torque (Figura 38), somado à nítida alteração do som motor, conforme relatado pelo sondador, confirmando que a máquina estava sendo forçada, e às tentativas frustradas de retirar a camisa, foi possível identificar que estava ocorrendo o efeito conhecido como “pistoneio mecânico” ou “efeito seringa”. Ao manobrar a composição com a camisa engatada no barrilete, esta não saiu do furo e rompeu na rosca após excesso de força aplicada pelo sondador. Houve perda de lama simultânea e os detritos que estavam sendo carregados pelo fluido foram depositados no espaço anelar, causando o entupimento do furo. A camisa dentro do barrilete faz o efeito de “êmbolo dentro da seringa”, e o efeito é de sucção. Nesse momento o furo

estava sendo pistoneado. Na Figura 38 a leitura do caliper demonstra que houve desmoronamento nesta profundidade, evidenciando o aumento de detritos.

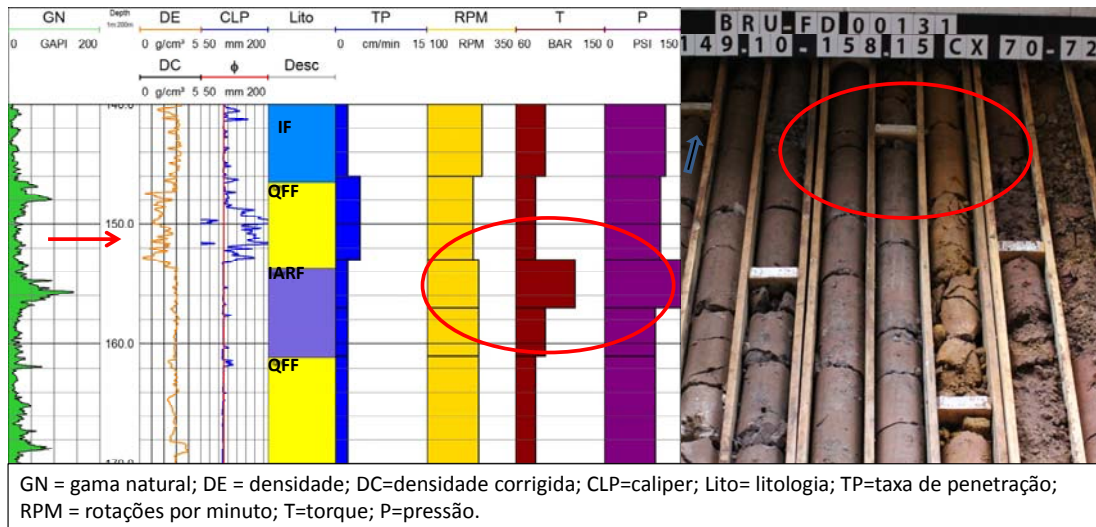


Figura 38. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 140,00 m a 170,00 m - BRUFD00131.

O monitoramento da execução desse furo permitiu a identificação correta do problema, evitando assim o rompimento do cabo *wireline*, desgastes do equipamento, consumo excessivo de insumos, aumento de custo e até um trancamento de ferramental e uma possível perda do furo.

O mesmo ocorreu em 175,10 m, na litologia XTF, e na profundidade de 236,35, na litologia IC, que se apresentou bastante fraturada.

Também no furo BRUFD00158, no intervalo de 179,55 m - 180,60 m, ao perfurar uma camada de IC bastante fraturada, houve perda de lama e caimento, com torque alterado (Figura 39). Foi inserido tampão viscoso na tentativa de recuperar retorno, além de produtos LCM (“LostCirculationMud”), que atuam tapando fendas e fraturas (superexpand, algodão, papel picado). Ainda assim, mesmo com tempo de circulação, a camisa não saiu, ocorrendo o “efeito seringa”. Na tentativa de retirá-la, imprimiu-se força excessiva, resultando no rompimento do cabo.

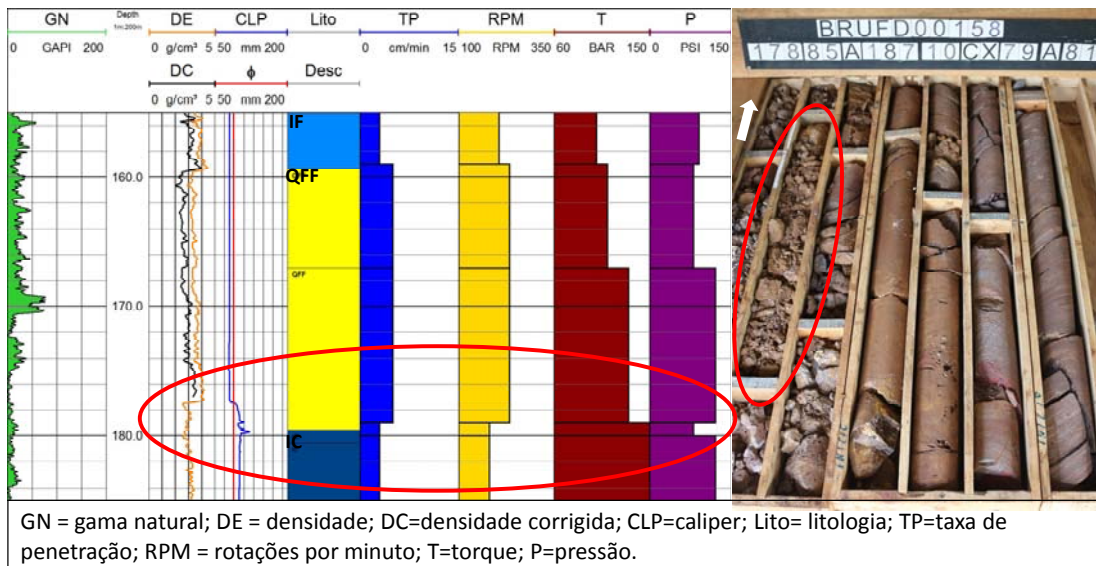


Figura 39. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 155,00 m a 185,00 m - BRUFD00158.

A solução evitou o trancamento, mas não foi suficiente para evitar o fechamento do reboco. O aumento do torque e da pressão, aliado ao efeito de “colagem” da ferramenta ao pescar a camisa, nos leva a deduzir que estava ocorrendo prisão diferencial.

Foi feito tratamento químico, com o produto SM Thim, que é um dispersante de argila ou redutor de viscosidade, utilizado para evitar o aprisionamento de coroas e entupimento de hastes e coroas, ou como solução para estes problemas.

No furo BRUFD00112, próximo a 199,85 m também houve uma leve prisão da camisa, que foi tratada com SM Thim, sem maiores problemas (Figura 40).

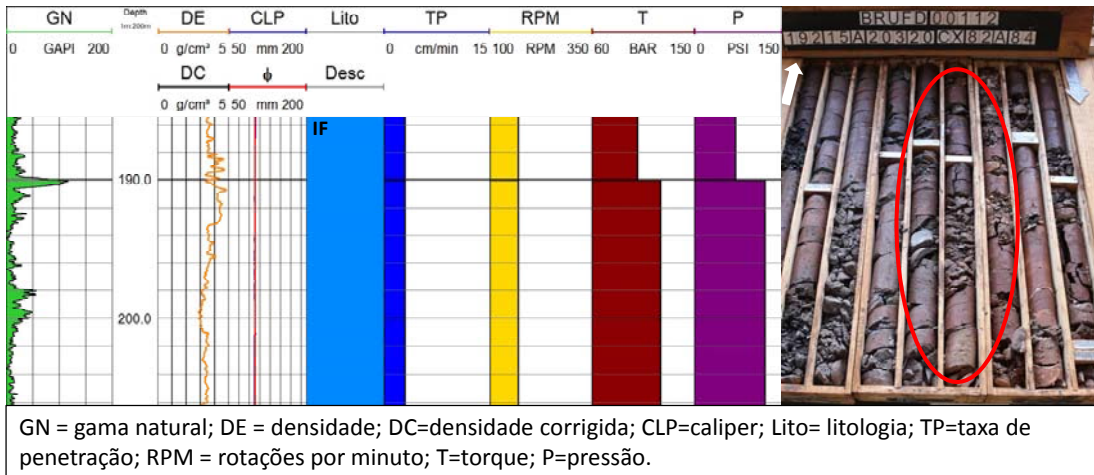


Figura 40 - Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 185,00 m a 206,00 m - BRUFD00112.

No furo BRUFD00156, no intervalo 203,00 m a 301,00 m, ao perfurar as litologias IANF, IMNF e QFF, ocorreu o pistoneio mecânico ou “efeito seringa”, e um possível entupimento das saídas da coroa, uma vez que o IMNF, ao se juntar com a lama, apresenta aspecto “pegajoso”, facilitando o entupimento. Pontualmente, o sondador observou um aumento de pressão (Figura 41).

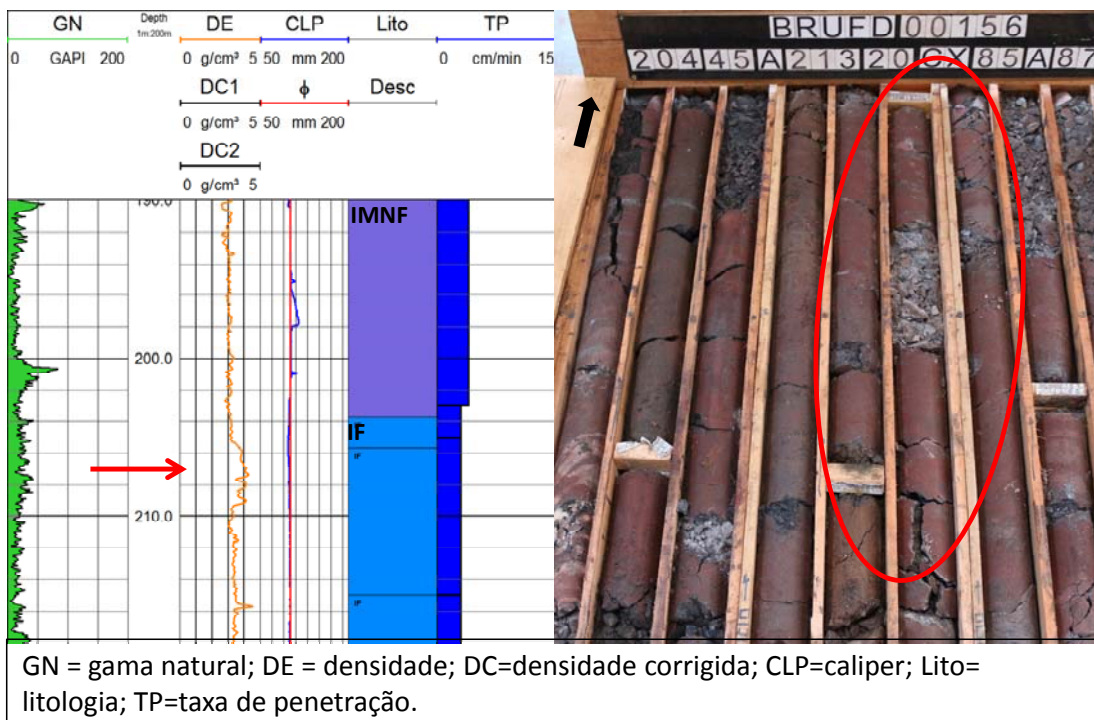


Figura 41 - Perfil composto geofísica + taxa penetração – zoom no intervalo de 190,00 m a 220,00 m - BRUFD00156.

No furo BRUFD0097, nas passagens hidratadas (IGOF) e de IMNF, novamente observa-se perda de lama, entupimento de coroa e mudanças nos parâmetros de perfuração.

No furo BRUFD00158, por volta de 65,00 m, o aumento de pressão sugere um entupimento das saídas da coroa, comum na perfuração de IMNF, que ao se juntar com a lama, apresenta aspecto “pegajoso”, facilitando o entupimento (Figura 42).

