



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO / ESCOLA DE MINAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

NÚCLEO DE GEOTECNIA – NUGEO

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE PERFILAGEM GEOFÍSICA NA
PESQUISA DE MINÉRIO DE FERRO – ESTUDO DE CASO:
DEFINIÇÃO DE CONTATOS LITOLÓGICOS NA MINA DE
CAPANEMA, MG.**

Luciano Fonseca

Ouro Preto – MG

2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO / ESCOLA DE MINAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

NÚCLEO DE GEOTECNIA – NUGEO

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE PERFILAGEM GEOFÍSICA NA
PESQUISA DE MINÉRIO DE FERRO – ESTUDO DE CASO:
DEFINIÇÃO DE CONTATOS LITOLÓGICOS NA MINA DE
CAPANEMA, MG.

Luciano Fonseca

Orientador: Prof. Dr. Antônio Abel Gonzáles Carrasquilla

Ouro Preto – MG

2014

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE PERFILAGEM GEOFÍSICA NA PESQUISA DE MINÉRIO DE FERRO- ESTUDO DE CASO: DEFINIÇÃO DE CONTATOS LITOLÓGICOS NA MINA CAPANEMA, MG

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 24 de outubro de 2014, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Presidente: Prof. Dr. Antonio Abel Carrasquilla



Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar



Dr. Marco Antonio Braga

F676a Fonseca, Luciano.

Avaliação de métodos de perfilagem geofísica na pesquisa de minério de ferro –
Estudo de caso [manuscrito]: definição de contatos litológicos na Mina de
Capanema, MG./ Luciano Fonseca. – 2014.

107f.: il. color., grafs., tabs., mapas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Abel Carrasquilla.

Inclui perfis geofísicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

*À Erika,
Rafael, Debora
e aos meus pais,
Ivanir e Neide*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha esposa Erika pelo constante apoio, incentivo e compreensão. Aos meus filhos Rafael e Debora, pelos inúmeros finais de semana forçadamente em casa vendo o pai escrever um monte de coisas incompreensíveis.

Aos meus pais Ivanir e Neide, que me incentivaram desde criança a reconhecer a importância do estudo e principalmente ao meu querido e finado Pai, que, infelizmente não poderá estar presente nesse momento tão marcante; embora eu tenha certeza, que esteja onde estiver *Ele* estará vibrante e orgulhoso.

À Vale, nas pessoas de Henry Galbiatti e Lucio Cavalli, pela confiança e apoio integral no desenvolvimento do trabalho, bem como no fornecimento da base de dados para estudo e principalmente ao meu Gerente Marco Antônio Braga pelo suporte técnico, compreensão e postura em relação ao prazo para conclusão.

Ao meu orientador informal Dr. Dionísio Uendro Carlos, geofísico, pelas discussões técnicas de alto nível, correção do texto e orientação no desenvolvimento de todo o trabalho.

Ao colega Wanderson Roberto Pereira, geofísico, pela paciência nas intermináveis discussões técnicas a respeito da interpretação dos perfis geofísicos, bem como na geração dos perfis e ainda na consultoria de uso do *software* de interpretação.

Ao colega Rodrigo Rocha Souza, o Potiguar, pela paciência e suporte na elaboração de figuras e formatação final do texto.

A todos os colegas Vale que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração do trabalho e que eu possa estar negligenciando.

Aos Professores e, em especial, ao Orientador Antonio Abel Gonzáles Carrasquilla, pela objetividade das correções e que apesar da distância, manteve-se presente.

Finalmente, a todo Corpo Técnico do Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, pelo excelente nível de capacitação.

RESUMO

A indústria da mineração de ferro vem atravessando uma fase de pleno desenvolvimento tecnológico, numa busca constante de eficiência de processos, visando a redução de custos e prazos na pesquisa mineral. A rápida geração de informações precisas e confiáveis é um diferencial de mercado. Nesse sentido e como sugestão de uma alternativa prática, foram testados alguns métodos de perfilagem geofísica em furos de sonda testemunhados, procurando-se fazer uma avaliação cruzada comparativa entre as informações fornecidas pelos métodos direto (testemunhagem) e indireto (profilagem geofísica). Dessa forma, procurou-se comparar os contatos litológicos identificados na descrição geológica dos testemunhos e suas respostas nos perfis geofísicos. De maneira análoga, porém inversa, perturbações ou alterações nos perfis geofísicos foram confrontadas com os testemunhos, procurando compreender e explicar as possíveis causas dessas alterações. Assim foram realizados levantamentos de cáliper, gama natural, gama-gama, nêutrons e sônico, em furos abertos, com posterior geração de perfis no *software WellCad*[®] e procurando respostas frente a variações composicionais e texturais de formações ferríferas com graus variados de hidratação e compactação. Desse modo, furos de sonda foram previamente escolhidos na Mina de Capanema, localizada na região central do Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil, de forma a se gerar uma gama satisfatória de litologias, que atendessem a essa premissa. A metodologia mostrou resultados satisfatórios, registrando bem a presença de corpos argilosos, hidratados, bem como a transição de itabiritos friáveis para compactos. Dessa forma, abre-se uma fronteira para possíveis alterações em malha de pesquisa testemunhada, com conseqüente substituição parcial por furos roto-percussivos, de caráter destrutivo, porém mais baratos e com prazo de execução bem inferior aos furos testemunhados e, com a perfilagem geofísica servindo de suporte para a interpretação geológica de subsuperfície.

Palavras-chave: perfilagem geofísica, sondagem testemunhada ou rotopercussiva

ABSTRACT

The iron ore mining industry is going through a phase of full technological development, in a constant search for efficient processes to reduce costs and delays in mineral exploration. The rapid generation of accurate and reliable information is a market differentiator. In this sense and as a practical alternative suggestion, methods of geophysical logging were tested in coring boreholes, trying to make a crossover comparative evaluation between the information provided by direct methods (core descriptions) and indirect methods (geophysical logging). Thus, allowing compare the contacts between lithologies identified in the geological description of the cores and their answers in geophysical profiles. Similarly, disturbances or changes in the geophysical logs were confronted with the core descriptions, in order to understand and explain the possible causes of such changes. Thus, caliper, natural gamma, gamma-gamma, neutron and sonic boreholes surveys were performed in open holes, with subsequent generation of logs on *WellCad*® software and looking for answers on the compositional and textural variations of iron formations with varying degrees of hydration and hardness. Drill holes are chosen in Capanema Mine, located in central region of *Quadrilátero Ferrífero*, Minas Gerais, Brazil, in order to generate a satisfactory range of lithologies, who fulfilled this premise. The methodology has shown satisfactory results, detecting the presence of clay and hydrated bodies, as well as the transition from brittle to compact itabirites. So it's an opening boundary for possible changes in geological drilling grid analysis with consequent partial replacement by roto-percussive holes, with a destructive characteristic, with lower cost and with less execution time, with geophysical logging serving as a support for subsurface geological interpretation.

Keywords: geophysical logging, cored drilling, reverse circulation drilling

SUMÁRIO

| | |
|----------------------------------------------------------------|----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 1 |
| 1.2. RELEVÂNCIA DO TEMA – A INDÚSTRIA DO MINÉRIO DE FERRO..... | 3 |
| 1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA E DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 6 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 9 |
| 2.1. O QUADRILÁTERO FERRÍFERO (QF) E A MINERALIZAÇÃO DE FERRO | 9 |
| 2.1.1. ESTRATIGRAFIA | 9 |
| 2.1.2. ARCABOUÇO ESTRUTURAL | 14 |
| 2.1.3. GEOCRONOLOGIA E METAMORFISMO..... | 16 |
| 2.1.4. FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS | 16 |
| 2.1.5. FORMAÇÃO CAUÊ E A GERAÇÃO DE MINÉRIOS..... | 19 |
| 2.1.6. GEOLOGIA E O MINÉRIO DE FERRO DA MINA DE CAPANEMA | 21 |
| 2.1.7. TIPOLOGIA DE MINÉRIOS | 24 |
| 2.2. PETROFÍSICA | 26 |
| 2.2.1. TEOR DE UMIDADE..... | 27 |
| 2.2.2. PESO ESPECÍFICO | 27 |
| 2.2.3. POROSIDADE | 28 |
| 2.2.4. PERMEABILIDADE | 31 |
| 2.2.5. VELOCIDADE SÔNICA..... | 33 |
| 2.2.6. DURABILIDADE | 35 |
| 2.2.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO | 35 |
| 2.2.8. PROPRIEDADES ELÉTRICAS | 36 |
| 2.3. GEOFÍSICA E PERFILAGEM | 37 |
| 2.3.1. PERFIL DE CÁLIPER | 44 |
| 2.3.2. PERFILAGENS RADIOMÉTRICAS OU NUCLEARES..... | 45 |
| 2.3.3. PERFIL DE RAIOS GAMA – GAMA NATURAL | 50 |
| 2.3.4. PERFIL DE DENSIDADE (GAMA-GAMA) | 53 |
| 2.3.5. PERFIL DE NÊUTRONS OU PERFIL NEUTRÔNICO | 55 |
| 2.3.6. PERFIL ACÚSTICO OU SÔNICO | 58 |
| 2.3.7. PERFILAGEM DE TEMPERATURA | 60 |