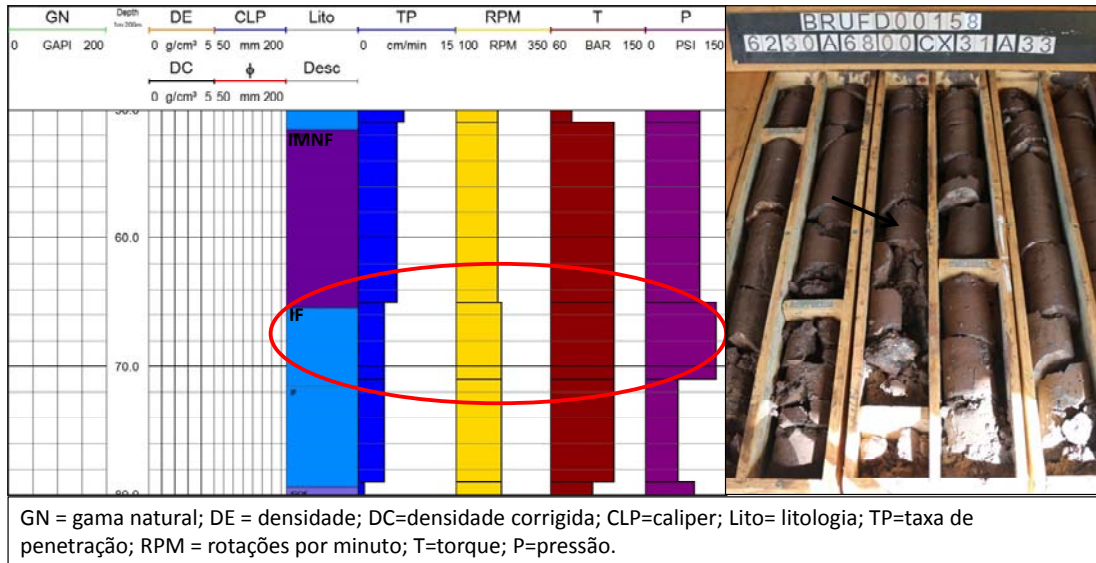


Figura 42. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 50,00 m a 80,00 m - BRUFD00158.

O monitoramento mais uma vez possibilitou a tomada de decisões como troca da lama “suja” por uma lama “limpa”, e evitou um possível trancamento.

Observou-se que era frequente o entupimento das saídas das coroas próximo à ocorrência de pistoneio mecânico, e que a perfuração na litologia IMNF foi bastante complexa, sendo comum a ocorrência do efeito seringa e entupimento das coroas. É importante observar que, sem monitoramento, a percepção desses problemas não ocorreria em tempo real, podendo levar ao trancamento e até mesmo perda do furo.

No furo BRUFD00158, no intervalo de 71,55 m – 103,95 m, nas passagens das camadas friáveis para compacto (IGOF/IF/IGOC), provavelmente houve liberação de material muito fino. O aumento do torque e da pressão, aliado a dificuldades de

manobra, e a constatação de eventos de “colagem” ao pescar a camisa, levaram-nos a concluir que a prisão diferencial estava perto de ocorrer (Figura 43).

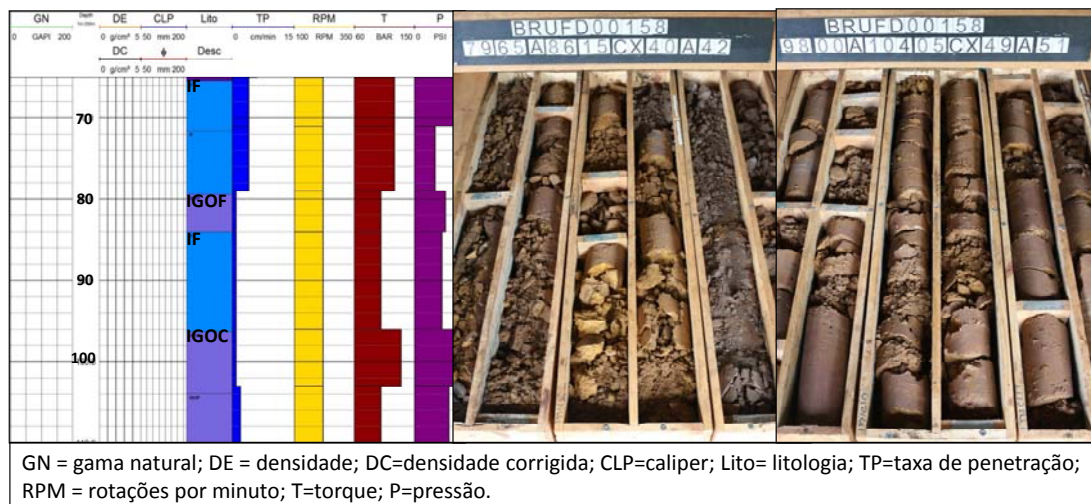


Figura 43. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 65,00 m a 110,00 m - BRUFD00158.

O monitoramento possibilitou uma ação controladora. Neste caso, a inserção de óleo solúvel foi suficiente. Posteriormente, a redução do diâmetro do furo para HQ deixou todo o intervalo já perfurado revestido em HW.

No final do furo BRUFD0097, houve prisão diferencial. Houve aumento do torque, dificuldade de manobra, além da ocorrência de “colagem” da ferramenta.

A prisão diferencial que, como já dito, consiste na fixação da coluna à parede, é outra ocorrência operacional que afeta a segurança do furo. Se não monitorado e tratado, pode levar ao trancamento de ferramental e até à perda do furo. Nas ocorrências registradas, o tratamento foi eficiente e o controle da espessura do reboco foi essencial.

No furo BRUFD00131, no intervalo de 96,00 m – 116,65 m, ao perfurar as litologias IMNF e IARF, ocorreu perda de lama com queda inicial de pressão. A pressão foi aumentando, indicando limpeza ineficiente do furo. O mesmo ocorreu em 236,35 m, na litologia IC (Figura 44).

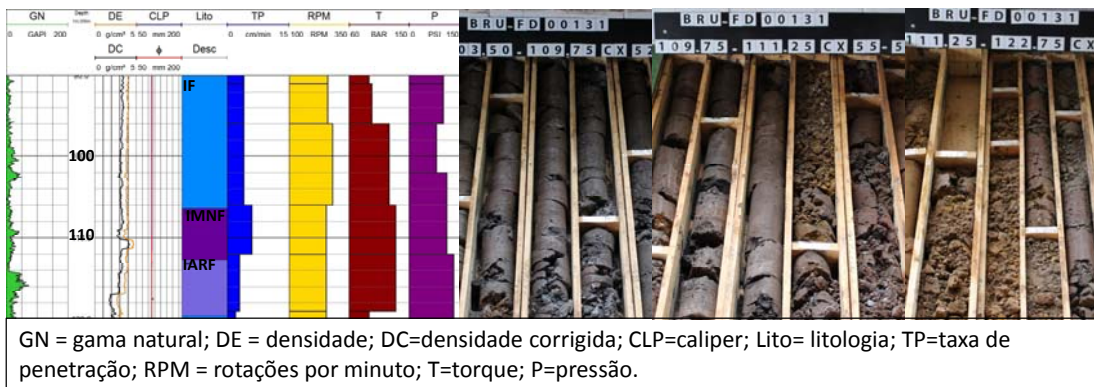


Figura 44. Perfil composto geofísica + parâmetros de perfuração – zoom no intervalo de 90,00 m a 120,00 m - BRUFD00131.

Também no furo BRUFD0097, no intervalo de 58,00 m - 116,80 m, ao perfurar uma camada de IF, ocorreu perda de lama com queda inicial de pressão. A presença de caimento de rochas da parede do furo, aliado ao aumento contínuo pressão, indicou limpeza ineficiente do furo. O mesmo ocorreu no intervalo de 319,60 m – 329,10 m, na litologia IS.

Fazendo uma análise conjunta de todas as ocorrências, fica evidente a importância do monitoramento tanto das propriedades do fluido quanto dos parâmetros de perfuração, para tratativa das ocorrências. Desta forma, é possível obter sucesso na perfuração, com atingimento da profundidade final programada e do objetivo do furo, consequentemente com qualidade, segurança, alta produtividade e baixo custo.

Verificam-se ainda dificuldades em se perfurar material friável, com destaque para as passagens hidratadas, principalmente IGOF, e para o IMNF.

5.3.2 – TAXA DE PENETRAÇÃO

Conforme observado, na execução dos cinco furos selecionados para aplicação da metodologia, não houve trancamento. Todos os furos atingiram o objetivo programado e não houve perda de furo. Isso em função dos monitoramentos do fluido de perfuração e/ou parâmetros de perfuração, que permitiram a detecção de

problemas operacionais e sua tratativa, evitando que o quadro evoluísse para algo sem solução.

A Tabela 25 mostra informações referentes à execução destes furos:

Tabela 25. Resumo simplificado do desempenho dos dados dos furos selecionados para este estudo.

Furos Selecionados	Período (dias)	Taxa Penetração (m/dia)	Média Profundidade (m)	Produtividade Média (m)
BRUFD00131	18	20,11	362,05	603,30
BRUFD00158	18	20,5	370,05	615,00
BRUFD00156	24	19,6	470,50	588,00
BRUFD00112	14	23,2	324,80	696,00
BRUFD00097	26	14,34	373,05	430,20
Média	20	19,55	380,09	586,50

O quadro abaixo (Tabela 26) apresenta um comparativo dos dados das tabelas 14 e 25, mostrando que, apesar de um acréscimo de aproximadamente 5% na profundidade média dos furos selecionados para este estudo, houve uma redução de 41,18% no tempo médio de execução, um acréscimo de 81,01% na taxa de penetração diária e um acréscimo de 69,51% na produtividade média, em comparação com o desempenho das campanhas anteriores.

Tabela 26. Quadro comparativo do desempenho dos furos das campanhas anteriores (2011, 2012, 2013) com os furos selecionados para este estudo.

Média	Período (dias)	Taxa Penetração (m/dia)	Profundidade Média (m)	Produtividade Média (m/sonda/mês)
Campanhas Anteriores	34	10,80	363,00	346,00
Estudo	20	19,55	380,09	586,50
	↓ 41,18 %	↑ 81,01 %	↑ 5 %	↑ 69,51 %

Conforme já mencionado, na execução dos cinco furos selecionados, houve variações no tipo de fluido utilizado e nos monitoramentos executados.

Dos resultados obtidos (Tabela 25), é possível observar que o melhor desempenho ocorreu quando o furo foi executado utilizando fluido polimérico em sua totalidade, sendo as propriedades do fluido e os parâmetros de perfuração monitorados, que é o caso do furo BRUFD00112.

Mantendo os monitoramentos das propriedades do fluido e dos parâmetros de perfuração, e trabalhando inicialmente com fluido convencional e depois com fluido polimérico, como é o caso dos furos BRUFD00131 e BRUFD00158, em relação à produtividade ou taxa de penetração, o desempenho sofre uma ligeira queda, em torno de 12% em relação ao melhor desempenho (BRUFD00112), mas ainda assim apresenta resultados satisfatórios.

Mantendo a troca do fluido durante a execução do furo, mas promovendo o monitoramento das propriedades do fluido, e dos parâmetros de perfuração somente em situações pontuais como no furo BRUFD00156, o desempenho reduz um pouco mais, em torno de 15% em relação ao furo BRUFD00112.

O pior desempenho ocorreu na execução do furo BRUFD00097, quando executou-se o furo com fluido convencional e posteriormente polimérico, e com monitoramento somente dos parâmetros de perfuração. O desempenho reduziu-se em torno de 38% em relação ao furo BRUFD00112.

Obviamente, outros fatores podem ter influenciado nos resultados, visto que os furos não são idênticos, mas fica clara a interferência dessas ações no resultado final.

Outro ponto importante a ser observado é que, mesmo os piores resultados obtidos com o furo BRUFD00097, são melhores que os resultados atingidos nas campanhas anteriores (Tabela 14).

A Tabela 27 mostra os dados referentes ao desempenho dos furos utilizados neste estudo.

Tabela 27. Quadro comparativo do desempenho dos furos executados neste estudo, em relação ao furo de melhor desempenho (BRUFD00112).

Furo	Produtividade (m)	%	Diferença (%)
BRUFD00112	696,00	100,00	
BRUFD00158	615,00	88,36	-11,64
BRUFD00131	603,30	86,68	-13,32
BRUFD00156	588,00	84,48	-15,52
BRUFD00097	430,20	61,81	-38,19

5.3.3 – COMPARAÇÃO DE CUSTO

O custo da metodologia proposta neste trabalho foi calculado do ponto de vista da Vale, ou seja, em relação à redução de pagamento à empresa de sondagem.

Desse modo, podemos avaliar a redução de custo sob dois aspectos:

✓ **Redução dos Custos Fixos**

Os valores pagos pela Vale às empresas de sondagem são agrupados da seguinte maneira:

- Perfuração: valores pagos por metro perfurado de acordo com a região, inclinação do furo, diâmetro, profundidade, litologia e recuperação.
- Custos variáveis: valores pagos para outros serviços que são diretamente relacionados à metragem executada, como fornecimento de caixas de testemunhos, medida de desvio da trajetória dos furos, etc;
- Custos fixos: valores pagos por alguns equipamentos e acessórios necessários para a realização da sondagem, como caminhão pipa, sanitário químico, torre de iluminação, etc;

Como os valores de perfuração e custos variáveis são proporcionais à metragem realizada, a redução corresponde somente aos custos fixos, devido ao aumento da produtividade.

Simulamos os valores de custos fixos pagos pela Vale, de acordo com o contrato vigente, para uma campanha de 10.000 m de sondagem realizada por 01 sonda. Observa-se uma redução em torno de 41% nestes custos, uma vez que o aumento da produtividade de 346 m/sonda/mês para 586,5 m/sonda/mês permite que a campanha seja realizada em 17,1 meses, ao invés de 28,9 meses (Tabela 28).

Tabela 28. Quadro comparativo de simulação de custo da execução de 10.000 m conforme executado nas campanhas anteriores (2011, 2012, 2013) e na metodologia deste estudo.

Metragem = 10.000 m		Furos Anteriores à Metodologia	Furos Seleccionados para o Estudo
Produtividade (m/sonda/mês)		346	586,5
Meses		28,9	17,1
Nº Sondas		1	1
Outros Serviços Fixos	Torre Iluminação	R\$ 7.106,00	R\$ 7.106,00
	Sanitário Químico	R\$ 2.090,00	R\$ 2.090,00
	Caminhão Pipa	R\$ 28.600,00	R\$ 28.600,00
	Retroescavadeira	R\$ 44.520,00	R\$ 44.520,00
	Total Mês	R\$ 82.316,00	R\$ 82.316,00
	Total Período	R\$ 2.379.075,14	R\$ 1.403.512,36
Redução		41%	

Obviamente, o valor correspondente à redução de custos demonstrada acima, poderá ser alterado caso se opte por trabalhar com um número maior de sondas. Ainda assim, fica claro que o aumento de produtividade conquistado através da metodologia utilizada resulta em redução de custo em torno de 41% do custo fixo.

5.4–APRESENTAÇÃO DOS DADOS REFERENTES À PERFILAGEM GEOFÍSICA

A execução da perfilagem geofísica permitiu, através do parâmetro gama, que é a medida contínua de densidade, ajustar os contatos das camadas rochosas, sendo que não houve deslocamentos expressivos em relação a à marcação visual dos contatos. Os dados também foram utilizados para auxiliar na interpretação dos problemas operacionais.

A utilização da ferramenta Caliper, que promove medidas do diâmetro ao longo do furo, permitiu avaliar possíveis desmoronamentos das paredes do furo.

5.5 – APRESENTAÇÃO DOS DADOS REFERENTES À AVALIAÇÃO DAS ROCHAS PERFURADAS

A partir dos furos e horizontes selecionados para esta etapa, foram coletadas amostras de aproximadamente 2 kg, que alimentaram as análises granuloquímicas, mineralógicas, e os testes de bancada que serão apresentados a seguir. As amostras foram coletadas nos furos BRUFD00131 e BRUFD00158, nas regiões onde se observou perda de lama, conforme Tabela 29.

Tabela 29. Identificação das amostras selecionadas.

Furo	Amostra	Intervalo (m)	Tipologia/Descrição CLV
BRUFD00131	Amostra 01	96,05 - 106,50	Itabirito Friável
	Amostra 02	106,50 - 112,65	Itabirito Manganesífero Friável
	Amostra 03	112,65 - 119,55	Itabirito Argiloso Friável
	Amostra 04	153,70 - 161,10	Itabirito Argiloso Friável
	Amostra 05	224,00 - 232,20	Itabirito Anfíbolítico Semi-compacto
BRUFD00158	Amostra 01	159,40 - 179,55	Quartzito Ferruginosos Friável
	Amostra 02	179,55 - 250,75	Itabirito Compacto
	Amostra 03	250,75 - 271,80	Itabirito Goethítico Compacto
	Amostra 04	320,95 - 326,85	Quartzito Friável

5.5.1 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS ROCHAS

A partir do peneiramento a úmido executado, foram obtidos os seguintes resultados:

5.5.1.1 – BRUFD00131

Em relação ao BRUFD00131, fica claro que os itabiritos friáveis, que representam o topo do furo, têm o maior percentual de massa retido nas frações 0,150 mm e 0,045 mm. Dentro desse conjunto, o itabirito manganesífero é o que maior percentual de massa gera para estas frações finas.

Em torno de 50% da massa de itabirito goethíticosemi-compacto está na fração +8,0 mm. Os outros 50% estão distribuídos entre as frações 1,0 mm, 0,150 mm e 0,045 mm.

Para o itabirito compacto, em torno de 95% encontra-se na fração + 8,00 mm. Nas outras faixas a massa retida é mínima (Figura 45).

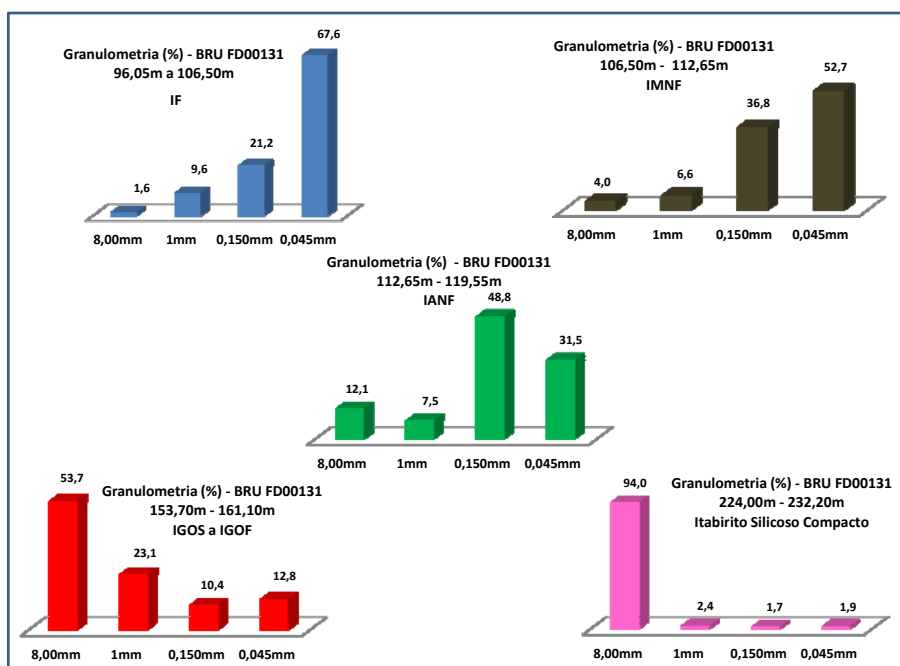


Figura 45. Gráficos de distribuição granulométrica das amostras coletadas no furo BRUFD00131.

5.5.1.2–BRUFD00158

Em relação ao furo BRUFD00158, observa-se que o quartzito tem distribuição bastante anômala quando comparado ao itabirito friável. No quartzito, a maior massa encontra-se na fração 0,3 mm. Já no itabirito, a maior massa, que está abaixo de 50%, encontra-se na fração +8,00 mm.

Resultados semelhantes também são vistos para o semi-compacto, porém com percentual em torno de 54% na fração +8,00 mm. Importante destacar que em nenhuma das alíquotas do furo BRUFD00158 foram encontrados percentuais de massas próximos aos observados no furo BRUFD00131 nas faixas 0,15 e 0,045 mm (Figura 46).

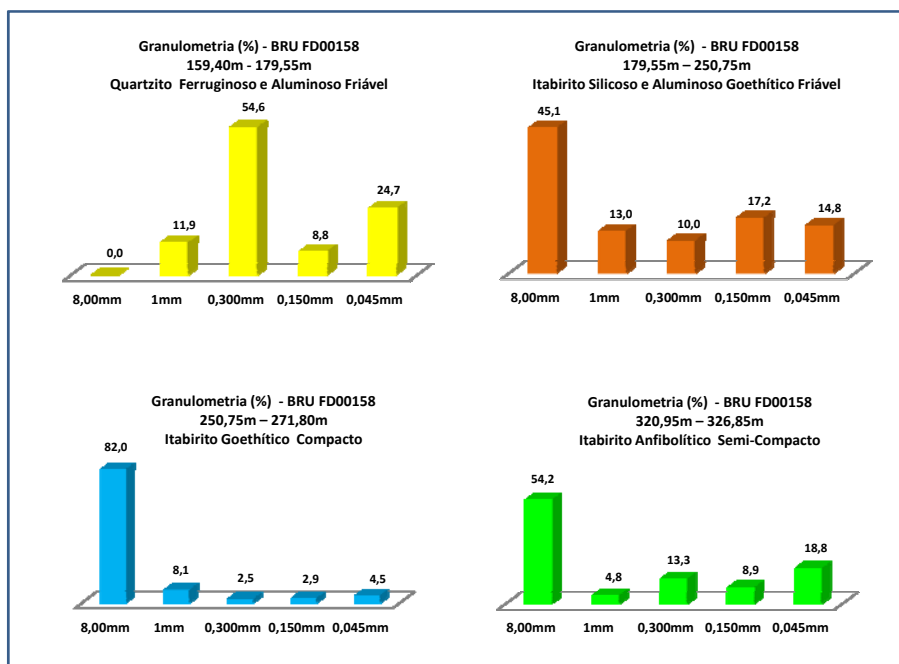


Figura 46. Gráficos de distribuição granulométrica das amostras coletadas no furo BRUFD00158.

5.5.2– CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A análise química dos elementos maiores e dos traços foi feita pela empresa SGS Geosol, através de amostras dos furos BRFD00131 e BRFD00158.

As amostras foram preparadas utilizando fusão de tetraborato de lítio e posteriormente foram submetidas à técnica de Fluorescência de Raios X.

O PPC (perda por calcinação) foi feito utilizando uma perda ao fogo por calcinação entre 405°C e 1000°C.

Os traços foram determinados utilizando digestão com água régia e o percentual determinado por ICP OES

5.5.2.1 – ANÁLISE DOS ELEMENTOS TRAÇOS Ca e Mg

Foram analisadas as quantidades de Ca e Mg da rocha, para verificação de possível interferência na dureza da água.

Em todas as amostras do BRUFD00131, a quantidade máxima de magnésio é encontrada no anfíbolito rico, correspondente a 0,21%. O percentual máximo de cálcio é de 0,03%.

Nas amostras do furo BRUFD00158, as quantidades máximas de magnésio são encontradas no quartzito ferruginoso friável, correspondente a 0,45%. O percentual máximo de cálcio é de 0,05%.

As quantidades encontradas são baixas e insuficientes para serem incorporadas a água utilizada no fluido de perfuração, não havendo interferência na dureza da água (Figura 47).

Conforme já esperado, à medida que o teor de ferro aumenta, diminui o teor de cálcio e magnésio, ou seja, nas porções mais ricas, a pureza da água em termos de íons é maior.