| | |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 61 |
| 3.1. A PESQUISA DO MINÉRIO DE FERRO..... | 61 |
| 3.2. FASES DA PESQUISA GEOLÓGICA..... | 63 |
| 3.3. O CAMPO DE CALIBRAÇÃO GAMA-GAMA..... | 64 |
| 3.4. INSTRUMENTAÇÃO PARA PERFILAGEM GEOFÍSICA DE CAMPO | 67 |
| 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE DADOS..... | 71 |
| 4.1. ANÁLISE COMPARATIVA | 71 |
| 4.2. ANÁLISE DO FURO FD-29..... | 72 |
| 4.3. ANÁLISE DO FURO FD-31..... | 84 |
| 4.4. ANÁLISE DO FURO FD-28..... | 90 |
| 4.5. AVALIAÇÃO ECONÔMICA..... | 94 |
| 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS | 96 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 99 |
| 7. ANEXOS..... | 106 |
| 7.1. ANEXO 1 – Perfilagem geofísica do furo FD-29 | 106 |
| 7.2. ANEXO 2 – Perfilagem geofísica do furo FD-31 | 107 |
| 7.3. ANEXO 3 – Perfilagem geofísica do furo FD-28 | 108 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Produção mundial em milhões de toneladas (Mt) de minério de ferro ao longo do Século XX (Moon <i>et al.</i> , 2006)..... | 3 |
| Figura 2. Evolução da produção mundial e brasileira (em Mt) de minério de ferro no Século XXI (IBRAM, 2012)..... | 4 |
| Figura 3. Exportações brasileiras de minério de ferro (Mt) - IBRAM, 2012. | 5 |
| Figura 4. Utilização da perfilagem geofísica na interpretação litológica. Os polígonos em azul, levemente inclinados, representam os limites de duas diferentes camadas litológicas. O polígono em azul na vertical indica a direção da perfilagem geofísica. As estrelas preenchidas em vermelho indicam a ferramenta de perfilagem. As curvas nos gráficos à direita indicam, respectivamente, algumas propriedades físicas das rochas como: resistividade (em vermelho), densidade (preto) e porosidade (azul). (Carrasquilla, 2012). | 6 |
| Figura 5. Localização e via de acesso (em linha vermelha contínua) à Mina de Capanema, partindo-se de Belo Horizonte. | 8 |
| Figura 6. Localização da Mina de Capanema em relação aos limites do Quadrilátero Ferrífero (polígono com preenchimento em azul). Os polígonos preenchidos em cor preta representam a formação ferrífera segundo Dorr (1969). | 8 |
| Figura 7. Localização geográfica do Quadrilátero Ferrífero na porção central de MG, evidenciando o arcabouço geológico regional. As unidades de formação ferrífera são mostradas em preto e compõem as grandes serras que delimitam a estrutura – Serra do Curral a norte, Serras da Moeda e Itabirito a oeste, Serra de Ouro Preto a sul e Serra de Antônio Pereira e Itabira a leste. As outras simbologias mostram as demais unidades litológicas. (Spier <i>et al.</i> , 2007)..... | 10 |
| Figura 8. Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero de acordo com Alkmim e Marshak (1998), mostrando o empilhamento litológico e suas respectivas idades de deposição. | 12 |
| Figura 9. Articulação das <i>nappes</i> (megadobramentos) Curral (de primeira geração, em vermelho) e Ouro Preto (de segunda geração, em preto) (Endo <i>et al.</i> , 2012). | 15 |
| Figura 10. Classificação genética de minérios de ferro, incluindo a rocha fresca (Adaptado de Amorim e Alkmim, 2011)..... | 20 |
| Figura 11. Porosidade primária, formada durante a deposição e porosidade secundária, formada após a deposição por processos físicos e/ou químicos (Adaptado de Carrasquilla, 2012)..... | 30 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 12. Porosidade efetiva, através de poros conectados e porosidade não efetiva, com poros desconectados (Adaptado de Carrasquilla, 2012). | 30 |
| Figura 13. Variação da permeabilidade em diferentes padrões de porosidade, onde a interconectividade dos poros é quem controla o fluxo do sistema (Adaptado de Carrasquilla, 2012). | 32 |
| Figura 14. Modos de propagação de frentes de onda – compressional ou longitudinal (onda P, primária) à esquerda e de cisalhamento ou transversal (onda S, secundária) à direita (Thompson e Turk, 1997). | 33 |
| Figura 15. Uma frente de onda incidente sobre uma superfície origina uma onda refletida e outra refratada. A relação entre os ângulos de incidência (θ_i) e refração (θ_r) é governada pela Lei de Snell. | 34 |
| Figura 16. Ábaco para qualificar o grau de fissuramento numa rocha (Fourmaintraux, 1976). | 35 |
| Figura 17. Figura esquemática exemplificando a interpretação de contatos litológicos a partir da avaliação de múltiplos perfis. O painel superior à esquerda apresenta os exemplos das curvas de potencial espontâneo (SP) e de resistividade. O painel inferior à direita, apresenta as curvas de raios gama, resistividade e porosidade e suas características ao atravessarem diferentes litologias como folhelho e arenito. (Carrasquilla, 2012) | 40 |
| Figura 18. Relação entre espaçamento do conjunto transmissor / receptor e profundidade lateral da investigação. Quanto maior a distância do conjunto, maior a penetração lateral e menor a resolução do dado. (Carrasquilla, 2012) | 40 |
| Figura 19. Relação da resolução e profundidade lateral na investigação geofísica para diferentes métodos. (Carrasquilla, 2012). | 41 |
| Figura 20. Sonda Cáliper de três braços para medição do diâmetro do furo. | 44 |
| Figura 21. A medição pelo cáliper fornece uma boa contribuição na interpretação de contatos litológicos, realçando as diferenças de resistência mecânica entre litologias mais ou menos competentes, mostrando, por exemplo, um maior diâmetro nos folhelhos do que nos arenitos. (Carrasquilla, 2012) | 45 |
| Figura 22. Esquema do decaimento radioativo devido a emissões de partículas alfa (α), beta (β) e gama (γ). (Carrasquilla, 2012). | 46 |
| Figura 23. Curva padrão evidenciando os picos característicos de emissões de radiação gama para Potássio (1,46 MeV), Urânio (1,76 MeV) e Tório (2,62 MeV). Retirado de Minty (1997). | 48 |
| Figura 24. Valores médios de concentração de urânio, tório e potássio em algumas rochas ígneas (tabela superior) e sedimentares (tabela inferior). (Carrasquilla, 2012) | 49 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25. Princípio do funcionamento de uma ferramenta GR (Gamma-Ray – Raios Gama), onde a radioatividade natural passa por um cintilômetro capaz de emitir fótons detectados por um amplificador, produzindo pulsos elétricos que geram o perfil. (Carrasquilla, 2012). | 51 |
| Figura 26. Exemplo de uma perfilagem de Raios-Gama mostrando a resposta de curva frente a unidades argilosas e arenosas. A figura da esquerda apresenta o perfil de raios gama (gama natural) e a figura da direita o perfil litológico interpretado, composto basicamente de folhelho e arenito (Carrasquilla, 2012). | 52 |
| Figura 27. Perfil de densidade, evidenciando o acoplamento da ferramenta com as paredes do furo para melhor leitura e a localização da fonte e dos sensores de espaçamento curto e longo (Carrasquilla, 2012). | 54 |
| Figura 28. Estágios de energia do nêutron (Carrasquilla, 2012). | 56 |
| Figura 29. A presença da Chamosita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), um mineral de ferro hidratado, causa alterações no perfil de nêutrons (Adaptada de Rider, 2002)..... | 57 |
| Figura 30. Dois transmissores (T) e dois pares de receptores (R1 a R4) permitem medidas precisas independente da inclinação do furo e de variações no diâmetro; esse perfil é denominado de Perfil Compensado (Carrasquilla, 2012). | 59 |
| Figura 31. Perfil de temperatura, mostrando sua variação em função da profundidade. | 60 |
| Figura 32. Dados diretos: Sondagem rotopercussiva não testemunhada (esquerda) e sondagem convencional testemunhada (direita), onde o material atravessado é coletado pelo barrilete (Carrasquilla, 2012). | 62 |
| Figura 33. Campo de Aferição Gama-Gama construído pela Vale com certificação do IPT. | 64 |
| Figura 34. Posicionamento do bloco de base na torre, à esquerda e à direita, com detalhe do furo no centro do bloco por onde descera a ferramenta de perfilagem gama-gama. . | 65 |
| Figura 35. Disposição dos blocos por densidade <i>versus</i> contagem. | 66 |
| Figura 36. Aferição da ferramenta de perfilagem gama-gama, com a curva amarela indicando a contagem e curva verde o valor da densidade medido (Pereira, 2012)..... | 67 |
| Figura 37. Esquema de obtenção de dados do furo (Carrasquilla, 2012). O conjunto de perfilagem, com polias e guincho instalados num veículo apropriado, é sustentado por um cabo multinúcleo blindado, conectado a uma central computadorizada de captura e registro de dados. | 68 |
| Figura 38. Unidade de Perfilagem Geofísica – UPG – na Mina de Capanema (A). Detalhe da UPG com localização do guincho e roldanas (B). Início da descida do conjunto de ferramentas de perfilagem geofísica (C). Perfilagem do furo em andamento (D)..... | 69 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 39. Ferramentas de perfilagem. Sensor de gama natural e cáliper fechado (A). Detalhe do cáliper de três braços aberto (B). Sensor de densidade gama-gama em primeiro plano (C). Contador Geiger para monitoramento da radioatividade na frente de trabalho (D)..... | 70 |
| Figura 40. Imagem aérea da Mina de Capanema evidenciando a localização dos três furos de sonda estudados. | 72 |
| Figura 41. Seção geológica interpretada do furo FD-29..... | 73 |
| Figura 42. Testemunhos do furo FD-29 mostrando o contato entre o aterro (material amarronzado e mais argiloso na parte esquerda da foto) e itabirito (mais arenoso e de cor acinzentada, do centro para a direita da foto). | 74 |
| Figura 43. Testemunhos do furo FD-29 mostrando o material descrito como aterro, predominantemente argiloso até 6 m (canto superior esquerdo da foto e de coloração vermelho amarelada), com progressiva redução no percentual de argilas (na região central da foto e de coloração mais amarronzada) até o contato com o itabirito em 12 m (material acinzentado na porção direita da foto). | 75 |
| Figura 44. Detalhes nos perfis geofísicos do furo FD-29. Da esquerda para a direita tem-se a curva verde do perfil de gama natural, seguida pela curva verde de densidade, depois por duas curvas laranja do perfil de nêutrons, temperatura em azul e na extremidade direita o perfil de cáliper. Em (A) tem-se a queda brusca da argilosidade em 10m, coincidente com o padrão mais retilíneo da curva de densidade, refletindo o contato do aterro com o itabirito. Em (B) a região de pico da argilosidade coincidente com a ocorrência de desmoronamento das paredes do furo e maior diâmetro do cáliper (C). Em (D) o aumento da porosidade na curva de nêutrons coincide com um ponto de queda da densidade e aumento da concentração em argilas no aterro..... | 76 |
| Figura 45. Apresenta à esquerda os testemunhos de sondagem do furo FD-29 na profundidade entre 19m e 28,30m, mostrando um aumento da compacidade do minério itabirítico em torno de 26m, com os testemunhos se mostrando mais cilíndricos. A figura da direita mostra os perfis de gama natural à esquerda, seguido pelos perfis de densidade e nêutrons à direita. Percebe-se um aumento no patamar de densidade um pouco acima de 26m de profundidade e ainda a sua correlação na diminuição da porosidade evidenciada no perfil de nêutrons..... | 77 |
| Figura 46. Apresenta da esquerda para a direita um detalhe dos perfis gama natural e densidade (linhas verdes), nêutrons (linha laranja), sônico (linha marrom-avermelhada), temperatura (linha azul) e cáliper (linha verde). A partir da profundidade de 63m percebe-se um aumento na densidade média, redução da porosidade, com queda acentuada no perfil de nêutrons e o cáliper mostrando uma redução no diâmetro das paredes. Em 75m ocorre nova queda da porosidade e aumento da densidade média. O delta invertido no perfil de densidade, com pequena alteração do cáliper em torno de 85m foi interpretado como sendo o nível freático. O perfil sônico mostra um aumento | |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| da compacidade em direção ao fundo e sem leitura quando atinge 75m. Todo esse comportamento foi interpretado como sendo uma zona de transição dos itabiritos com diferentes graus de compacidade, friável até os 63m, semi-compacto até 75m e compacto até o final. | 79 |
| Figura 47. Gráfico com dispersão da curva granulométrica da faixa grossa (G1) em função da profundidade, evidenciando o aumento da compacidade da rocha em direção ao fim do furo. | 81 |
| Figura 48. Evolução da curva granulométrica da faixa grossa (G1) com a profundidade no furo FD-29, mostrando ser factível a subdivisão dos itabiritos em friáveis (IF), semi-compactos (IS) e compactos (IC) corroborando com a interpretação da perfilagem geofísica. | 82 |
| Figura 49. Detalhe dos perfis de densidade (linha verde à esquerda), nêutrons (linha do centro) e sônico (linha vermelha à direita), mostrando em (A): aumento da compacidade, diminuição da porosidade e aumento da densidade e em (B): aumento da compacidade, redução da porosidade e queda na densidade, onde a concentração de minerais ferrosos poderia estar prevalecendo. | 83 |
| Figura 50. Detalhe da perfilagem do furo FD-31. Da esquerda para a direita tem-se o perfil de gama natural, seguido pela linha verde da densidade, laranja do perfil de nêutrons e cáliper na extremidade direita, evidenciando a transição do aterro para a canga, com aumento das argilas, e variações significativas em todos os perfis. | 85 |
| Figura 51. Detalhe da perfilagem do furo FD-31, da esquerda para a direita, tem-se as curvas de gama natural, densidade, nêutrons, sônica, temperatura e cáliper. O contato da canga com o hematito goethítico em 20,60 m só ficou bem evidenciado no perfil de gama natural e uma leve diminuição das rugosidades nas paredes do furo. | 87 |
| Figura 52. Transição da canga, mais argilosa e avermelhada (à esquerda) para um hematititos goethítico, menos argiloso, mais arenoso, fino e amarelado (à direita), em torno de 20m de profundidade. | 88 |
| Figura 53. Detalhe da perfilagem mostrando a interpretação do topo do lençol freático e alterações nos perfis de nêutrons (curva laranja no centro), sônico (curva vermelha sobre fundo colorido) e de cáliper (curva verde na extremidade direita). | 89 |
| Figura 54. Detalhe do contato entre diferentes itabiritos, um mais silicoso e de coloração acinzentada e outro mais argiloso e de cor ocre. A descida da ferramenta foi obstruída exatamente no contato com o material mais argiloso e menos competente. | 89 |
| Figura 55. Seção com interpretação geológica do furo FD-31 | 90 |
| Figura 56. Seção geológica interpretada do furo FD-28. | 91 |
| Figura 57. Perfilagem geofísica mostrando o registro da intrusiva máfica no perfil de gama natural, curva verde preenchida na extremidade esquerda, na profundidade entre 27 e 33 m. | 92 |

Figura 58. Detalhe da perfilagem no furo FD-28. Da esquerda para a direita tem-se a curva do perfil de gama natural, seguida pela de densidade em verde e contínua, depois o perfil de temperatura em azul e na extremidade direita o perfil de cáliper. As duas setas mostram a alteração nos perfis de densidade e cáliper a partir de 51m, 93

Figura 59. Programação de sondagem hipotética, mostrando possibilidade de alteração da malha de sondagem, com substituição de alguns furos testemunhados por roto-percussivos e todos com perfilagem geofísica, gerando diminuição de tempo e custos na pesquisa..... 95

LISTA DE TABELAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Reservas mundiais de minério de ferro e produção anual (Bt) (IBRAM, 2012). | 4 |
| Tabela 2. Variação da porosidade de algumas rochas sedimentares em função da idade e profundidade (Carrasquilla, 2012)..... | 31 |
| Tabela 3. Aplicação de alguns métodos de perfilagem geofísica e sua relação com as propriedades das rochas (Carrasquilla, 2012)..... | 38 |
| Tabela 4. Densidade e composição de cada bloco do campo de calibragem. (IPT, 2011) | 65 |
| Tabela 5. Resultados químicos e de distribuição granulométrica do Furo FD-29, sendo “CA” o comprimento do intervalo amostrado. | 80 |
| Tabela 6. Resultados das análises físicas e químicas do furo FD31, para $G_1 > 6,3\text{mm}$; $1\text{mm} < G_2 < 6,3\text{mm}$; $0,15\text{mm} < G_3 < 1\text{mm}$ e $G_4 < 0,15\text{mm}$ | 84 |
| Tabela 7. Resultados das análises químicas do furo FD 28..... | 94 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Um trabalho de pesquisa mineral visa basicamente a identificação, quantificação e qualificação de depósitos anômalos de um dado bem mineral. Toda pesquisa envolve uma série de atividades, que vão desde o mapeamento geológico regional, com determinação das litologias e seus respectivos parâmetros texturais e estruturais, até a investigação de subsuperfície, que irá servir de base para a interpretação da geometria dos corpos num aspecto tridimensional.