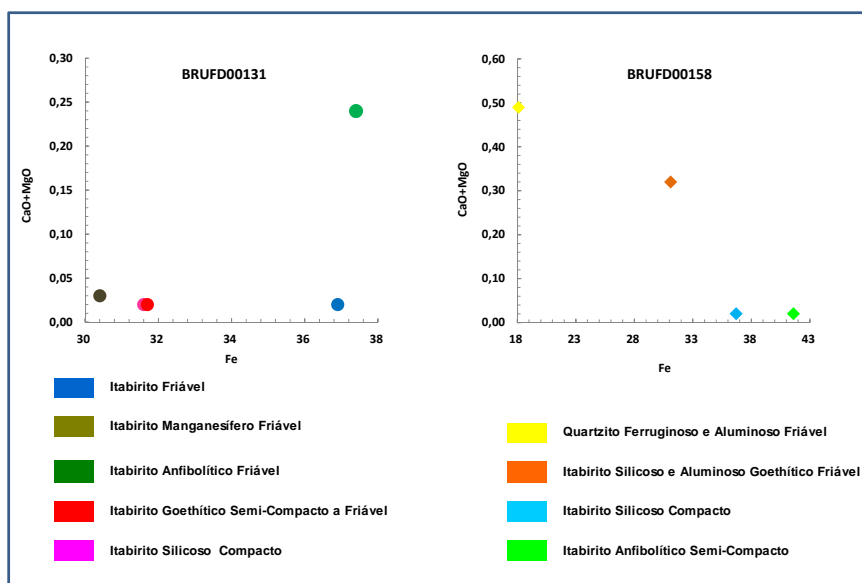


Figura 47. Gráfico de dispersão Ferro x Cálcio + Magnésio.

5.5.2.2 – CORREÇÃO DA TIPOLOGIA PELA QUÍMICA

Como a descrição geológica das litologias perfuradas é feita por classificação visual (CLV), com os resultados da análise química, foi possível confirmar ou adequar a

nomencatura da tipologia perfurada. A Tabela 30 mostra as tipologias definidas pela CLV e pela química.

Tabela 30. Quadro comparativo da nomenclatura da tipologia definida na classificação visual x análise química.

Furo	Amostra	Intervalo (m)	Tipologia/Descrição CLV	Tipologia/Correção Química
BRUFD00131	Amostra 01	96,05 - 106,50	Itabirito Friável	Itabirito Friável
	Amostra 02	106,50 - 112,65	Itabirito Manganífero Friável	Itabirito Manganífero Friável
	Amostra 03	112,65 - 119,55	Itabirito Argiloso Friável	Itabirito Anfíbolítico Friável
	Amostra 04	153,70 - 161,10	Itabirito Argiloso Friável	Itabirito Goethítico Semi-Compacto a Friável
	Amostra 05	224,00 - 232,20	Itabirito Anfíbolítico Semi-compacto	Itabirito Silicoso Compacto
BRUFD00158	Amostra 01	159,40 - 179,55	Quartzito Ferruginoso Friável	Quartzito Ferruginoso e Aluminoso Friável
	Amostra 02	179,55 - 250,75	Itabirito Compacto	Itabirito Silicoso e Aluminoso Goethítico Friável
	Amostra 03	250,75 - 271,80	Itabirito Goethítico Compacto	Itabirito Goethítico Compacto
	Amostra 04	320,95 - 326,85	Quartzito Friável	Itabirito Anfíbolítico Semi-Compacto

As considerações e conceitos utilizados para definição das tipologias acima por meio da análise química são descritos a seguir:

- ✓ BRUFD00131 - Amostra 02 – Apresenta 2,32% de Mn. Acima de 2,00% de Mn é classificada como itabirito manganífero, independente da quantidade de Fe e Si.
- ✓ BRUFD00131 - Amostra 03 – Apresenta 53,4% de Fe. A partir de 52,00% Fe é classificada como itabirito rico. Apresenta alto teor de P (0,202%), que é compatível com Itabirito Anfíbolítico. O PPC (perda por calcinação) também é compatível com o Itabirito Anfíbolítico (> 5).
- ✓ BRUFD00131 - Amostra 04 – Apresenta 49% de Si, baixo teor de P, e PPC < 5, além de baixo teor de Mn.
- ✓ BRUFD00131 - Amostra 05 – Apresenta 50% de Si e PPC < 5.
- ✓ BRUFD00158 - Amostra 01 – Apresenta 18% de Fe. O alto percentual de Si, em torno de 60%, permite a classificação como quartzito. Apresenta ainda alto teor de Al (7%), P de 0,145% e PPC levemente elevado.
- ✓ BRUFD00158 - Amostra 02 – Apresenta 31% de Fe, 48,6% de Si, além de alto teor de Al (2,0%) e PPC igual a 3,53%.
- ✓ BRUFD00158 - Amostra 04 – Apresenta PPC > 5, alto teor de P (0,106%), 33% de Si.

5.5.3– MINERALOGIA DA ROCHA

Para análise mineralógica foram retiradas alíquotas de 0,5 kg que passaram pelas operações unitárias de homogeneização e quarteamento.

A partir daí, $\frac{1}{4}$ de cada amostra foi embutida em resina de poliéster e polida utilizando os abrasivos carbeto de silício (320 μ e 1200 μ), alumina (2 granulometrias – 3 μ e 1 μ) e pasta de diamante (1/4 de μ e 0,3 μ). A partir da confecção da preparação petrográfica (seção polida) a análise mineralógica foi feita em microscópio ótico LEICA DM 4500 P utilizando luz refletida.

5.5.3.1 – BRUFD00131

Amostra 01 – Itabirito Friável

Mineralogicamente prevalecem os tipos morfológicos distintos de hematitas, neste caso especular e granular, com predomínio da especular. Observam-se também quantidades mineralógicas (traços) de martita e magnetita. Verifica-se ainda a presença de muscovita e sulfetos (Figura 48).

Goethita e limonita estão presentes como minerais secundários e ocorrem substituindo ripas de muscovita ou associados à gibsita.

Os argilominerais estão representados por gibsita e caolinita. A caolinita define níveis paralelos aos níveis ferruginosos. A gibsita está presente em porções intragranulares e/ou associada à goethita e à mica.

Traços de óxidos de Mn ocorrem preenchendo as fraturas presentes na martita e magnetita.

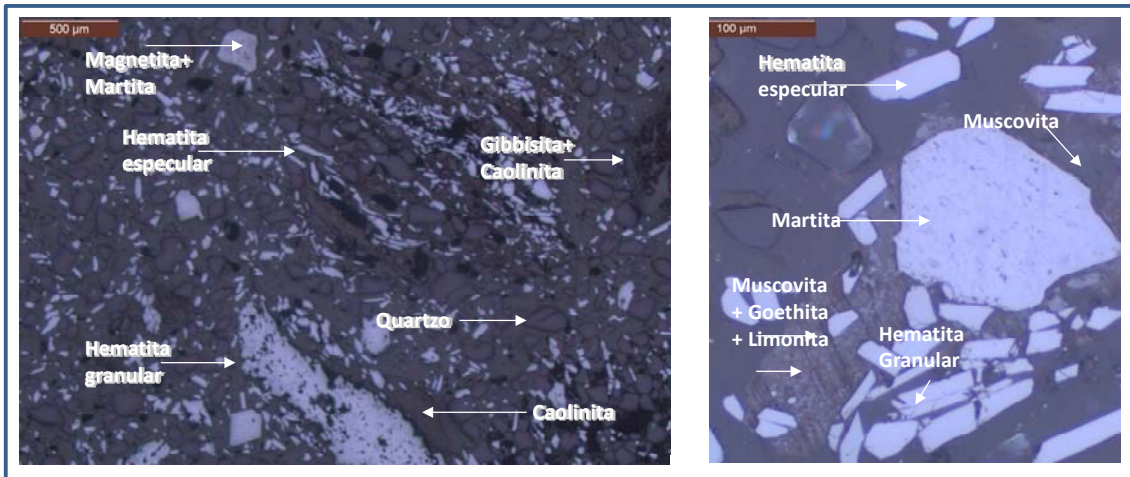


Figura 48. Fotomicrografia BRUFD 00131 – (96,05 m – 106,50 m) - Visão geral da amostra e detalhamento, ocorrendo substituição da muscovita pelos hidróxidos de ferro.

Amostra 02 – Itabirito Manganésífero Friável

Apresenta óxido de Mn em torno de 6%, e com associação com potássio e bário, possivelmente tratando-se de criptomelana.

Os óxidos de Mn aparecem paralelos ao bandamento do itabirito, ou soldando fases, ou livres.

Observam-se micas, provavelmente moscovitas, estandotingidas por goethita e limonita e alteradas para argilominerais.

Os minerais de ferro estão representados por hematita especular, tabular e granular. Raramente observa-se a presença de magnetita (Figura 49).

Caolinitas estão livres ou associadas às fases ferruginosas e a gibbsita está associada a goethita e mica.

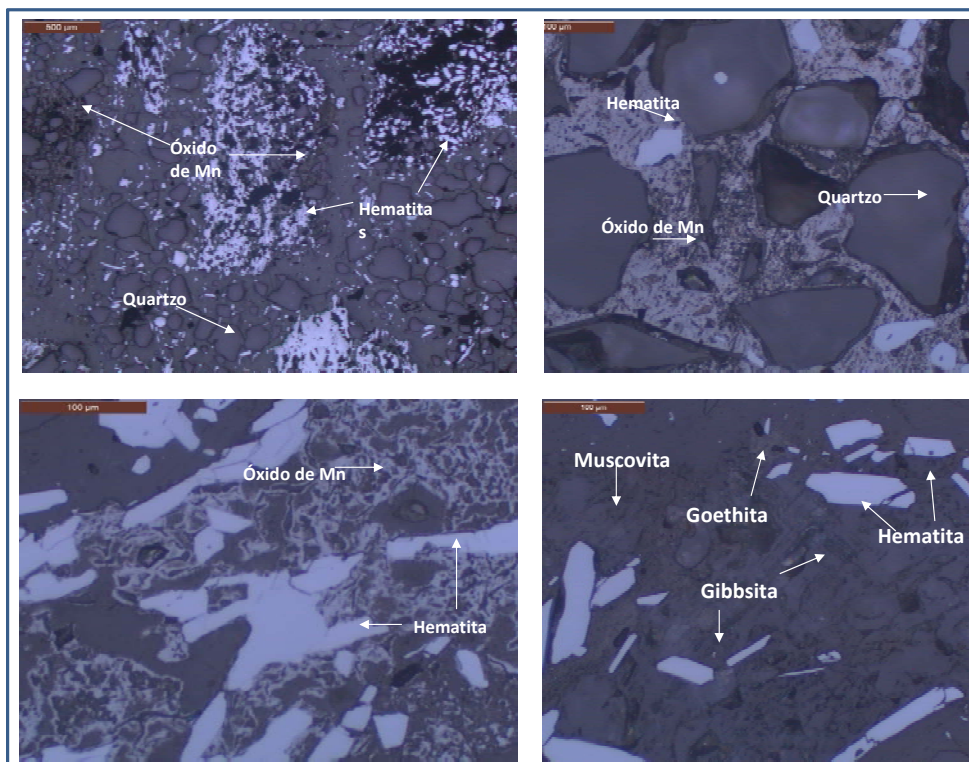


Figura 49. Fotomicrografia BRUFD 00131 – (106,50 m – 112,65 m) - Visão geral da amostra e detalhamento, mostrando a ocorrência de óxidos de manganês, minerais de ferro e minerais micáceos.

Amostra 03 – Itabirito Anfibolítico Friável

Nesta amostra as fases ferruginosas predominantes são martita, goethita e limonita. A magnetita ocorre pontualmente.

Pseudomorfos de provável anfibólio mostram, como produto de alteração, a goethita. A goethita também ocorre em associação com a gibbsite e como alteração da martita e Magnesita. É rara a ocorrência de caolinita (Figura 50).

Outros minerais não foram observados. Óxido de Mn é reconhecido pontualmente em meio à amostra.

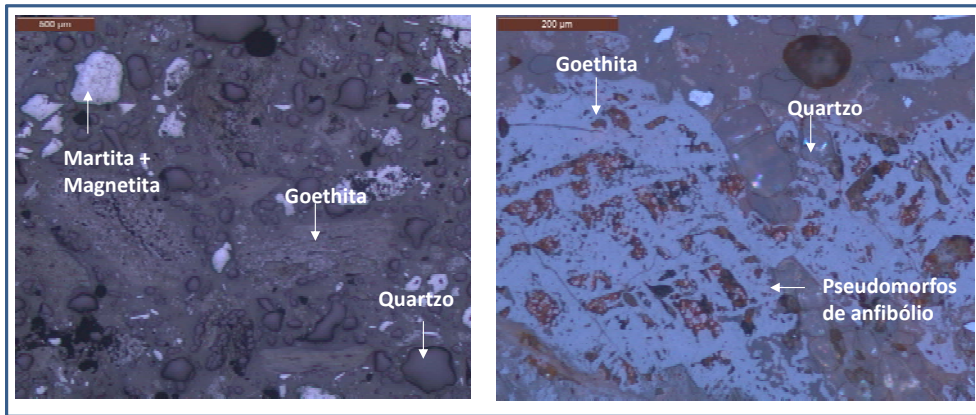


Figura 50 - Fotomicrografia BRUFD 00131 – (112,65 m – 119,55 m) - Visão geral da amostra e detalhamento, mostrando pseudomorfo de provável anfibólio, dentre outros.

Amostra 04 –ItabiritoGoethíticoSemi-Compacto a Friável

O mineral minério predominante é a martita, além da goethita. Hematitas estão presentes em pequenas proporções. Não foi observada a presença de magnetita, assim como do óxido de manganês.

Gibbsite e caulinita ocorrem pontualmente. Destaca-se que os cristais de quartzo e goethita são bimodais (2 tamanhos), exibindo partículas muito finas. A goethita também define pseudomorfos de minerais não identificados (Figura 51).

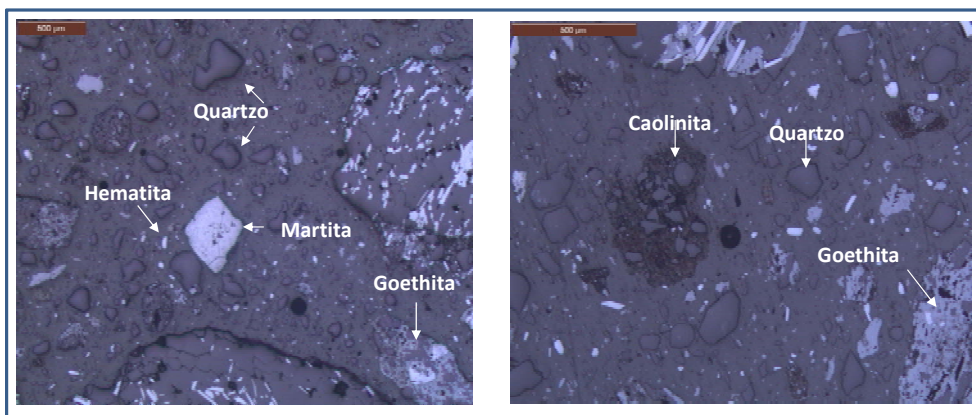


Figura 51 - Fotomicrografia BRUFD 00131 – (153,70 m – 161,10 m) - Visão geral da amostra e detalhamento da caulinita. Observa-se a bimodalidade dos cristais de quartzo e goethita.

Amostra 05 –Itabirito Silicoso Compacto

Na Figura 52, observa-se Itabirito mostrando bandamento entre níveis ferruginosos e níveis quartzosos. Os níveis ferruginosos mostram textura granoblástica definida por martita e magnetita, com raras hematitas associadas.

Os níveis quartzosos são granoblásticos. Infiltrações generalizadas de goethita são observadas com associação com limonita, gibsita e caolinita. Em meio a esses níveis, raros pseudomorfos de provável anfibólio são reconhecidos.

Ainda há predominância de martita e goethita como minerais minérios neste intervalo. A magnetita volta a aparecer. Hematitas estão presentes em pequenas proporções. Não são observados outros minerais e o óxido de manganês é raro.

A gibsita e caolinita ocorrem associadas a goethita e limonita.

A amostra está bastante goethitizada. A goethita ocorre também na forma pseudomórfica, alterando minerais não identificados. Há cristais bimodais na goethita e no quartzo. São minerais que mostram percentual composicional inversamente proporcional (Figura 52).

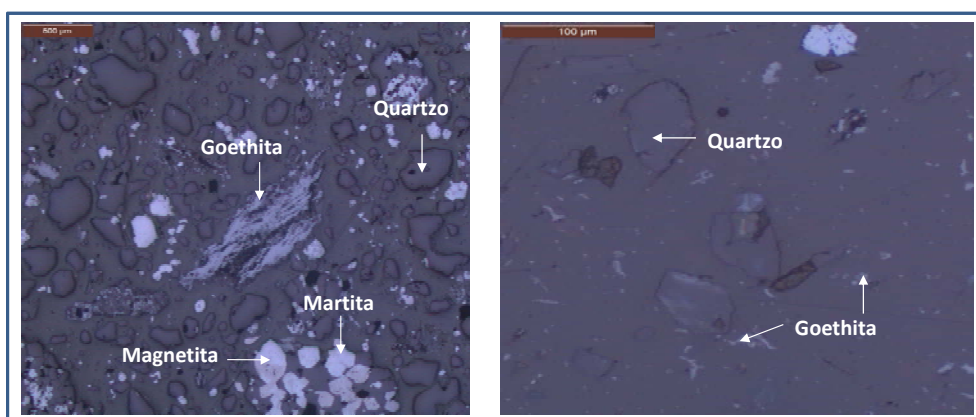


Figura 52. Fotomicrografia BRUFD 00131 – (224,00 m – 232,20 m) - Visão geral da amostra e detalhamento mostrando a bimodalidade dos cristais de goethita e quartzo.

5.5.3.2 – BRUFD00158

Amostra 01 – Quartzito Ferruginoso e Aluminoso Friável

Quartzito laminado mostrando intercalação de níveis ferruginosos e quartzosos, sendo este último predominante. A laminação observada está suavemente dobrada e crenulada.

Os níveis ferruginosos mostram textura lepidogranoblástica representada por cristais de hematitas especulares e granulares, que representam os maiores percentuais das fases ferruginosas.

Os níveis quartzosos mostram textura granoblástica. Em meio aos níveis são reconhecidas palhetas de muscovita substituídas por goethita. Porfiroclastos de magnetita são observados e ocorrem substituídos por hematita, goethita e óxido de manganês (Figura 53).

Goethita e limonita ocorrem pontualmente e mostram associação com rara gibsitita. Caolinita também foi observada intergranularmente ou associada a mica/muscovita.

Fraturas em uma única direção também estão presentes e não se encontram preenchidas.

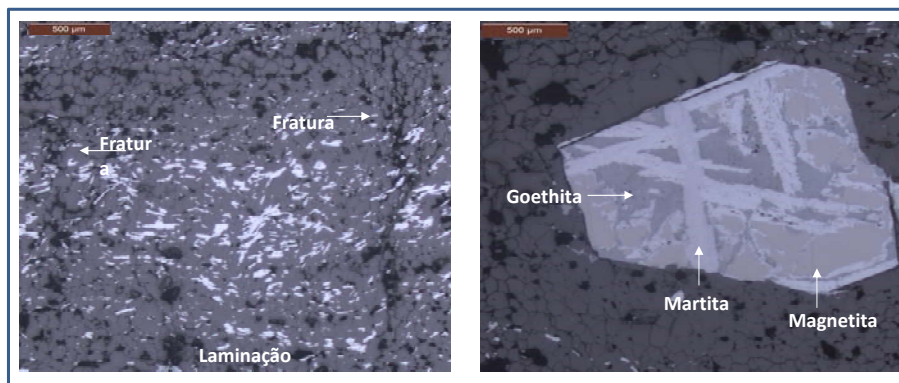


Figura 53. Fotomicrografia BRUFD 00158 – (159,40 m – 179,55 m) - Visão geral da amostra e detalhamento de porfiroclastos de magnetita e sua alteração.

Amostra 02 – Itabirito Silicoso e Aluminoso Goethítico Friável

Itabirito mostrando bandamento definido pela intercalação de níveis quartzosos e ferruginosos granoblásticos. Nos níveis ferruginosos observa-se martita em associação com magnetita. Já nos níveis quartzosos são observados agregados micáceos, além de pontuações de rutilo e turmalina.

Um processo de goethização intenso ocorre soldando e substituindo fases minerais e mostra limonita e caolinita associadas. A goethita é o principal mineral minério nesta litologia.

Destaca-se que a amostra é bastante porosa, sendo que os poros estão parcialmente preenchidos por gibsitita. Fraturas em duas direções são reconhecidas e encontram-se preenchidas por quartzo (Figura 54).

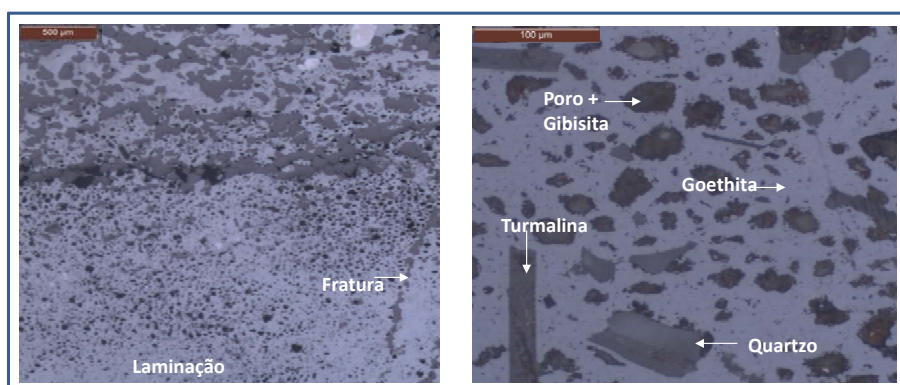


Figura 54. Fotomicrografia BRUFD 00158 – (179,55 m – 250,75 m) - Visão geral da amostra e detalhamento de minerais e poros parcialmente preenchidos.

Amostra 03 – Itabirito Goethítico Compacto

Itabirito bandado onde níveis quartzosos granoblásticos intercalam-se com níveis quartzo-ferruginosos granoblásticos a lepidogranoblásticos.

Hematita especular ocorre na forma de filmes orientados e, juntamente com a martita, constituem as fases ferruginosas predominantes (Figura 55).

Goethita e limonita ocorrem como produto de alteração da hematita especular, martita e agregados micáceos. Gibsita e caulinita são raras e estão associadas aos hidróxidos de ferro (goethita e limonita).

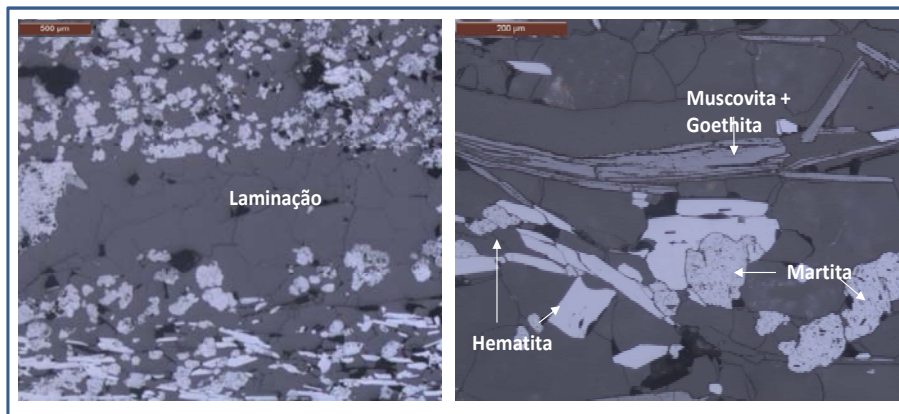


Figura 55. Fotomicrografia BRUFD 00158 – (250,75 m – 271,80 m) - Visão geral da amostra, apresentando a laminação presente e o detalhamento da goethização.