A indústria da mineração de ferro vem atravessando uma fase de pleno desenvolvimento tecnológico e o mundo moderno exige agilidade na geração de informações precisas e confiáveis a um menor custo possível, de forma a gerar melhor sustentabilidade na tomada de importantes decisões empresárias.

Portanto, a avaliação de utilização de modernos métodos de perfilagem geofísica aliada aos métodos tradicionais de pesquisa, pode vir de encontro à demanda da indústria na geração de dados precisos num menor prazo e custos possíveis.

Uma investigação geológica é baseada em alguns pilares, como a capacidade do método adotado de fornecer as informações desejadas, o prazo disponível para a execução dos trabalhos de investigação, que pode ser um fator delimitador na escolha do método, o custo total das investigações e a relação custo x benefício de todo o processo.

Um dos métodos mais tradicionais para se investigar a geologia de subsuperfície é a perfuração de poços, de diferentes diâmetros, direções, inclinações e profundidades, mas todos com o mesmo propósito – obtenção de testemunhos da sondagem. Contudo, este é um método geralmente oneroso e lento, fornecendo informações detalhadas, porém localizadas.

Os levantamentos geofísicos, embora algumas vezes passíveis de grandes ambiguidades ou incertezas na interpretação, proporcionam um meio relativamente rápido e barato de se obter informações geológicas distribuídas em uma área maior. A utilização concomitante de vários sensores pode fornecer uma bateria de dados de diferentes

naturezas e propósitos, ampliando o espectro de informações para melhorias da interpretação de dados e conseqüentemente maior confiabilidade do modelo geológico a ser gerado.

Segundo Kearey *et al.* (2002), na exploração de recursos de subsuperfície, os métodos geofísicos são capazes de detectar e delinear características locais de interesse potencial que não poderiam ser descobertos por nenhum programa de perfuração realista. Contudo, o levantamento geofísico não dispensa a necessidade de perfurações testemunhadas, mas quando corretamente aplicado, pode maximizar e aperfeiçoar os programas de exploração.

De acordo com Girão Nery (2004), a perfilagem geofísica apresenta uma série de vantagens quando comparada aos métodos tradicionais, podendo ser utilizada para correção dos dados da perfuração; no registro de várias propriedades da rocha numa única subida das ferramentas de perfilagem, com utilização de diferentes sensores; realiza amostragens em grande detalhe; apresenta um custo reduzido quando comparada com a testemunhagem; requer um tempo de execução e processamento de dados bastante reduzido e permite a utilização de modernos *softwares* para interpretação. Além disso, apresenta um registro contínuo e sem limite de profundidade, define contatos geológicos, é reproduzível e serve de base para correlações entre perfis.

Na indústria do petróleo a perfilagem geofísica vem sendo utilizada em larga escala, pois fornece importantes propriedades *in situ* de rochas-reservatório e atualmente a amostragem direta só é realizada de forma pontual para eventuais confirmações litológicas.

Diferentes técnicas de perfilagem têm sido aplicadas no uso na modelagem geológica (Sacco *et al.*, 2007), na inferência de qualidade tecnológica na indústria do carvão (Oliveira *et al.*, 2008b), na determinação do teor de chumbo e zinco (Asfahani, 2002), bem como na pesquisa de ouro (Pflug *et al.*, 1997).

1.2. RELEVÂNCIA DO TEMA – A INDÚSTRIA DO MINÉRIO DE FERRO

Os metais e principalmente o minério de ferro, sempre estiveram no foco das atenções por várias razões, que vão desde o atendimento a demandas de infraestrutura das cidades e evolução dos meios de transporte, até pelo seu valor econômico e importância estratégica. Sua utilização é milenar, originando-se na *Idade do Ferro* e acompanhando toda a civilização e sua evolução ao longo dos séculos. Particularmente, após a *Revolução Industrial* em meados do século XVIII, intensificou-se a demanda pelo metal, culminando nas décadas após as grandes guerras mundiais do século passado e mais recentemente, com o desenvolvimento das grandes cidades e o êxodo das populações rurais para os centros urbanos, principalmente na China. As Figuras 1 e 2 ilustram a produção mundial e brasileira ao longo dos séculos XX e XXI.



Figura 1. Produção mundial em milhões de toneladas (Mt) de minério de ferro ao longo do Século XX (Moon *et al.*, 2006).

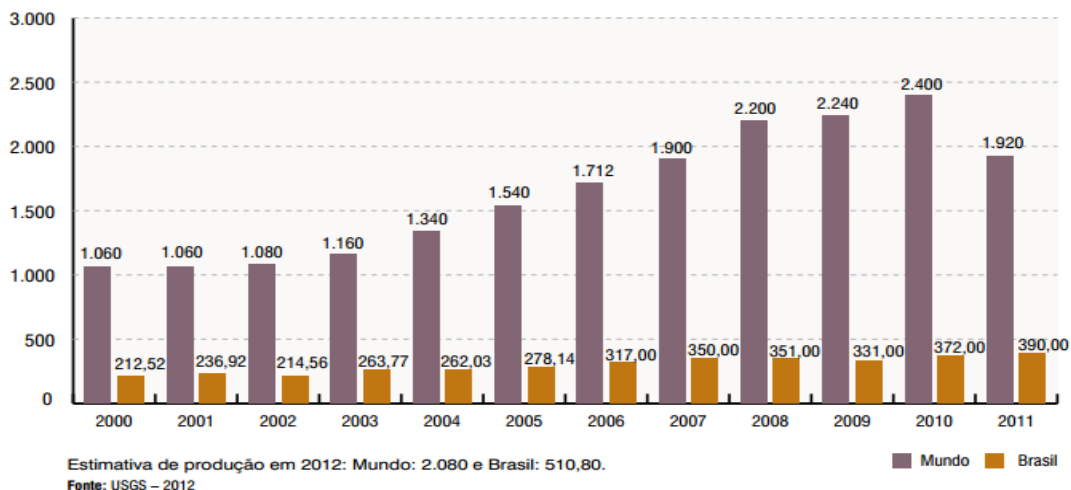


Figura 2. Evolução da produção mundial e brasileira (em Mt) de minério de ferro no Século XXI (IBRAM, 2012).

As reservas mundiais de minério de ferro são da ordem de 170 Bt (Tabela 1) e as reservas brasileiras, segundo o DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral (IBRAM, 2012) – totalizam 29,6Bt, com teor médio de 52,95% de ferro, estando localizadas basicamente nos seguintes estados:

- MG – 79,7% das reservas e teor médio de 51,4% de ferro
- PA – 9,1% das reservas e teor médio de 67% de ferro
- MS – 9,9% com teor médio de 55%

Tabela 1. Reservas mundiais de minério de ferro e produção anual (Bt) (IBRAM, 2012).

| Discriminação | Reservas (10 ⁶ t) | Produção (10 ³ t) | | |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|------------|
| | | 2010 ^(e) | 2011 ^(e) | (%) |
| Países | 2011 ^(e) | | | |
| Brasil ⁽¹⁾ | 29.604 | 372.120 | 398.131 | 14,2 |
| China | 23.000 | 1.070.000 | 1.200.000 | 42,9 |
| Austrália | 35.000 | 433.000 | 480.000 | 17,1 |
| Índia | 7.000 | 230.000 | 240.000 | 8,6 |
| Rússia | 25.000 | 101.000 | 100.000 | 3,6 |
| Ucrânia | 6.000 | 78.000 | 80.000 | 2,9 |
| Outros países | 44.396 | 305.880 | 301.869 | 10,8 |
| TOTAL | 170.000 | 2.590.000 | 2.800.000 | 100 |

Fonte: DNPM/DIPLAM; USGS – Mineral Commodity Summaries - 2012.

(1) Reserva lavrável; (e) dados estimados, exceto Brasil.

Com relação à produção o Brasil é o segundo maior produtor mundial, sendo a Austrália o maior produtor e a China em terceiro. De acordo com os dados apresentados na Tabela 1, a China seria o maior produtor mundial, contudo o teor médio do minério explotado é muito baixo e quando isso é levado em conta, os valores reais de sua produção caem para aproximadamente 380 Mt, colocando-a logo abaixo do Brasil. (IBRAM, 2012). As maiores empresas produtoras no Brasil são: Vale com 84,5%, CSN com 5,5%, Samarco com 6,3%, MMX com 2,0% e Usiminas com 1,7% (IBRAM, 2012).

A partir do início do século XXI, a China tem sido o grande consumidor mundial, colocando-se como a “mola mestra” de um sistema complexo de pesquisa, produção e transporte transoceânico. Os altos investimentos na construção de moradias, urbanização e infraestrutura indicam que a demanda chinesa por minério de ferro é crescente, mantendo o país como o principal destino das exportações brasileiras e australianas, que hoje dominam cerca de 70% do mercado mundial. Brasil e Austrália são produtores enraizados no mercado, devido ao alto teor de ferro da produção, qualidade e volume das reservas e uma logística de transporte eficiente.

Segundo dados do IBRAM (2012), a receita bruta brasileira em 2011 com a exportação de minério de ferro, atingiu a cifra de US\$ 41,8 bilhões, representando uma importante fonte de dividendos para o País. As exportações brasileiras apresentam uma curva crescente, como pode ser visto na Figura 3.

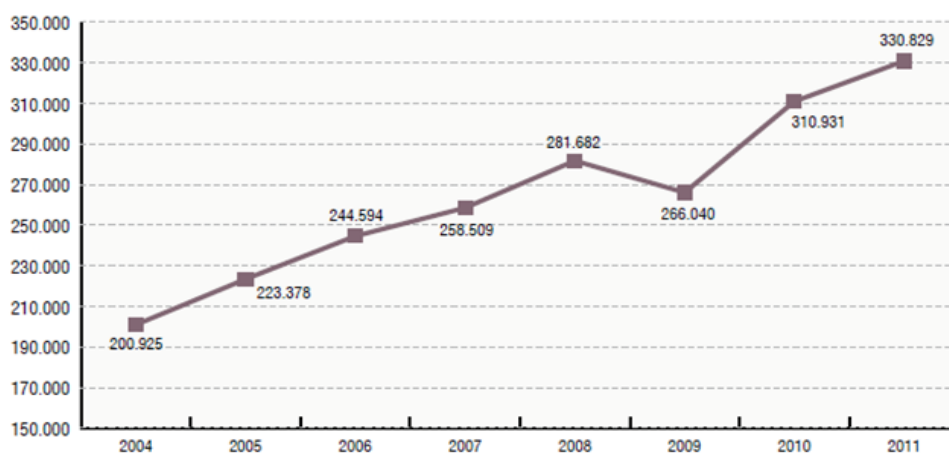


Figura 3. Exportações brasileiras de minério de ferro (Mt) - IBRAM, 2012.

1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA E DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A proposta central do trabalho é aperfeiçoar a pesquisa do minério de ferro, avaliando a possibilidade de se alinhar dados diretos da sondagem testemunhada, com dados indiretos da perfilagem geofísica, objetivando redução de custos, processos e tempo no desenvolvimento da pesquisa. Pretende-se, dessa forma, avaliar a aplicabilidade de alguns métodos de perfilagem geofísica na definição de importantes contatos litológicos dentro de um horizonte mineralizado (Figura 4).