Amostra 04 – Itabirito Anfibolítico Semi - Compacto

Itabirito mostrando intercalação de níveis quartzosos granoblásticos e níveis goethíticos.

Os níveis goethíticos mostram restos de textura nematoblástica, na forma de um pseudomorfo de mineral acicular – provavelmente anfibólio. A pseudomorfose é marcada pela substituição parcial a total deste mineral prismático por goethita, limonita e quartzo.

Os hidróxidos são os minerais predominantes e raras martitas são reconhecidas. Gibsita ocorre associada a limonita. A caulinita não é observada. Fraturas em quatro direções são reconhecidas e em uma dessas direções ocorre preenchimento por óxido de manganês, que também ocorre associado à goethita (Figura 56).

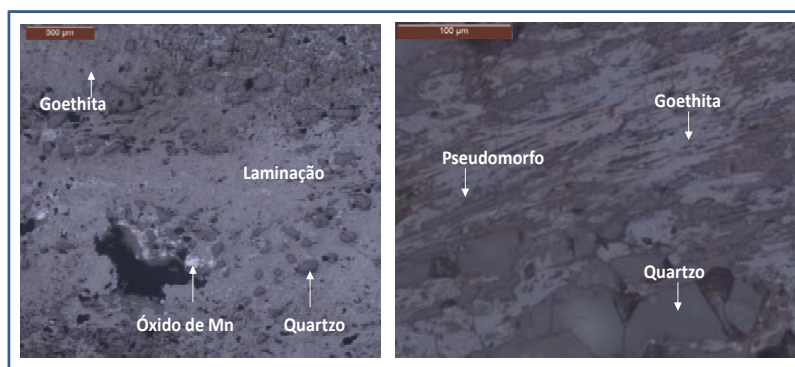


Figura 56. Fotomicrografia BRUFD 00158 – (320,95 m – 326,85 m) - Visão geral da amostra e o detalhamento de provável anfibólio pseudomorfizado.

5.5.4 – CARACTERIZAÇÃO DA LAMA GERADA DA PRÓPRIA AMOSTRA

5.5.4.1 – MINERALOGIA DA LAMA

Neste tópico será apresentada a mineralogia obtida para as partículas abaixo de 3μ , usualmente chamada de fração lama. Os materiais estudados foram obtidos a partir do peneiramento a úmido de cada uma das amostras.

Para coleta desta fração, toda a água utilizada passou por decantação e posterior desaguamento e secagem em estufa.

Após essa preparação física, as alíquotas foram submetidas a Difração de raios X. A amostra foi pulverizada abaixo de $0,045\text{mm}$ para a análise difratométrica. A mesma foi prensada e analisada no difratômetro de raios-X da PANalytical (modelo Empyrean) usando tubo de Co. Os difratogramas foram obtidos no intervalo de $5\text{-}80^\circ$ (2θ) com *stepsize* de $0,013^\circ$. As fases cristalinas foram identificadas e interpretadas pelo software High Score Plus.

Os resultados obtidos são semi-quantitativos, conforme mostra a Tabela 31.

Tabela 31. Mineralogia obtida da fração lama - resultados semi-quantitativos.

Furo	Amostra	Litologia	Hematita	Goethita	Quartzo	Caolinita	Muscovita	Chabazita	Rutilo
FDBRU 00131	96,05 - 106,50	Itabirito friável	M	m	S	m	m		
	106,50 - 112,65	Itabirito manganêsífero friável	S	m	m	m	m		m
	112,65 - 119,55	Itabirito anfíbolítico friável	m	S	S				
	153,70 - 161,10	Itabirito goethítico semi compacto a friável	m	m	S	m	m		
	224,00 - 232,20	Itabirito silicoso compacto	m	m	S	m	m		
BRU FD00158	159,40 - 179,55	Quartzito ferruginoso e aluminoso friável	m	m	m	m	M	m (p)	m
	179,55 - 250,75	Itabirito silicoso e aluminoso goethítico friável	S	m	S	m	S		m
	250,75 - 271,80	Itabirito goethítico compacto	m	m	M	m	m	m (p)	
	320,95 - 326,85	Itabirito anfíbolítico semi-compacto	m	m	M				

M = majoritária (>50%); S = secundária (20-49%); m = minoritária (<20%); p = provável

Em ambos os furos, predomina nas amostras ora hematita e goethita como mineral minério, ora quartzo como detritivo. O argilomineral presente na lama é a caolinita não observou-se a presença de gibsitita.

Muscovita e rutilo também estão presentes. Destaca-se a presença de chabazita em algumas amostras do furo BRUFD00158, sendo esse mineral pertencente ao grupo das zeólitas.

Um ponto relevante a ser discutido é a ausência de óxido de manganês na lama proveniente da amostra de itabirito manganêsífero friável, uma vez que praticamente todas as outras tipologias são encontradas. Conforme visto no item 4.5.1, o itabirito manganêsífero é a tipologia que gera maior percentual de massa para as frações finas.

Pode ser que a ausência de minerais deste grupo na lama seja apenas uma questão de tamanho da partícula, não havendo partículas menores que 0,045 mm. Porém, os diversos problemas apresentados na perfuração desta tipologia, aliados ao aspecto físico da amostra + lama de caráter “pegajoso”, nos levam a sugerir uma análise mais aprofundada da interferência desta tipologia, como continuação deste estudo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Sobre a Metodologia Aplicada

✓ A metodologia estabelecida garante uma perfuração eficiente, rápida, segura e com custo compatível com a operação, além de produzir um testemunho íntegro e de qualidade. Demonstra, ainda, a influência do fluido e do monitoramento dos parâmetros de perfuração na execução da sondagem de minério de ferro.

✓ Na execução dos furos selecionados para aplicação da metodologia, não houve trancamento. Todos os furos atingiram o objetivo programado e não houve perda de nenhum deles. Isso principalmente devido aos monitoramentos das propriedades do fluido e/ou parâmetros de perfuração, que permitiram a detecção de problemas operacionais e sua tratativa, evitando que o quadro evoluísse para algo sem solução.

✓ Durante a execução dos furos, por várias vezes foi possível perceber a importância de se aplicar os monitoramentos sugeridos na metodologia, bem como as reduções de diâmetros, o regime *full time* e as percepções da equipe. O monitoramento da execução dos furos permitiu a identificação correta do problema, evitando assim ocorrências de maiores consequências, como trancamento de ferramental, ou até uma possível perda do furo.

✓ A aplicação da metodologia possibilitou, apesar de um acréscimo de 5% na profundidade média em relação aos dados de campanhas anteriores, uma redução de 41,18% no tempo de execução médio dos furos, um acréscimo de 81,01% na taxa de penetração diária e um acréscimo de 69,51% na produtividade média. Como

consequência, obteve-se uma redução do tempo de exposição dos colaboradores ao risco.

✓ A metodologia permitiu uma redução nos custos fixos em torno de 41%, uma vez que o aumento da produtividade permite que a campanha seja realizada em menos tempo. Além disso, o monitoramento permite uma redução indireta nos custos, por ter menos desgaste e quebra nos equipamentos.

✓ O melhor desempenho é obtido quando se trabalha somente com fluido polimérico, e executando monitoramento das propriedades do fluido e dos parâmetros de perfuração.

✓ Dentro da metodologia aplicada, os resultados pioraram medida que alterou-se o fluido e os monitoramentos, na sequência abaixo, do melhor para o pior (considerar que outros fatores podem ter em pequena escala influenciado nos resultados).

- Fluido polimérico e monitoramento do fluido e da perfuração.

- Fluido convencional + polimérico e monitoramento do fluido e da perfuração.

- Fluido convencional + polimérico e monitoramento do fluido.

- Fluido convencional + polimérico e monitoramento da perfuração.

✓ Do melhor para o pior desempenho a produtividade caiu em torno de 38%.

✓ Mesmo o pior resultado obtido com este estudo é melhor que os resultados atingidos nas campanhas anteriores.

✓ Para trabalhos futuros, sugere-se fazer uma avaliação complementar de cada mina da Vale, definindo, entre as quatro opções acima, a melhor a ser aplicada para cada caso, considerando a complexidade operacional, a evolução no desempenho, e o custo com o fluido e com a manutenção de um laboratório de fluido na área. Assim será possível melhorar o planejamento, criando um projeto operacional para cada furo.

Sobre o Monitoramento das Propriedades do Fluido e dos Parâmetros de Perfuração

✓ É possível ampliar o desempenho da sondagem rotativa diamantada, reduzindo suas limitações e imprimindo maior velocidade às operações, quando se executa o monitoramento dos parâmetros de perfuração, e quando se utiliza um fluido com formulação compatível com o sistema a ser perfurado, com garantia da manutenção de suas propriedades durante a execução. Este fato ganha maior importância à medida que os furos ficam mais profundos.

✓ Na perfuração da porção predominantemente friável, o essencial é o controle da reologia (filtrado, gel, viscosidade) aliado ao projeto de telescopagem para preservar a formação.

✓ Na perfuração da porção predominantemente compacta, o essencial é focar em lubrificação e coroa, para garantir a manutenção da taxa de avanço.

✓ O monitoramento das propriedades do fluido e dos parâmetros de perfuração nos permite detectar problemas operacionais a tempo de se evitar problemas maiores, possibilitando a aplicação de soluções que reduzam as consequências negativas.

✓ Não é simples conseguir perfurar continuamente com retorno, mas é possível trabalhar com a coluna preenchida todo o tempo, desde que se faça o monitoramento dos parâmetros de perfuração e das propriedades do fluido, e se apliquem as medidas corretivas.

✓ A selagem total e/ou parcial das paredes do furo possibilita a manutenção da coluna preenchida por lama, que já garante uma boa execução com ganhos consideráveis. Trabalhar continuamente com retorno não é uma tarefa fácil e deve ser foco de outro estudo complementar a este.

✓ O controle do filtrado e seu tratamento por meio de ajustes na formulação do fluido permitiu, principalmente em rocha macia, reduzir o risco de prisão diferencial.

✓ O controle das pressões dentro do furo, por meio do monitoramento das propriedades do fluido realmente contribuiu para evitar problemas operacionais.

✓ O monitoramento dos parâmetros de perfuração foi essencial para a boa evolução do furo, pois o acompanhamento das alterações e suas tratativas evitaram consequências maiores e contribuíram para minimizar as ocorrências negativas.

✓ Excepcionalmente para o furo BRUFD00097, não houve monitoramento das propriedades do fluido. Assim, as pressões do furo não foram totalmente controladas, possibilitando o colapso em alguns pontos. Sem este controle, acredita-se que a perda de fluido, constante durante toda a perfuração, pode ter sido em alguns casos, induzida por excesso de pressão hidrostática.

✓ As maiores dificuldades ocorrem na perfuração de material friável, com destaque para as passagens hidratadas (IGOF) e para o IMNF.

✓ Neste estudo, a perda induzida pela operação ocorreu com maior frequência nas camadas hidratadas, o que mostra que nestas passagens o monitoramento deve ser contínuo para evitar problemas maiores.

✓ É frequente o entupimento das saídas das coroas próximo à ocorrência de pistoneio mecânico. Os problemas ocorridos neste estudo levam a suspeitar que estas ocorrências aconteçam preferencialmente nas litologias hidratadas e na litologia IMNF.

✓ A perfuração na litologia IMNF é bastante complexa. Ao se juntar com a lama, apresenta aspecto “pegajoso”, facilitando o entupimento das coroas, Além disso, foi comum a ocorrência do efeito seringa e de prisão diferencial relacionados a esta litologia.

✓ Fazendo uma análise conjunta de todas as ocorrências, fica evidente a importância do monitoramento tanto das propriedades do fluido quanto dos parâmetros de perfuração, para o atingimento da profundidade final programada e do objetivo do furo, com qualidade, segurança e alta produtividade e baixo custo. Importante observar que, sem monitoramento, a percepção desses problemas não ocorre em tempo real, podendo levar ao travamento e até mesmo perda do furo.

✓ Como complemento a este estudo, sugere-se o monitoramento contínuo dos parâmetros de perfuração e a gravação destes, para compor um banco de dados e, a

partir daí, relacionar as variações dos parâmetros com as litologias perfuradas e as condições, obtendo assim uma rotina com ações pré-determinadas.

✓ Com foco na preparação do fluido, sugere-se ainda testar a utilização de uma Central de Preparação de Lama, para promover uma mistura ideal e avaliar o uso do caminhão pipa para distribuição de lama.

Sobre o Desenvolvimento Operacional

✓ A execução dos furos de sondagem com variação do diâmetro, produzindo o efeito de telescopagem, minimiza consideravelmente problemas operacionais, pois reveste-se automaticamente o furo, o que é fundamental nas porções friáveis e /ou fraturadas.

✓ O regime *full time* colaborou para o aumento da taxa de utilização e consequente aumento da produtividade.

Sobre a Garantia e Confiabilidades dos Dados, Análises e Resultados

✓ As descrições geológicas e a utilização do método gama-gama, permitiram conhecer as características de cada litologia, bem como garantir o posicionamento dos contatos, fundamental para o sucesso da metodologia;

✓ As descrições geotécnicas e os relatos dos sondadores permitiram, por meio dos parâmetros para classificação do maciço rochoso, avaliar as causas dos problemas operacionais ligados diretamente à formação rochosa, bem como o reconhecimento dos sinais que indicam que um problema operacional está prestes a ocorrer, e assim promover a sua tratativa;

Sobre a Investigação de Possíveis Interferências das Litologias Perfuradas

✓ Dentre todas as litologias investigadas, o itabirito manganésífero é o que maior percentual de massa gera para as frações finas, ou seja, é a litologia que produz maior percentual de finos.

✓ A ausência de óxido de manganês na lama proveniente da amostra de itabirito manganésífero friável pode estar ligada somente uma questão de tamanho das partículas, não havendo partículas menores que 0,045 mm. Porém, devido à maior geração de finos pelo IMNF, ao fato de que praticamente todas as outras tipologias são encontradas na lama gerada pelas suas amostras, aos diversos problemas apresentados na perfuração desta tipologia e ao aspecto físico da amostra + lama de caráter “pegajoso”, sugere-se um estudo mais aprofundado da interferência desta tipologia, como continuação deste estudo.

✓ Conforme já esperado, os dados gerados confirmam que as quantidades de Ca e Mg encontradas nas tipologias perfuradas não incorporam na água utilizada no fluido de perfuração, devido à baixa concentração, não havendo interferência na dureza da água. De qualquer forma, à medida que o teor de ferro aumenta, diminui o cálcio e o magnésio, ou seja, nas porções mais ricas, a pureza da água em termos de íons é maior.

✓ A correção da classificação visual das tipologias perfuradas pela análise química foi importante para garantir a confiabilidade da análise dos dados e seus resultados, uma vez que toda a análise foi feita considerando a tipologia perfurada.

✓ Na avaliação mineralógica das amostras em preparações petrográficas não foi identificado mais nenhum item relevante que pudesse contribuir com a análise dos problemas operacionais ocorridos na perfuração.

REFERÊNCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

Alkmin, F.F., Marshak, S. (1998). *The transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: paleoproterozoic collision and collapse in the southern São Francisco Craton Region*. Precambrian Research, V. 90, n. 1-2, p.29-58.

Almeida, F.F.M.(1977). *O Cráton do São Francisco*. Revista Brasileira de Geociências, Vol. 7 (4): 349 – 364.

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 perfilação geofísica efetuada em furos de sondagem em jazidas de ferro da Companhia Vale do Rio Doce – Minas Gerais*. V Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto & V Congresso Brasileiro de Minas Subterrâneo, IBRAM, 16 p.

Amorim, L.V. (2003). *Melhoria, proteção e recuperação de fluidos hidroargilosos para uso na perfuração de poços de petróleo*. Tese de Doutorado, CCT/UFPB, Campina Grande.

Barbosa, A.M.L. (1961). *Tectônica do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais*. In: *Semana de Estudos Geológicos e Econômicos do Quadrilátero Ferrífero, Ouro Preto*. V.I, p.49-52. (Boletim SICEG).

Barnes, H.A., Hutton, J.E., Walters, K.F.R.S. (1993). *An introduction to rheology*. London – New York – Tokio: Elsevier Science Publishers, 3 V.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classification – A complete manual for geologist, mining and petroleum engineers*. New York, John Wiley. 251p.

Burke, C.J., Veil, J.A. (1995). *Synthentic – based drilling fluids have many environmental pluses*. Oil e Gás Journal 27, p. 59-64.

Caenn, R.,Chillingar, G. V. (1995). *Drilling fluids: state of the art*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 221-230.

Campos, W. (1986). *Variação de pressão em poços de petróleo ocasionada por movimento de coluna*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto.

Carneiro, M.A. (1992). *O complexo metamórfico Bonfim Setentrional – Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do arqueano*. São Paulo, 233 p.

Carneiro, M.A., Teixeira, W., Machado, N. (1993). *Evolução geológica policíclica dos terrenos granito-greenstone do arqueano superior do cráton do São Francisco meridional: um exemplo a partir do complexo metamórfico Bonfim Setentrional*. In: Simpósio Cráton São Francisco, 2. Anais, Salvador, SBG-BA, SE/SEM.

Carneiro, M.A., Noce, C.M., Teixeira, N. (1995). *Evolução policíclica do Quadrilátero Ferrífero: uma análise fundamentada no conhecimento atual da geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Sm-Nd*. Revista da Escola de Minas, V.48, n.3.

Chemale, F. Jr.; Rosière, C.A.; Endo, I. (1994). *The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Precambrian Research, nº 65, p.25 - 54.

Cordani, U.G., Kawashita, K., Muller, G., Quade, H., Reimer, V., Roeser, H. (1980). *Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento na borda sudeste do Quadrilátero Ferrífero*. Anais, Academia Brasileira de Geociências, 52.

Darley, H.C.H., Gray, G. R.(1988). *Composition and properties of drilling and completion fluids*.FifthEdition, GulfPublishingCompany, Houston, Texas.

Diaz, E. (2002).*Reologia aplicada a revestimento de papel*. Curso de especialização em papel e celulose.

Dorr, J.V.N., Gair, J.E., Pomerene, J.B., Rynearson, G.A. (1957). *Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brasil*. Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Fomento da Produção Mineral, Avulso, V. 81, 31 p.

Dorr, J.V.N. (1969). *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Washington, USGS/DNPM. Prof. Paper 641-A, 110p.

Endo, I., Silva, L.G., Zavaglia, G. (2004).*Projeto Brucutu – Dois Irmãos. Mapeamento geofísico, estratigrafia e arcabouço estrutural*. Relatório Interno Vale.

Farias, K. V. (2009).*Uso de aditivos nacionais no desenvolvimento de fluidos aquosos para perfuração de poços de petróleo*. Tese de Doutorado. UFPB. Campina Grande.

Ferraz, A. I. (1977).*Manual de engenharia dos fluidos de perfuração*.DivisãoMagcobarGrupo Oilfield Products Dresser Industries.

Fullagar, P.K., Fallon, G.N. (1997).*Geophysics in metalliferous mines for ore body delineation and rock mass characterisation*.Proceedings of Exploration 97: Fourth

deccennial international conference on mineral exploration. Edited by A.G. Gubins, p. 573-584.

Gair, J.E. (1962). *Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil*. Ouro Preto: DNPM/USGS, Professional Paper, Boletim 341 A, 111 p.

Hart's E&P. (2002). *Logging history rich with Innovation*. In www.eandpnet.com, p. 52 – 55.

Herz, N. (1970). *Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. USGS/DNPM. Professional Paper, 641 B, 57 p.

Jordt Evangelista, H., Muller, G. (1986). *Petrology of a transition zone between the Archean Craton and the Coast Belt, SE of the Iron Quadrangle, Brazil*. *Chemie der Erde* 45: 129 – 145.

Ladeira, E.A. (1980). *Metallogenesis of gold at the Morro Velho Mine and in the Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Univ. Western Ontario, unpubl. PhD. Thesis, 272 p., London, Ontario/Canada.

Lobato, L.M., Baltazar, O.F., Reis, L.B., Achtschin, A.B., Baars, F.J., Timbó, M.A., Berni, G.V., Mendonça, B.R.V., Ferreira, D.V. (2005). *Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa*. Belo Horizonte: CODEMIG. DVD.

Lumms, J.L. e Azar, J.J. (1986). *Drilling fluids optimization, a practical field approach*. PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma.

Machado, N., Noce, C.M., Belo de Oliveira, O.A., Ladeira, E.A. (1989). *Evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero no arqueano e proterozóico inferior, com base na cronologia U – Pb*. In: V Simpósio de Geologia de Minas Gerais, SBG, Anais, 1: 1- 5.

Machado, J.C.V. (2002). *Reologia e escoamento de fluidos – ênfase na indústria de petróleo*. Ed. Interciência.

Maxwell, C. H. (1958). *The batatal formation*. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 2(7), p. 60-61.

Melo, K. C. (2008). *Avaliação e modelagem reológica de fluidos de perfuração base água*. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Engenharia Química, UFRN, Natal, RN.

Melo, T. J.A. (2005). *Notas de aula do curso de reologia*. UAEMA/CCT/UFCG.

Nery, G. G. (2003). *Perfil de densidade*. Notas de Aula, 8p.

Oliveira, L.M. *Bentonita*. DNP/SEDE. Disponível em: www.dnpm.gov.br. Acesso em: outubro de 2008.

O'Rourke, J.E. (1957). *The stratigraphy of the metamorphic rocks of the Rio de Pedras and Gandarela Quadrangles, Minas Gerais, Brasil*. University of Wisconsin, Wisconsin, PhD. Thesis, 106 p.

Pereira, E. *Química dos polímeros e aplicações – Parte IV*. Disponível em <www.systemmud.com.br>. Acesso em: 25 de maio de 2003.

Pereira, E. (2003a). *O uso de inibidores de argilas como solução de problemas em sondagem*. IV Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste, p. 3 – 20.

Pereira, E. (2004). *Curso de perfuração e reabilitação de poços*. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá, MT.

Pereira, E. (2006a). *Química dos polímeros e aplicações – Parte IV*. Disponível em: www.systemmud.com.br, Acesso em: 08 de julho.

Renger, F.E., Noce, C.M., Romano, A.W., Machado, N. (1994). *Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Geonomos, nº 2, V.1, p.1 – 11.

Rosière, C.A., Siemes, H., Quade, H., Brokmeier, H.G., Jansen, E.M. (2001). *Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite*. Journal of Structural Geology, V.23, p. 1429 – 1440.

Silva, A.M., Chemle Jr, F., Kuyumjian, R.M., Heaman, I. (1995). *Quadrilátero Ferrífero and Southern Espinhaço, Minas Gerais, Brasil*. Revista Brasileira de Geociências, V. 25 (2): 124-137.

Souza Santos, P. (1989). *Ciência e tecnologia de argilas*. Vol. 1, Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo.

Teixeira W. (1982). *Geochronology of southern part of São Francisco Craton*. Rev. Bras. Geoc., **12**(1-3):268-277.

Thomas, J.E. (2001). *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Rio de Janeiro, Interciência, Petrobrás.

Vale. (2011). *Revisão dos recursos – Mina de Brucutu – Minério de ferro*. Relatório Interno, DIPF – Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos, 159 p.

Wallace, R. M. (1958). *The Moeda Formation*. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, 2(7), 59-60.

ANEXOS

ANEXO I - PERFIS LITOLÓGICOS.

ANEXO I.1 – Perfil litológico do furo BRUFD00131

ANEXO I.2 - Perfil litológico do furo BRUFD00158

ANEXO I.3 - Perfil litológico do furo BRUFD00156

ANEXO I.4 - Perfil litológico do furo BRUFD00112

ANEXO I.5 - Perfil litológico do furo BRUFD00097

ANEXO II – BANCO DE DADOS.