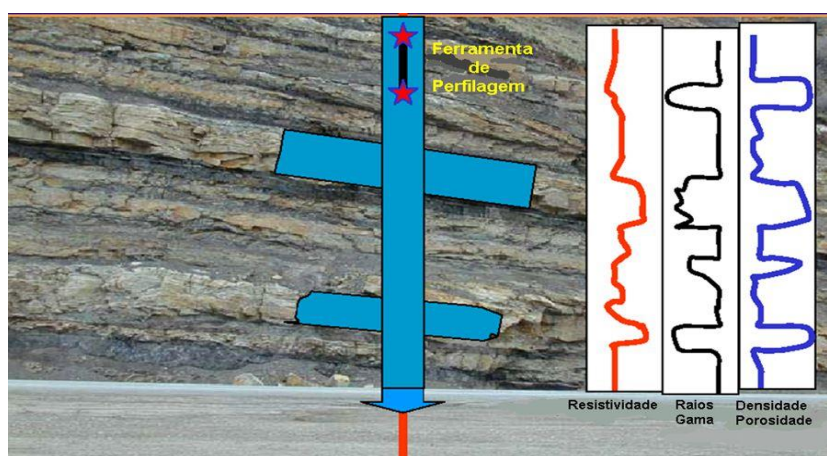


Figura 4. Utilização da perfilagem geofísica na interpretação litológica. Os polígonos em azul, levemente inclinados, representam os limites de duas diferentes camadas litológicas. O polígono em azul na vertical indica a direção da perfilagem geofísica. As estrelas preenchidas em vermelho indicam a ferramenta de perfilagem. As curvas nos gráficos à direita indicam, respectivamente, algumas propriedades físicas das rochas como: resistividade (em vermelho), densidade (preto) e porosidade (azul). (Carrasquilla, 2012).

Assim, espera-se a utilização de técnicas de perfilagem geofísica contribuindo na determinação de importantes contatos litológicos no horizonte mineralizado em ferro, como a transição do horizonte hidratado superficial e sua camada de base, friável e não hidratada, refletindo a profundidade do manto de intemperismo. A passagem de materiais friáveis para outros, mais compactos e eventual detecção de horizontes mais ricos em ferro, bem como a eventual presença de horizontes argilosos.

A partir daí, pretende-se avaliar a viabilidade de alterações nas técnicas atuais da pesquisa exploratória, abrindo a malha de sondagem convencional com redução do número de furos testemunhados e, conseqüente substituição por furos de caráter destrutivo – rotopercussivos – tendo a perfilagem geofísica como ferramenta auxiliar utilizada na correlação entre furos e no auxílio para a definição dos contatos litológicos.

Assim, espera-se avaliar a aplicabilidade da perfilagem geofísica aliada à sondagem tradicional na pesquisa exploratória, modernizando a técnica atual com redução de tempo e custos e sem perda de eficiência.

Toda essa análise terá como base a execução de perfilagens geofísicas em furos de sonda testemunhados e previamente escolhidos, de forma a se criar a possibilidade de aferição do processo, analisando as respostas das perfilagens frente à evidência do testemunho.

A Mina de Capanema, de propriedade da Vale S.A., foi escolhida para esse trabalho por apresentar certas características que permitem um estudo sistemático e controlado, tais como: localização, situação geológica e estar atualmente com suas operações paralisadas e com uma campanha de sondagem em curso. A Mina situa-se na região central do Quadrilátero Ferrífero e o acesso, a partir de Belo Horizonte, se dá pela BR-040 até o trevo para Ouro Preto e a partir desse ponto toma-se a rodovia BR-356 passando pela cidade de Itabirito até o trevo de acesso à Capanema à esquerda da via. Daí, até os escritórios da Mina, o acesso com 18 km se dá por estrada asfaltada, perfazendo um total de 80 km (Figuras 5 e 6).

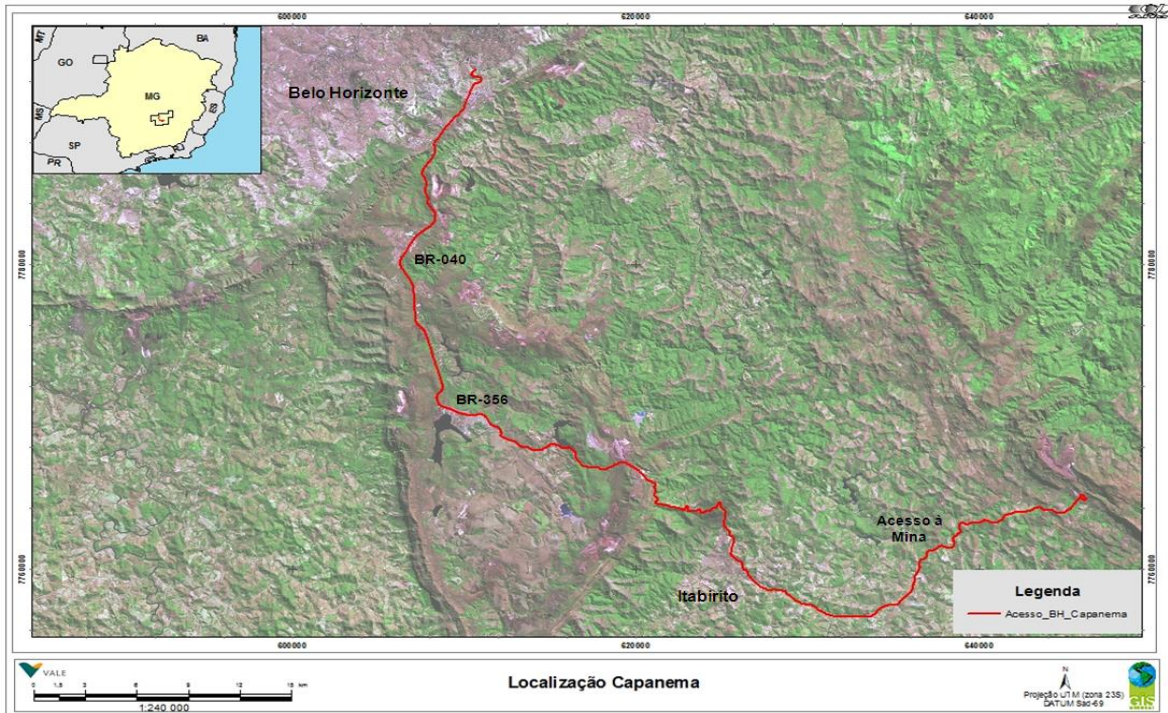


Figura 5. Localização e via de acesso (em linha vermelha contínua) à Mina de Capanema, partindo-se de Belo Horizonte.

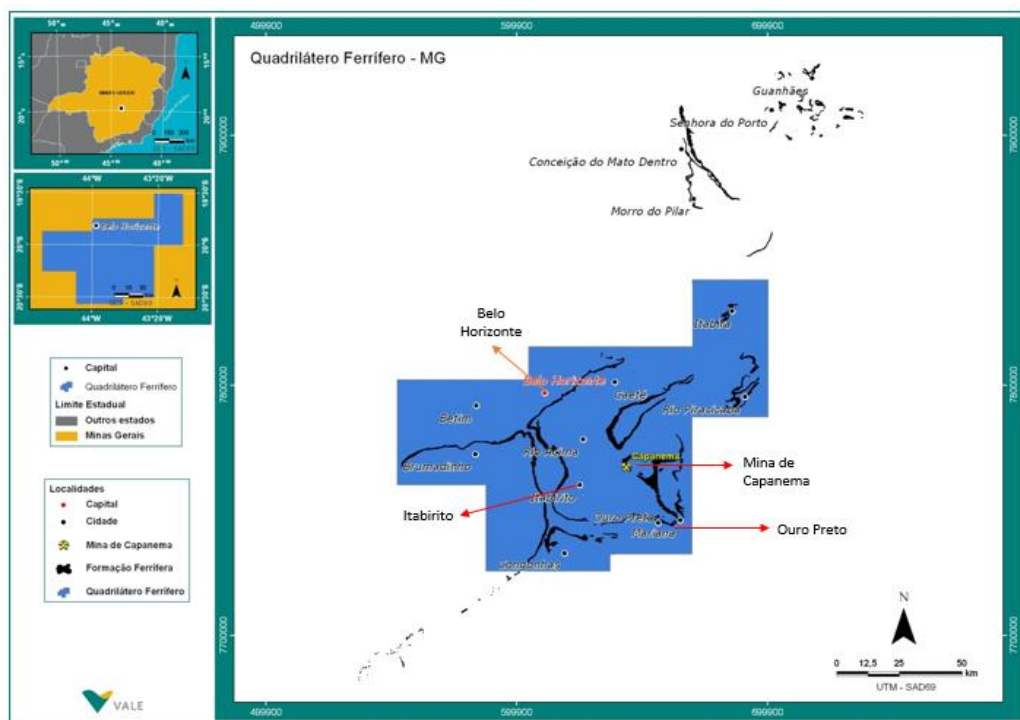


Figura 6. Localização da Mina de Capanema em relação aos limites do Quadrilátero Ferrífero (polígono com preenchimento em azul). Os polígonos preenchidos em cor preta representam a formação ferrífera segundo Dorr (1969).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa seção apresenta uma revisão de alguns aspectos geológicos da área de estudo – o Quadrilátero Ferrífero – fazendo uma conexão com propriedades das rochas – Petrofísica – e destes, com a ferramenta de trabalho – a perfilagem de furos de sonda.

2.1. O QUADRILÁTERO FERRÍFERO (QF) E A MINERALIZAÇÃO DE FERRO

O denominado QF situa-se na região central do Estado de Minas Gerais (Figura 7) e é considerado uma das mais importantes províncias minerais do mundo por representar-se como uma área clássica da geologia do Pré-Cambriano. Seu potencial mineral é conhecido desde o início do Século XVIII, devido à grande produção de ouro e mais tarde com a descoberta do manganês e do ferro. Os primeiros estudos geológicos ocorreram com o Barão de Eschwege que em 1833 definiu o primeiro empilhamento estratigráfico da região de Ouro Preto.

Em 1946 foi iniciado pelo USGS (*United States Geological Survey*) o mapeamento sistemático na escala de 1:25.000 de todo o QF, cuja síntese foi apresentada por Dorr em 1969. Desde então, diversos trabalhos foram realizados por vários autores a respeito da estratigrafia e principalmente, sobre a sua evolução estrutural, o que torna muitos de seus aspectos geológicos em constante transformação (Chemale *et al.*, 1994, Alkmim e Marshak, 1998 e Endo *et al.*, 2012).

2.1.1. ESTRATIGRAFIA

Sobre o embasamento, constituído por gnaisses migmatíticos, ocorre o Supergrupo Rio das Velhas (SGRV), uma sequência vulcano-sedimentar arqueana, de idade 2,7 Ga obtida pelo método U-Pb em amostras de zircão (Vaz de Melo e Seabra, 2000).

O SGRV é composto, da base para o topo, pelos grupos Nova Lima e Maquiné (Dorr, 1969). O Grupo Nova Lima é constituído basicamente por filitos, xistos, metagrauvas, rochas máficas e ultramáficas, com formações ferríferas localizadas e de pequena expressão, metacherts e dolomitos. O Grupo Maquiné é composto por quartzitos e filitos. De maneira geral, as rochas destas unidades foram expostas a um metamorfismo

de baixo grau. Fácies metamórfica mais elevada tem sido registrada nas auréolas metamórficas dos complexos metamórficos Bação e Belo Horizonte (Endo *et al.*, 2012).