ANEXO II.1 – Banco de dados do furo BRUFD00131

ANEXO II.2 - Banco de dados do furo BRUFD00158

ANEXO II.3 - Banco de dados do furo BRUFD00156

ANEXO II.4 - Banco de dados do furo BRUFD00112

ANEXO II.5 - Banco de dados do furo BRUFD00097

ANEXO III – PERFIL COMPOSTO (GEOFÍSICA + PARÂMETROS DE PERFURAÇÃO).

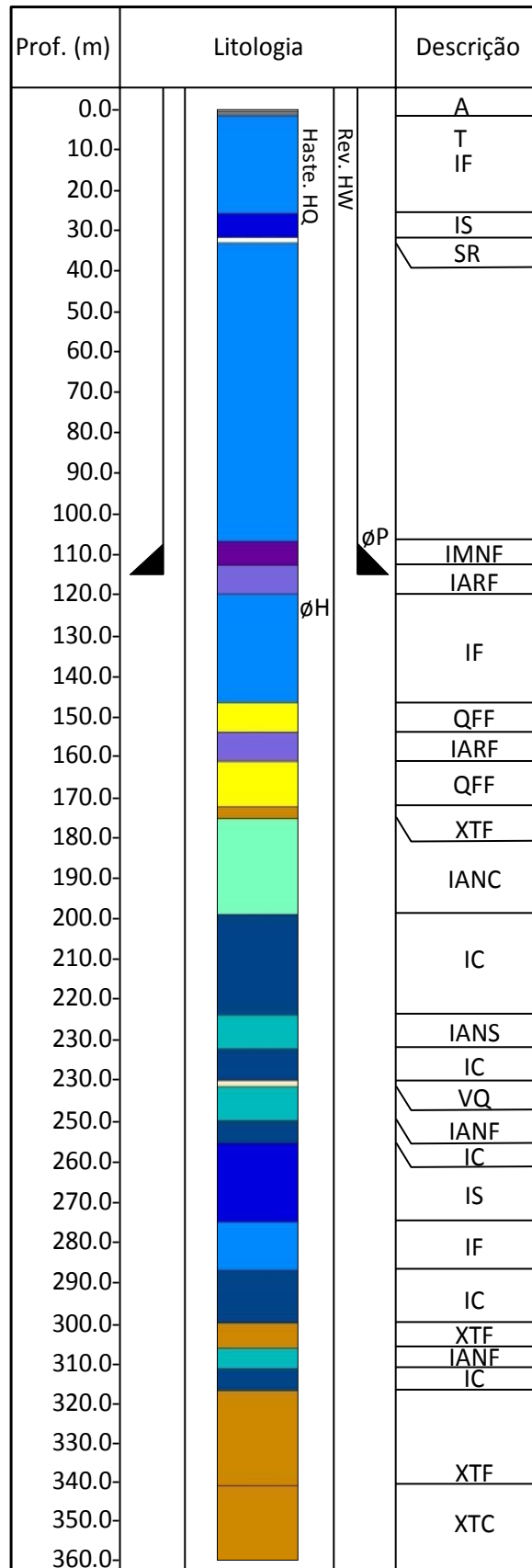
ANEXO II.1 –Perfil composto do furo BRUFD00131

ANEXO II.2 - Perfil composto do furo BRUFD00158

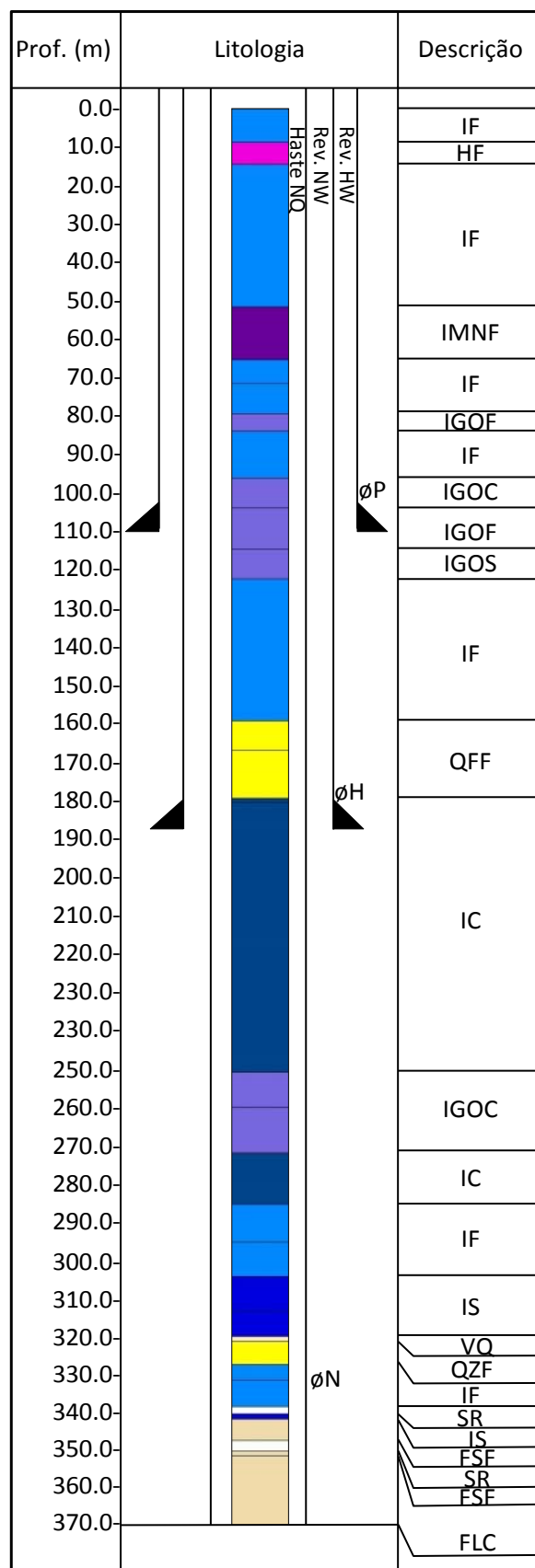
ANEXO II.3 - Perfil composto do furo BRUFD00156

ANEXO II.4 - Perfil composto do furo BRUFD00112

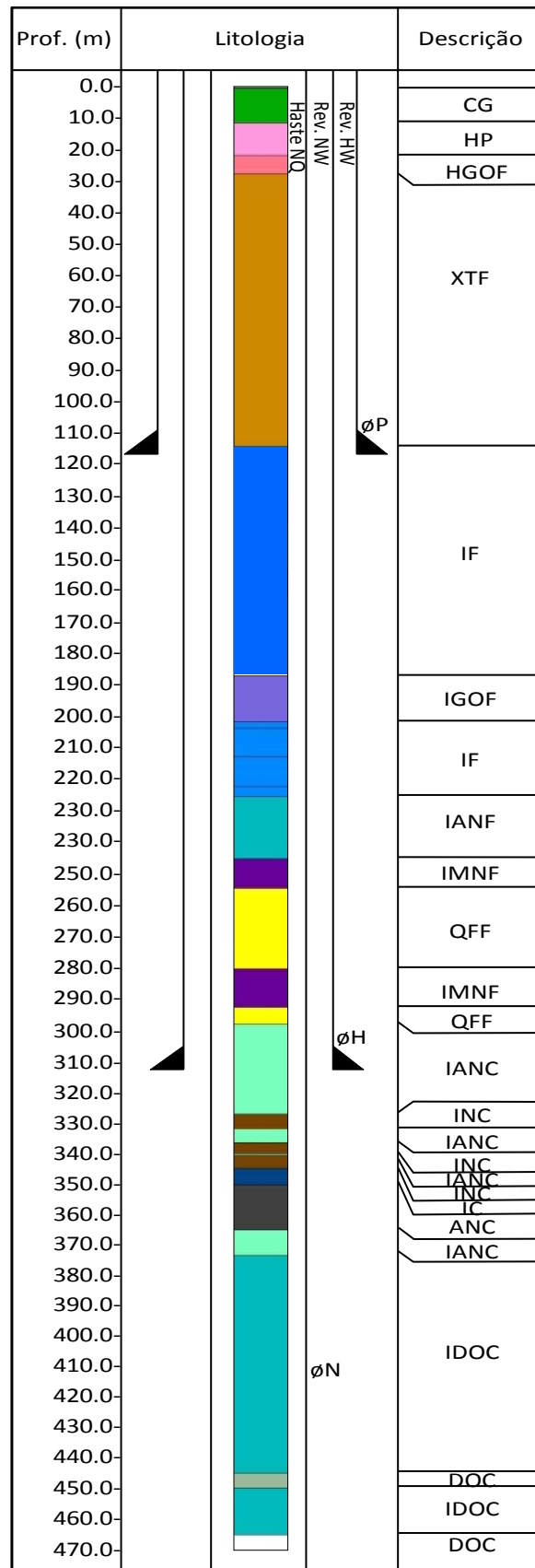
ANEXO I.1 - PERFIL LITOLÓGICO DO FURO BRUFD00131



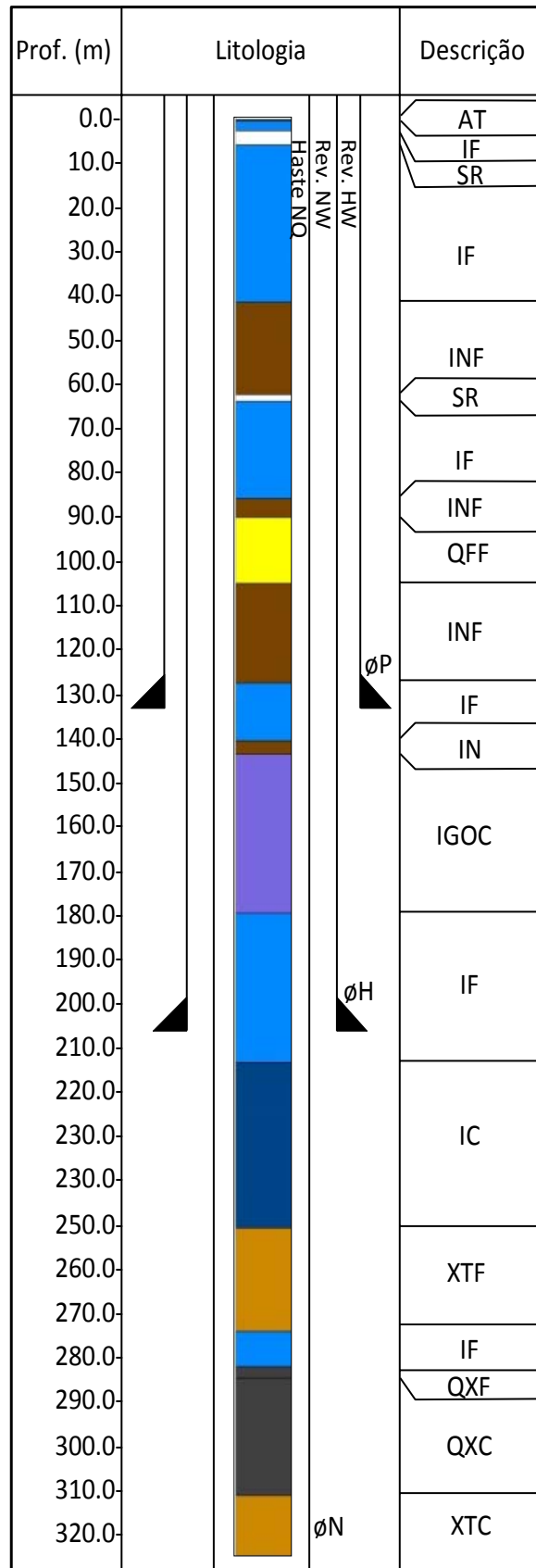
ANEXO I.2 - PERFIL LITOLÓGICO DO FURO BRUFD00158



ANEXO I.3 - PERFIL LITOLÓGICO DO FURO BRUFD00156



ANEXO I.4 - PERFIL LITOLÓGICO DO FURO BRUFD00112



ANEXO I.5 - PERFIL LITOLÓGICO DO FURO BRUFD00097