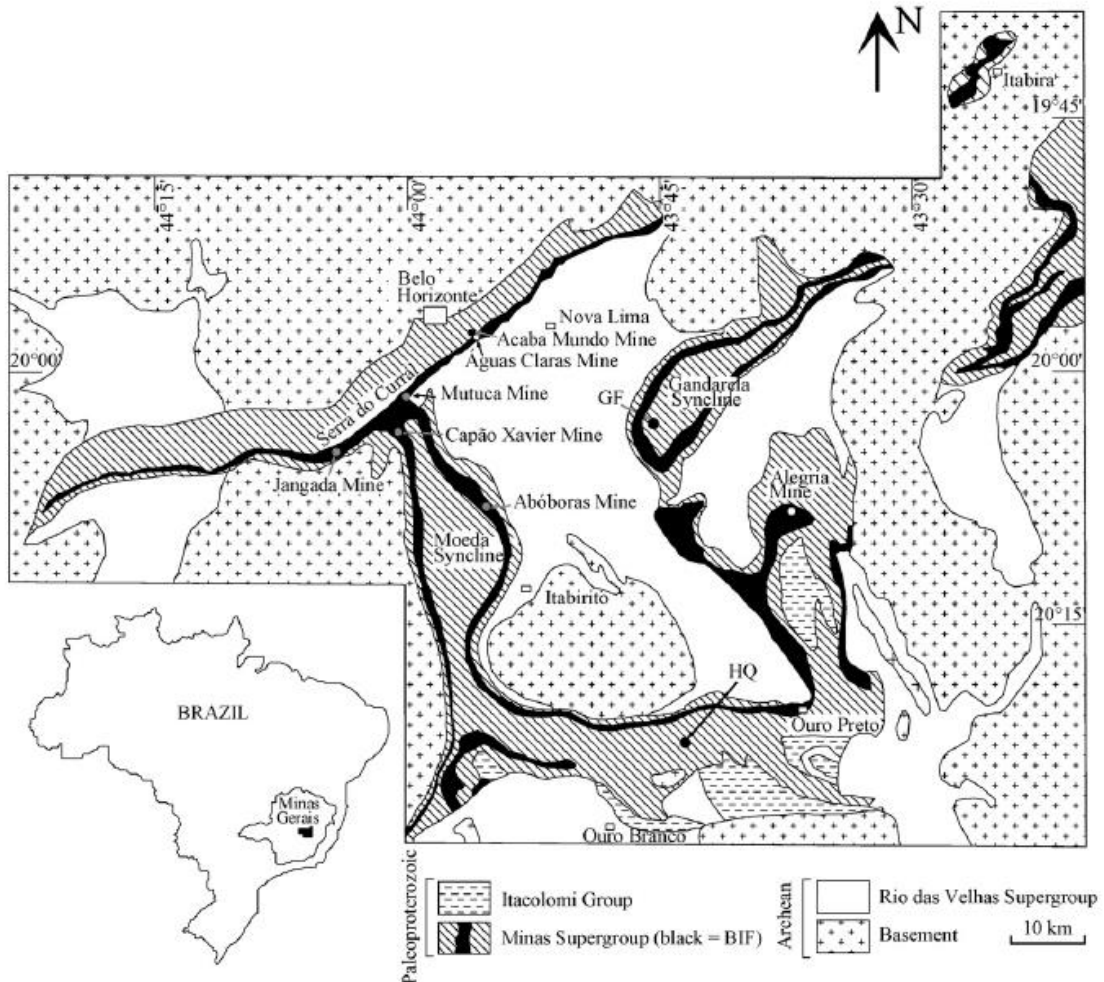


Figura 7. Localização geográfica do Quadrilátero Ferrífero na porção central de MG, evidenciando o arcabouço geológico regional. As unidades de formação ferrífera são mostradas em preto e compõem as grandes serras que delimitam a estrutura – Serra do Curral a norte, Serras da Moeda e Itabirito a oeste, Serra de Ouro Preto a sul e Serra de Antônio Pereira e Itabira a leste. As outras simbologias mostram as demais unidades litológicas. (Spier *et al.*, 2007)

Sobreposto ao SGRV ocorre o Supergrupo Minas (SGM), uma sequência metassedimentar de idade paleoproterozóica, cuja organização estratigráfica permanece a mesma desde a definição original de Derby (1906), sendo constituído por xistos, quartzitos, dolomitos e formação ferrífera, assentada discordantemente sobre gnaisses e mica-xistos (Endo *et al.*, 2012). Harder e Chamberlin (1915) subdividiram o SGM em

cinco unidades, da base para o topo: quartzito caraça, xisto batatal, formação ferrífera, xisto e quartzito piracicaba e quartzito itacolomi. Guimarães (1951) separa o quartzito itacolomi das demais unidades por uma discordância, denominando-as de Série Minas.

A partir de então, esta litoestratigrafia básica sofreu aprimoramentos sucessivos (Endo *et al.*, 2012), culminando com a coluna estratigráfica adaptada de Dorr (1969) e apresentada por Alkmim e Marshak em 1998 (Figura 8). Com a incorporação dos resultados alcançados pelos estudos de Renger *et al.* (1994), Almeida *et al.* (2002 e 2005) resulta em grandes agrupamentos que totalizam mais de 4.000 m de espessura de sedimentos para o Supergrupo Minas. Da base para o topo da sequência tem-se a seguinte configuração:

A base da unidade é ocupada pelo Grupo Tamanduá cuja seção tipo ocorre na Serra do Tamanduá, 5 km a norte de Barão de Cocais. A unidade inferior é constituída por quartzitos com camadas de conglomerados com seixos de formação ferrífera, sendo sucedida por xistos e filitos com níveis ferruginosos.

O Grupo Caraça repousa discordantemente sobre as unidades vulcano-sedimentares do Supergrupo Rio das Velhas. Este grupo é constituído de duas formações: a Formação Moeda, inferior, e a Formação Batatal, superior. A Formação Moeda é constituída por metaconglomerados, filitos e quartzitos com conteúdos variáveis de sericita e moscovita. A Formação Batatal é constituída, principalmente, de filito sericítico e, subordinadamente, por metachert, formação ferrífera e filito grafitoso.

O Grupo Itabira, sobrepõe-se ao Grupo Caraça, compreendendo-se de duas formações: a Formação Cauê, inferior, e a Formação Gandarela, superior. O contato da Formação Cauê com a Formação Batatal é gradacional por alguns centímetros a metros. Compreende rochas como itabirito (usualmente com laminação de quartzo e hematita, às vezes de magnetita, dolomita e anfibólio), itabirito dolomítico, itabirito anfibolítico e pequenas lentes de xistos, filitos e margas. Sucede gradacionalmente a Formação Gandarela que consiste, essencialmente, de margas, filito dolomítico, dolomitos puros a ferruginosos e filito.

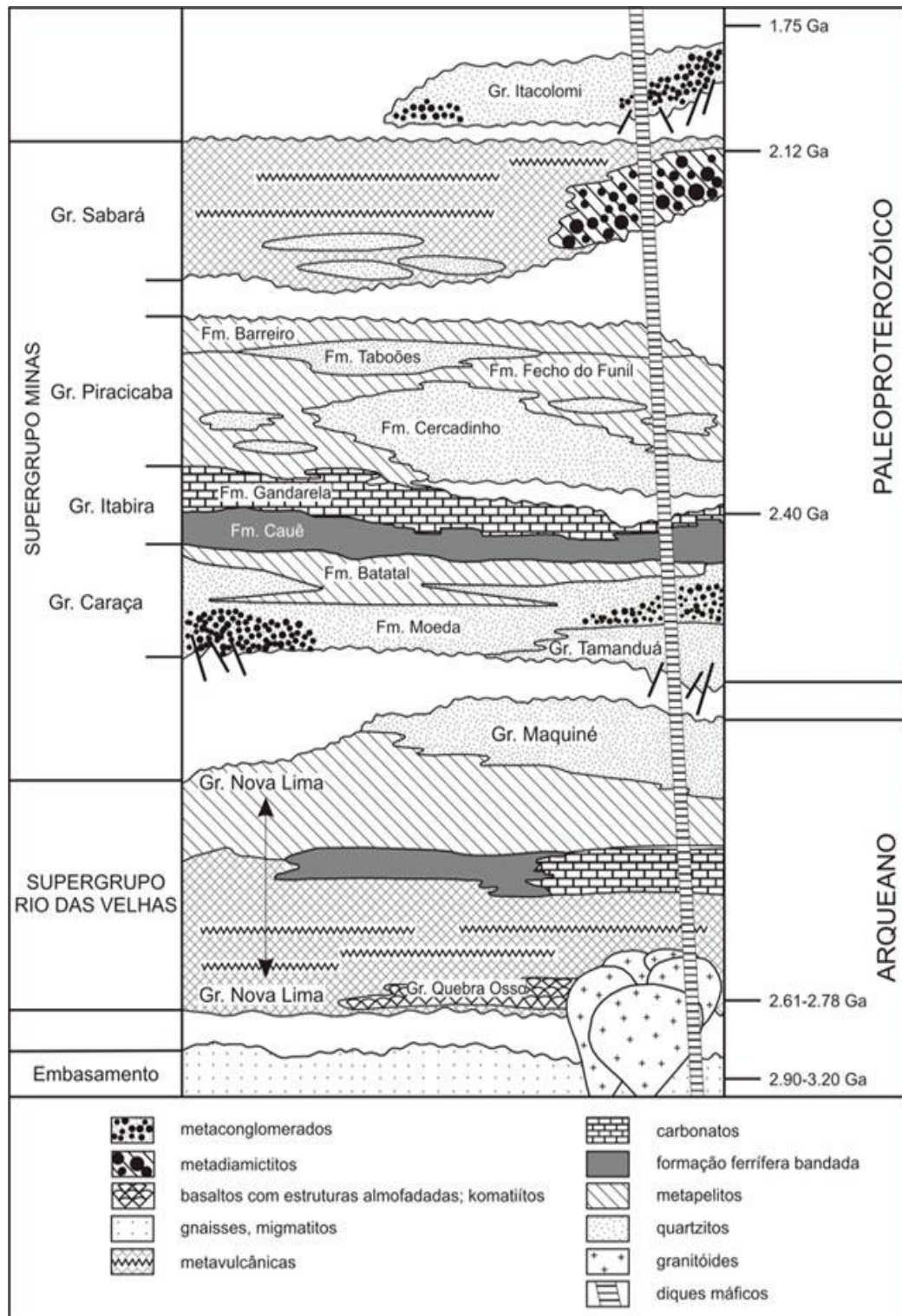


Figura 8. Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero de acordo com Alkmim e Marshak (1998), mostrando o empilhamento litológico e suas respectivas idades de deposição.

O Grupo Piracicaba é constituído pelas seguintes formações: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A Formação Cercadinho é composta de quartzitos, quartzitos e filitos ferruginosos, filitos prateados, filitos dolomíticos e dolomitos. A Formação Fecho do Funil é constituída por filitos dolomíticos, filitos e dolomitos impuros. A Formação Taboões consiste, essencialmente, de ortoquartzitos finos e equigranulares. A Formação Barreiro é composta, predominantemente, de filitos e filitos grafitosos.

O Grupo Sabará repousa diretamente sobre as diferentes formações do Grupo Piracicaba. O contato inferior é, em geral, estruturalmente concordante, sendo observados, localmente, contatos abruptos e transicionais. Estima-se que a espessura máxima aparente desta unidade, na seção-tipo, ultrapasse 3.000 m (Endo *et al.*, 2012). Composicionalmente é constituído de xistos, metagrauvascas, quartzitos, quartzitos feldspáticos, formações ferríferas, itabiritos e metaconglomerados com matações e seixos de dolomito.

O Grupo Itacolomi definido por Dorr (1969) é constituído de duas fácies: uma fácies quartzítica, denominada de tipo Itacolomi, e a outra filítica, designada de Santo Antônio. A fácies quartzítica é constituída predominantemente de quartzitos, quartzitos conglomeráticos, quartzitos ferruginosos de aspecto semelhante ao itabirito e filito. Os seixos são de quartzo, hematita, itabirito, quartzito, filito e granito. A hematita e martita são constituintes intersticiais frequentemente encontrados na matriz. É comum a ocorrência de camada rica em ferro na porção basal da sequência. Estima-se que a unidade ultrapasse 2.000 m de espessura. Na localidade-tipo, o Grupo Itacolomi repousa em discordância angular sobre as unidades Sabará, Barreiro e Fecho do Funil (Endo *et al.*, 2012).

Coberturas recentes constituem as bacias interiores denominadas *Gandarela* e *Fonseca*. Outras coberturas, ainda não completamente explicadas, foram recentemente identificadas nas Minas de Fábrica Nova e Capão Xavier, ambas minas da Vale, sendo que em Fábrica Nova alcança até 100 m de profundidade, atravessada por furos de sondagem (Vaz de Melo e Seabra, 2000). Coberturas de cangas são comuns recobrimdo as formações ferríferas e suas encaixantes.

2.1.2. ARCABOUÇO ESTRUTURAL

A geologia estrutural do QF é bastante complexa, com duas características marcantes: a primeira se refere às orientações exibidas pelas sequências estratificadas, que se apresentam dispostas em sinformes e antiformes e a segunda à superimposição de dobramentos e falhamentos que se cruzam em diversos sentidos e ângulos de forma a formar megaestruturas em praticamente todos os rumos (Endo *et al.*, 2012).

O arcabouço estrutural do QF é constituído, em sua essência, por dobras de várias gerações associadas às diferentes fases e eventos tectônicos que atuaram na região (Dorr 1969, Endo 1997, Almeida *et al.*, 2002, Almeida, 2004 e Almeida *et al.*, 2005).

Vários autores apresentam diversas visões sobre a evolução estrutural do Quadrilátero. Estas visões, muitas vezes conflitantes, podem ser encontradas em diversos trabalhos publicados.

Marshak *et al.* (1992) propuseram um modelo evolutivo para a parte sul do Cráton do São Francisco, compreendendo quatro principais eventos deformativos. O primeiro evento, de natureza compressional, gera uma cadeia dobrada, com falhas de empurrão/zonas de cisalhamento associadas, com vergência para noroeste. O segundo evento, também de natureza compressiva de direção norte-sul, gerou falhas reversas de alto ângulo e dobras abertas, sendo acompanhada pela ascensão de corpos do embasamento. O terceiro evento, de natureza extensional, é marcado pela geração de falhas normais e intrusões de diques máficos. O último evento, também de natureza compressional, apresenta estruturas vergentes para oeste.

Segundo Endo *et al.* (2012) as dobras, de escala regional, reconhecidas e hierarquizadas são de três gerações:

- Da Geração 1 com vergência para N-NE – *Nappe* Curral e dobras de segunda ordem associadas, é uma megadobra alóctone vergente para norte que domina o cenário estrutural do Quadrilátero. A Sequência Minas que se dispõem na Serra do Curral, em posição estratigráfica invertida, representa o flanco inverso dessa *nappe*. O seu núcleo é ocupado pelas unidades do Supergrupo Rio das Velhas. A zona da charneira compreende a região da junção Serra do Curral com o

Sinclinal Moeda. O flanco normal da *nappe*, que se encontra redobrado formando o Sinclinal Moeda, se estende continuamente até as proximidades da mina de Fábrica, e a partir daí, o segmento do flanco leste do sinclinal irá infletir para leste formando a anticlinal de Mariana e o flanco oeste irá infletir para sudoeste o qual se estende até as imediações de Lavras (Endo *et al.*, 2012). (Figura 9)

- Da Geração 2 com vergência para S-SW – *Nappe* Ouro Preto e dobras de segunda ordem associadas, está representada pelo seu flanco inverso no interior dos sinclinais Moeda e Dom Bosco (Figura 9). A sucessão estratigráfica invertida desta *nappe* engloba as unidades dos grupos Itabira, Piracicaba e Sabará. Feições subsidiárias desta fase estão presentes nos demais domínios do Quadrilátero em todas as escalas, em geral representadas por dobras isoclinais sem raiz. A vergência deste dobramento é para SSW (Endo *et al.*, 2012). As principais dobras de segunda ordem são: sinclinais Gandarela, Ouro Fino (Mina de Capanema), Dom Bosco e Santa Rita, Itabira-Monlevade, Vargem do Lima, arqueamento Rio das Velhas, anticlinais de Mariana e Santo Antônio.
- Da Geração 3: ampliações e redobramentos.

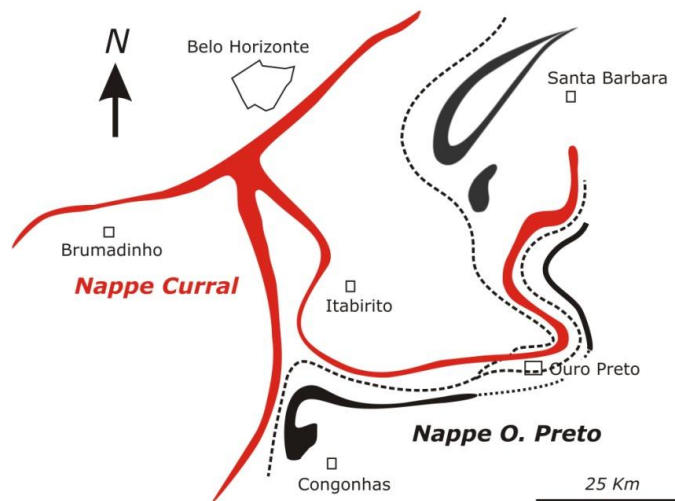


Figura 9. Articulação das *nappes* (megadobramentos) Curral (de primeira geração, em vermelho) e Ouro Preto (de segunda geração, em preto) (Endo *et al.*, 2012).

2.1.3. GEOCRONOLOGIA E METAMORFISMO

De acordo com diversos estudos geocronológicos realizados, acredita-se que a evolução geológica do QF, tenha ocorrido em três grandes eventos tectônicos (Zavaglia, 1995):

- 2,78 Ga - Este primeiro evento tectono-termal representa o término da evolução geológica do Arqueano Superior que coincide com a atuação do Evento Rio das Velhas. Neste evento, ocorreu um retrabalhamento crustal (deformação e metamorfismo) e magmatismo.
- 2,1 a 2,0 Ga - Este segundo evento é denominado de Transamazônico, o qual atuou sobre os sedimentos do Supergrupo Minas.
- 0,6 a 0,5 Ga - Este último evento tectono-termal corresponde ao Evento Brasileiro, onde foi gerado um cinturão de empurrão e dobramentos com vergência de E para W. Por outro lado, não foi capaz de promover um retrabalhamento generalizado em todas as unidades geológicas do Quadrilátero (Zavaglia, 1995).

As transformações metamórficas sofridas pelas rochas do QF, do mesmo modo que a evolução estrutural, são bastante complexas. A principal fase de deformação e metamorfismo que afeta as sequências supracrustais parece corresponder, portanto, ao denominado *Diastrofismo Minas*, com idades de 2.0 Ga, atingindo a fácies anfíbolito inferior (Endo *et al.*, 2012) e possivelmente, sua ação térmica tenha perdurado mesmo quando cessada a deformação principal. O último evento reflete um recondicionamento termal de idade Brasileira.

Embora o Supergrupo Minas esteja separado do Supergrupo Rio das Velhas por discordância estrutural e estratigráfica, o grau metamórfico que afetou o Supergrupo Minas não difere da unidade sotoposta sendo caracterizado por metamorfismo da fácies xisto-verde atingindo a fácies anfíbolito nas porções leste, sudeste e nordeste do Quadrilátero (Endo *et al.*, 2012).

2.1.4. FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS

O ferro é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre e é encontrado em várias regiões do mundo, principalmente na forma de óxidos e hidróxidos. Dentre as

rochas ferríferas, as Formações Ferríferas Bandadas (FFB) ou do original em inglês *Banded Iron Formation (BIF)*, apresentam grande interesse econômico em função das elevadas concentrações em ferro e da massa bastante expressiva, da ordem de grandeza de bilhões de toneladas (Bt). As *BIF's* pré-cambrianas são unidades estratigráficas de centenas de metros de espessura, distribuindo-se em várias regiões do mundo. O termo FFB foi definido por James (1954) como sendo rochas de origem sedimentar química, finamente laminada ou bandada, contendo pelo menos 15% de ferro e, comumente, mas não necessariamente, camadas de *chert*.

As FFB's expostas na crosta terrestre representam o produto de uma sequência de processos que envolveram sedimentação, diagênese, deformação e metamorfismo. Cada um desses estágios imprime nas rochas uma composição mineralógica e uma textura. Os minerais mais comuns encontrados são a hematita, magnetita, goethita (limonita) como os minerais-minério formadores dos depósitos de ferro. A ganga é composta predominantemente por quartzo e, secundariamente, por silicatos e carbonatos de ferro, argilo-minerais, apatita e óxidos de manganês. Em determinados depósitos encontram-se ainda minerais de cobre, titânio, fósforo, vanádio e outros.

Em todo o mundo não há uma classificação única e internacional para os minérios de ferro e para as FFB. As denominações *Jaspilitos* e *Itabiritos* são amplamente difundidos na literatura brasileira.

- O termo *Itabirito* foi inicialmente utilizado por Eschwege (Dorr, 1969), sendo definido como sendo uma FFB *fácies* óxido, metamorfsada, onde as bandas originais de *chert* ou jaspe foram recristalizadas em grãos megascópicos de quartzo e o ferro está presente em finas camadas de hematita e/ou magnetita (Amorim e Alkmim, 2011).
- O *Jaspilito* seria a variedade de FFB primária, não metamorfsada, com a banda de sílica sendo formada por jaspe criptocristalino.

James (1954) propôs uma separação em quatro *fácies* distintas de acordo com o mineral dominante, assim denominadas: óxido, silicato, carbonato e sulfeto. Estas *fácies* estariam relacionadas a variações laterais de uma deposição simultânea em uma bacia sedimentar.

- A *fácies* óxido é o mais comum, foi subdividida em *subfácies* hematítica e *subfácies* magnetítica. A primeira, formada por grandes intercalações de corpos irregulares de hematita (Fe_2O_3) e na segunda – *subfácies* magnetita (Fe_3O_4) – as rochas que a compõem são finamente laminadas com espessura milimétrica a centimétrica, apresentando intercalações de silicatos de ferro e carbonatos de ferro, principalmente a siderita (FeCO_3).
- Na *fácies* silicato, os constituintes minerais, as relações paragenéticas, as estruturas e texturas são muito diversificadas.
- A *fácies* carbonato é constituída basicamente por camadas de siderita e *chert* (quartzo criptocristalino).
- A *fácies* sulfeto é formada por folhelhos carbonosos acamadados que podem ocorrer como uma única banda na formação ou como pequenos componentes das FFB's; esta *fácies* não somente é a menos abundante, mas também a mais difícil de ser reconhecida.

Quanto à distribuição espacial, as FFB's estão confinadas em áreas de plataformas pré-cambrianas, sendo que nos *crátons* do hemisfério norte e sul apresentam depósitos de importância econômica. Não há, em todo o mundo, uma grande área cratônica que não apresente ocorrências de FFB, sendo representadas, na maioria das vezes, pela *fácies* óxido.

Segundo Zavaglia (1995), apesar das FFB's ocorrerem genericamente no Pré-Cambriano, houve períodos mais favoráveis para sua deposição, sendo, portanto, mais abundantes e podendo ter uma relação direta com a oxigenação da atmosfera do planeta. Esta distribuição temporal pode ser agrupada em três períodos principais:

- Arqueano médio: 3.500 – 3.000 Ma.
- Proterozóico Inferior: 2.500 – 1.900 Ma.
- Proterozóico Superior / Fanerozóico: 750 – 450 Ma.

A grande ocorrência das FFB's, no entanto, está associada ao Proterozóico Inferior que compreende um total de 75% de todas as FFB's preservadas na crosta da Terra, e como exemplo tem-se as regiões de:

- Lago Superior e Labrador na América do Norte
- Quadrilátero Ferrífero e Carajás no Brasil
- Transvaal na África do Sul
- Krivoy Rog na Ucrânia
- Bacias de Naberu e Hamersley na Austrália

Os depósitos do Arqueano, denominados como sendo do tipo *Algoma*, não apresentam grandes distribuições territoriais, tendo seu expoente máximo nas plataformas Guianense, do Arqueano médio no norte da América do Sul e Liberiana, no oeste Africano. O depósito mais antigo corresponde a Issua (Groelândia).

Os depósitos do Proterozóico Superior / Fanerozóico não possuem condicionantes de sedimentação bem conhecidos, provavelmente são de origem secundária. Os depósitos de Mutum/Urucum na fronteira Brasil/Bolívia é um exemplo clássico, também com ocorrência restrita. A mais jovem FFB conhecida no mundo é a da região de Altai, no oeste da Sibéria e leste do Cazaquistão, com idade de 380 Ma.

2.1.5. FORMAÇÃO CAUÊ E A GERAÇÃO DE MINÉRIOS

A FFB Cauê, de idade proterozóica inferior, representa uma unidade composta basicamente por itabiritos de origem sedimentar química que foi posteriormente metamorfisada, sendo classificada como sendo do tipo Lago Superior. Foi subdividida, quanto à gênese, por Dorr (1969) em minérios hipogênicos e supergênicos. Este autor mostrou ainda que os fenômenos de dissolução do ferro e precipitação na superfície por processo de capilaridade geraram uma cobertura laterítica, sempre presente, capeando a formação ferrífera e denominada canga.

Sua espessura original foi estimada como sendo de 350 m (Endo *et al.*, 2012). Contudo, em função do comportamento plástico da FFB quando exposto aos processos deformacionais, ocorrem espessamentos de camadas com redobramentos e falhamentos, assim, a espessura final pode chegar a 1.500 m em alguns locais (Amorim e Alkmim, 2011). Em campanhas de sondagem da Vale, foram identificadas ocorrências com espessuras da Formação Cauê superiores a 500 m de espessura.

Várias hipóteses foram propostas para tentar explicar a gênese de minérios de alto teor, onde alguns autores postulam a formação através da lixiviação hidrotermal de itabiritos dolomíticos e outros atribuem a gênese exclusiva à lixiviação intempérica da sílica (Zavaglia, 1995).

Assim, o minério hipogênico, do tipo compacto, teria se formado por processos tectono-metamórficos – hidrotermais – agindo sobre itabiritos e gerando corpos de hematita compacta de forma irregular, englobadas, ou por hematitas macias ou por itabiritos, pois devido à lixiviação da sílica e/ou carbonatos, soluções ricas em ferro seriam precipitadas em seus lugares. Os óxidos de ferro seriam recristalizados por eventos metamórficos. Para Dorr (1969), a interdigitação entre minérios compactos com itabiritos, devido a um intenso dobramento, seria uma prova indireta do enriquecimento hidrotermal.

Os minérios enriquecidos por processos supergênicos são formados por corpos de hematitas friáveis, itabiritos enriquecidos e crostas lateríticas. Processos tectono-metamórficos teriam criado condições para circulação de fluídos superficiais, causando a lixiviação da sílica e dolomita dos itabiritos com, conseqüente, enriquecimento em ferro e abrandamento do material. Com o aumento do intemperismo, os corpos passam de compactos para semi-compactos e depois friáveis (Amorim e Alkmim, 2011) (Figura 10). Contudo, localmente, pode existir a atuação de ambos os processos.

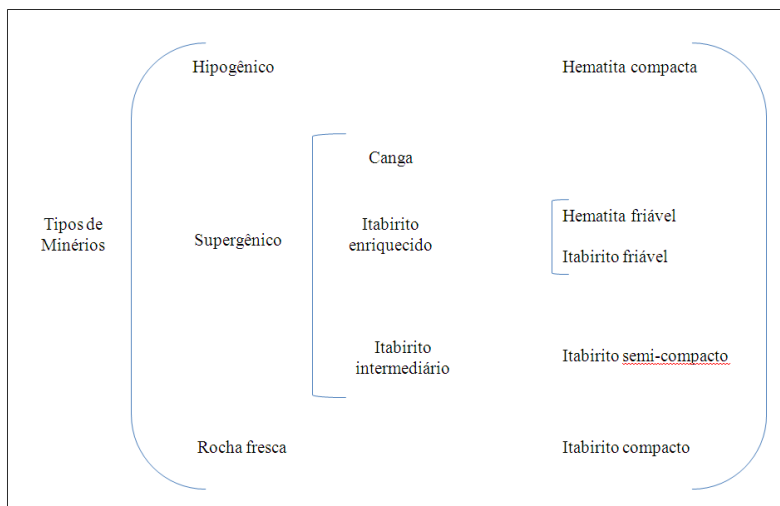


Figura 10. Classificação genética de minérios de ferro, incluindo a rocha fresca (Adaptado de Amorim e Alkmim, 2011).

2.1.6. GEOLOGIA E O MINÉRIO DE FERRO DA MINA DE CAPANEMA

A Mina de Capanema situa-se no flanco sudeste do denominado Sinclinal Ouro Fino que corresponde a uma estrutura dobrada e redobrada, apresentando em planta um aspecto de um bumerangue e em corte transversal numa estrutura sinformal, com o flanco oeste normal e leste invertido.

A mineralização ocorre sobre litologias do Grupo Itabira, representado apenas pelas rochas itabiríticas e hematíticas da Formação Cauê, praticamente recobertas por espessas coberturas de cangas estruturais (*in situ*) e detríticas. A geologia estrutural da região da mina é bastante complexa, encontrando-se fortemente dobrada por gerações distintas de eventos deformacionais, causando duplicação e espessamento de camadas (Franco, 2003), o que explicaria a ocorrência de furos de sondagem realizados dentro da cava, com mais de 500m de profundidade e sem sair do horizonte itabirítico.

A Mina apresenta um arcabouço formado por uma série de horizontes característicos, geralmente, iniciando-se na superfície por um pacote de itabiritos bastante hidratados (goethíticos a anfíbolíticos), que migram para uma unidade silicosa, friável e não hidratada, que se sobrepõe a itabiritos compactos, em contato brusco ou gradativo. É muito comum a presença de diques de rochas máficas, alterados e argilosos concordantes e discordantes. Níveis mais ricos em ferro – hematíticos – também podem ocorrer. Abaixo dessa sequência ferruginosa – Formação Cauê – encontram-se as rochas pelíticas da Formação Batatal, os quartzitos da Formação Moeda e quartzitos da Formação Maquiné (Vaz de Melo e Seabra, 2000).

Uma particularidade da Mina de Capanema consiste no fato que o lençol freático só aflorou quando da abertura do último banco, sugerindo um longo período de aprofundamento do nível d'água, evidenciado por um espesso pacote de cobertura laterítica e itabiritos friáveis. A abundância de minerais hidratados – hidróxidos de ferro, hidróxidos de alumínio e silicatos hidratados de alumínio – encontra-se disseminada não só acompanhando a topografia original, bem como se aprofundando bastante, como sobre intrusões de rochas máficas, que se apresentam decompostas em furos de sonda a mais de uma centena de metros da superfície. Localmente, esse tipo de litologia formada por itabiritos goethíticos com teores em ferro na casa de 60%, é

denominado de WH – *weathered hematites* – ou hematititos alterados, frutos de um intemperismo químico (Guimarães *et al.*, 1986; Hashizume *et al.*, 2001).

Os itabiritos ditos normais e silicosos referem-se a rochas com laminação marcada pela alternância de leitos de quartzo com óxidos de ferro – geralmente *hematita* (Fe_2O_3) ou *magnetita* (Fe_3O_4) – e conteúdo variável de hidróxido de ferro – *goethita* (FeOH_n). A dureza é bastante variável, apresentando desde horizontes friáveis, com a sílica se apresentando numa granulação bastante fina, a horizontes compactos, passando por diversos estágios intermediários. Localmente, podem aparecer horizontes especularíticos, refletindo, provavelmente, zonas de cisalhamento. O magnetismo é fraco, mas presente, refletindo a baixa concentração de magnetitas, grande parte transformadas em martitas (hematitas pseudomorfas de magnetita).

Os itabiritos anfibolíticos são aqueles onde predomina a goethita, eventualmente pseudomorfa de anfibólios, conforme estudos de espectrometria de raios-X, microscopia ótica e análises químicas (Fonseca, 2000). Talvez, uma classificação mais adequada seria o termo itabirito goethítico. Itabiritos dolomíticos são descritos em subsuperfície.

Com relação ao teor de ferro, basicamente os itabiritos são subdivididos em três tipos, que mostram feições típicas de enriquecimento supergênico:

- Itabiritos pobres, com teores de ferro abaixo de 50% e geralmente compactos.
- Itabiritos ricos, com teores entre 50% e 60% de ferro.
- Itabiritos goethíticos ou anfibolíticos, topograficamente capeando os itabiritos ricos, com teores em ferro variando entre 55% a 60% e geralmente com elevados teores em contaminantes – alumina, fósforo e PPC (WH).

Como discutido anteriormente, na indústria do minério de ferro, *hematita* é um termo comercial que se refere a um tipo específico de formação ferrífera, extremamente rica, apresentando percentuais superiores a 62% em Fe; talvez *hematitito* seja uma denominação mais adequada.

Na Mina de Capanema, as *hematitas* ocorrem em camadas contínuas ou em lentes com espessura variando entre 10 e 30 m. Quando localizadas próximas à superfície, se apresentam mais amareladas e goethitizadas – com menores percentuais em ferro, mais

hidratadas e contaminadas, principalmente em fósforo e alumina – consequência da ação de processos intempéricos. A presença de níveis argilosos é comum.

A mineralogia dos hematitos é basicamente formada por cristais de hematita-martítica, um pseudomorfo de magnetita, com uma característica porosidade intracristalina formada pela saída de Fe^{2+} por dissolução. A magnetita – Fe_3O_4 ou $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ – é um óxido de ferro com a presença do elemento “Fe” em duas valências – Fe^{3+} e Fe^{2+} – esse último, instável quimicamente e solúvel sob condições oxidantes.

Na porção sul da mina, o nível hematítico é truncado por uma extensa falha de empurrão – Falha do Fundão – que coloca as rochas quartzíticas da Formação Moeda em contato direto com rochas da Formação Cauê. A *hematita* pode apresentar níveis centimétricos de specularita – hematita lamelar gerada em ambientes de cisalhamento.

Localmente, observa-se um espessamento das hematitas nas charneiras de dobras e as diversas fases de dobramento fazem com que a camada de hematita se apresente em uma série de anticlinais e sinclinais fechados (Franco, 2003).

Diques de rochas máficas, basálticos e anfibolíticos, cortam as rochas do Sinclinal de Ouro Fino, sendo geralmente subverticais a verticais, com direção preferencial N/S e EW, como os existentes na região norte da mina. Eles são encontrados, mesmo em grandes profundidades, totalmente decompostos, com cores variando do branco a amarelo-avermelhado. A caulinita está sempre presente em maior proporção do que a gibsitita. Os diques podem variar em espessura, de 1m a mais de 30 m. Sua ocorrência é mais comum nas porções próximas à região central do Sinclinal.

A canga é formada por uma laterita com teores de ferro variando entre 50% e 60%, formada por uma grande quantidade de hidróxidos de ferro – goethitas e limonitas – e excessivos teores de contaminantes, como fósforo e alumina. A espessura é variável, podendo atingir mais de uma dezena de metros. Pode ser subdividida em dois tipos básicos:

- Canga detrítica – formada por seixos de itabirito, canga e fragmentos de hematita, cimentados por uma massa fina de óxidos e hidróxidos de ferro.

Usualmente associada a altos percentuais de contaminantes, principalmente, alumina (Al_2O_3) e fósforo, geralmente incluso nas goethitas.

- Canga estruturada – constituída por óxidos e hidróxidos de ferro, geralmente contaminados por limonitas e argilas, apresentando estruturação original preservada, como foliação e pequenas dobras. Pode chegar a 30m de espessura.

Depósitos de tálus ocorrem em pontos localizados sendo constituídos por blocos rolados de tamanhos variados em regiões mais escarpadas ou por vezes recobrem os contatos entre a formação ferrífera Cauê e o Filito Batatal (Vaz de Melo e Seabra, 2000).

2.1.7. TIPOLOGIA DE MINÉRIOS

Com relação aos tipos de minérios, são subdivididos com base no teor em ferro. Assim, têm-se os hematítos, de alto teor, geralmente com ferro maior que 62% e os itabiritos, rocha metamórfica com teor em ferro variando em torno de 35% a 62%. Além desses dois tipos, tem-se ainda, magnetítos, geralmente corpos de pequenas dimensões onde o mineral-minério principal é a magnetita e, os jaspilitos, basicamente formados por jaspe (sílica criptocristalina) e com baixos teores em ferro, tidos como sendo o protominério.

Nessas tipologias podem existir diferentes classificações, mas basicamente se dividem em dois grandes grupos: a classificação granulométrica e a química.

Os minérios de alto teor – *hematítos* – quimicamente mais homogêneos que os de baixo teor – *itabiritos* – são constituídos, quase exclusivamente, por óxidos de ferro e podem ser classificados em:

- Minério compacto – representado por corpos maciços e densos;
- Minério friável – granular (grosso a médio), facilmente desagregável;
- Minério pulverulento – granulação bastante fina, sem estrutura interna, eventualmente, com ausência de contaminantes, e denominado *blue dust*.

Por outro lado, os *itabiritos* são definidos pela alternância de bandas de óxidos de ferro e minerais transparentes. Da mesma forma que os minérios de alto teor, podem ser subdivididos em três subtipos com relação à resistência mecânica – friáveis, compactos

e com diversas variações intermediárias entre um tipo e outro, denominadas *itabiritos semi-compactos*.

Quanto à composição de minerais transparentes podem ser individualizados em:

- Itabiritos silicosos – constituídos por bandas ricas em óxidos de ferro alternadas com bandas de sílica (do jaspe ao quartzo, em granulometrias variadas).
- Itabiritos dolomíticos – composto por bandas ricas em carbonatos alternadas com óxidos e carbonatos de ferro.
- Itabiritos goethíticos ou anfibolíticos – composto por bandas ricas em hidróxidos de ferro, goethitas ou por pseudomorfos de anfibólios goethitizados, óxidos de ferro, argilo-minerais e, secundariamente, teores em sílica variáveis. São típicos de porções hidratadas.
- Itabiritos manganésíferos e filíticos (argilosos) são tipos subordinados encontrados ocasionalmente nas interfaces com filitos e carbonatos.

Dessa forma, uma variável substancialmente importante na pesquisa de minério de ferro é a avaliação da curva de distribuição granulométrica do minério, que irá definir as etapas e custos do processo de beneficiamento mineral. Comercialmente o minério divide-se em três grupos básicos, fruto das características texturais:

- O Granulado (*Natural Pellet*) é o minério mais grosso e que, por envolver somente classificação granulométrica durante seu processamento, representa o produto de menor custo de produção. A granulometria pode variar, mas em geral situa-se acima de 6,3 mm, com *top size* (máximo diâmetro) variando em função do tipo de forno siderúrgico que será utilizado.
- O *Sinter Feed* representa o minério de granulação intermediária, onde existe uma variável determinante no processo siderúrgico subsequente, que é a quantificação do percentual acima e abaixo de 1 mm em sua partição granulométrica, definindo uma maior valoração pelo percentual da faixa grossa do minério. Esse tipo de produto é vendido *in natura*, requerendo processos de aglomeração nas siderúrgicas antes de seu uso em fornos de redução.
- O *Pellet Feed* é o minério de granulação mais fina, abaixo de 0,15 mm, necessitando de um oneroso processo de aglomeração realizado pelas mineradoras antes de sua comercialização, representando o minério com os

maiores custos de produção. Comercialmente chamado de *pelota* e que até algumas poucas décadas atrás era descartado como estéril.

Dessa forma, fica explícita a necessidade do conhecimento prévio da *curva de distribuição granulométrica* do minério, pois esse aspecto tem impacto direto na lucratividade das empresas, com os custos de produção sendo diretamente afetados por essa variável.

2.2. PETROFÍSICA

Rochas são materiais sólidos consolidados, formados naturalmente por agregados de matéria mineral, que se apresenta em grandes massas ou fragmentadas. A rocha é usualmente caracterizada por sua densidade, deformabilidade e resistência. Maciço rochoso é um meio descontínuo formado pelas porções de rocha intacta e pelas discontinuidades que o atravessam.

Descontinuidade é o termo utilizado em engenharia de rocha para todos os tipos de planos, para indicar que o maciço rochoso não é contínuo, diferente da rocha intacta, que é um meio mecanicamente contínuo. Na geologia, a descontinuidade pode ser um plano de fratura, de falha, de acamamento, de contato litológico e outros.

Para se avaliar o grau de integrabilidade de uma rocha estudam-se algumas propriedades-índice – propriedades físicas que refletem a estrutura, a composição, a fábrica e seu comportamento mecânico, tais como:

- Teor de umidade
- Peso específico
- Porosidade
- Permeabilidade
- Velocidade sônica
- Resistência à tração e à compressão
- Durabilidade

Propriedades-índice podem ser medidas diretamente através de ensaios-índice em laboratório, os quais fornecem uma indicação da qualidade da rocha. A importância

destes índices baseia-se na caracterização/quantificação da matriz da rocha intacta e também na correlação das propriedades mecânicas.

2.2.1. TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade em uma amostra de rocha é expresso como uma porcentagem de massa seca da amostra (Guerra, 2011). O teor em unidade é obtido a partir de amostragem de campo, onde, após o processo de extração da amostra, retiram-se fragmentos de rocha que devem ser guardados em recipientes hermeticamente fechados com o objetivo de que a mesma não perca sua umidade. Já em laboratório, os fragmentos devem passar por procedimento similar ao da determinação da umidade do solo.

2.2.2. PESO ESPECÍFICO

O peso específico é dado pela relação entre o peso da amostra e seu volume. O valor deste índice depende do grau de intemperismo da rocha, da profundidade e do grau de umidade da amostra, podendo-se associar com o estado saturado, úmido, natural e seco. Portanto, atendendo à variabilidade da quantidade de água dentro da rocha, considera-se o peso específico aparente seco um parâmetro mais representativo (Guerra, 2011).

O método mais tradicional de determinação da densidade é a partir de um corpo de prova extraído da rocha ou de um testemunho. Para rochas compactas, insolúveis e não permeáveis, a obtenção da densidade é relativamente simples, pesando-se a amostra no ar e depois imersa em água, com a densidade sendo obtida por uma matemática simples (Shore, 2010). Contudo, essa metodologia exprime o valor relativo ao ponto da coleta da amostra, tornando imprescindível a realização de várias amostras, para que, após um estudo estatístico, se chegue ao valor final de densidade de uma dada litologia. Porém quanto maior a friabilidade do material estudado, maior a probabilidade de ocorrência de erros e maior a dificuldade na definição da densidade.

Existem diferentes métodos para obter o peso específico seco da rocha, onde cada método é aplicado segundo a geometria e as características da amostra. De forma geral, a massa seca é obtida pesando-se as amostras depois de serem secas na estufa ou com a sílica gel. O que varia em tais métodos é a forma de obtenção do volume do corpo de

prova, o qual vai depender se a amostra apresenta geometria regular ou irregular e das características da rocha (Carrasquilla, 2012). Portanto, o volume da amostra pode ser calculado como segue:

- Usando instrumentos de medição, tais como o paquímetro. Este método é recomendado para amostras com uma geometria regular, como amostras cilíndricas ou cúbicas;
- Usando a técnica do deslocamento do volume de mercúrio ou de água. Este método é recomendado para amostras com qualquer geometria;
- Usando-se o Princípio de Arquimedes, estabelecendo a diferença entre a massa saturada e submersa da amostra. Este método pode ser aplicado em amostras com geometria regular e irregular, porém é recomendado em rochas que não desagregam em contato com a água e que não são expansíveis.

De maneira geral, todos os métodos referem-se a amostras relativamente compactas, contudo para materiais friáveis a avaliação da densidade é bem mais complexa e com tendência a apresentar maiores índices de erro.

Em termos gerais, rochas da crosta terrestre possuem massa específica variando entre 1.000 e 3.000 kg/m³. Diversos minerais podem apresentar valores acima de 3000 kg/m³. Exemplos importantes são os minerais de ferro hematita, magnetita e martita (4.900 a 5.200 kg/m³). Além da composição mineralógica, a porosidade causada por diversos processos geológicos e o tipo de preenchimento destes vazios também controlam a massa específica dos materiais da crosta.

2.2.3. POROSIDADE

A porosidade expressa a proporção de vazios na massa total da rocha. Os vazios são constituídos pelos poros e pelas fissuras presentes na rocha (Guerra, 2011). Uma das maneiras de obter a porosidade é a medida direta, através do volume de vazios. A amostra de rocha é saturada por imersão em água livre de gás, submetida a vácuo. O processo de saturação é lento para rochas de baixa porosidade. Após a saturação, a amostra é pesada, determinando seu peso saturado. Em seguida, a amostra é seca em estufa a 105°C por 24h e pesada, determinando seu peso seco. O processo de saturação e

secagem da amostra é repetido até que sejam obtidos valores de peso constantes, em balança de precisão (Carrasquilla, 2012). Este método é utilizado em rochas coerentes (que não se desagregam quando em contato com a água), não expansíveis quando secas e imersas em água e de geometria regular.

Um outro método é a obtenção da porosidade através de lâmina delgada, onde o índice é obtido pela contagem de poros em microscópio óptico. Para a visualização dos poros, a lâmina é preparada impregnando os vazios com resinas contendo corantes. No entanto, esta técnica apresenta alguns inconvenientes:

- A espessura reduzida da lâmina ressalta o volume dos grãos em detrimento do espaço dos poros, dificultando a interpretação.
- Ocorre escurecimento dos poros pequenos e microporos na lâmina, os quais podem ser facilmente confundidos com outros constituintes sólidos da amostra de rocha.

A porosidade é uma importante propriedade, mas de quantificação complexa, exigindo rígidos padrões de execução e de amostragem. Sua importância basicamente se reflete em dois fatores básicos: mede a capacidade de armazenamento de fluidos e regula a densidade da rocha, que é uma medida básica para uma quantificação da massa de um depósito mineral.

De acordo com a Figura 11, a porosidade pode ser subdividida em dois tipos:

- Porosidade primária – é aquela que a rocha adquire durante a sua deposição. Por exemplo, a porosidade intergranular em arenitos.
- Porosidade secundária – resulta de processos geológicos subsequentes à gênese das rochas, p. ex., o desenvolvimento de fraturas nas rochas ou cavidades fruto da dissolução de rochas calcárias.

Tipos de Porosidade



Figura 11. Porosidade primária, formada durante a deposição e porosidade secundária, formada após a deposição por processos físicos e/ou químicos (Adaptado de Carrasquilla, 2012).

A porosidade também pode ser avaliada em função de sua efetividade, com base na conectividade entre os poros. (Figura 12)

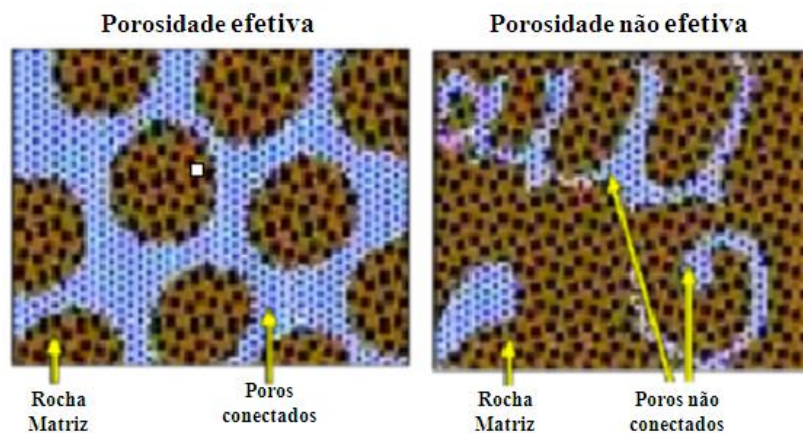


Figura 12. Porosidade efetiva, através de poros conectados e porosidade não efetiva, com poros desconectados (Adaptado de Carrasquilla, 2012).

A porosidade (η) das rochas é extremamente variável, mesmo as que pertençam ao mesmo grupo genético, variando conforme a profundidade, idade geológica e grau de intemperismo. Normalmente, a maior parte das rochas ígneas apresenta uma porosidade menor que 2% na rocha sã (Guerra, 2011), já em rochas sedimentares a porosidade

geralmente decresce com a idade geológica e com a profundidade, quando outros fatores são mantidos constantes (Tabela 2). Alguns exemplos são:

- Rochas sedimentares : $0 < \eta < 90\%$ (calcários: $\eta \geq 50\%$; arenitos: $\eta = 15\%$)
- Rochas ígneas e metamórficas: $\eta \leq 2\%$ (sã) e entre 20 e 50% (intemperizadas)

Tabela 2. Variação da porosidade de algumas rochas sedimentares em função da idade e profundidade (Carrasquilla, 2012)

| Rocha | Idade | Profundidade (m) | Porosidade (η) |
|-----------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| <i>Arenito</i> | <i>Cambriano</i> | <i>Superficial</i> | <i>11%</i> |
| <i>Arenito</i> | <i>Cretáceo</i> | <i>Superficial</i> | <i>34%</i> |
| <i>Folhelho</i> | <i>Cretáceo</i> | <i>200</i> | <i>34%</i> |
| <i>Folhelho</i> | <i>Cretáceo</i> | <i>150</i> | <i>25%</i> |
| <i>Folhelho</i> | <i>Cretáceo</i> | <i>1000</i> | <i>21%</i> |
| <i>Folhelho</i> | <i>Cretáceo</i> | <i>1800</i> | <i>8%</i> |

A porosidade absoluta leva em conta o volume total de vazios presentes na rocha, enquanto que a porosidade efetiva expressa a quantidade de poros interconectados e que podem transmitir fluidos ou corrente elétrica. Os principais fatores que afetam a porosidade de rochas porosas são:

- Grau de seleção e irregularidade dos grãos
- Arranjo dos grãos
- Cimentação
- Compactação
- Conteúdo de argila

2.2.4. PERMEABILIDADE

A permeabilidade expressa o grau de interconectividade entre os poros (rochas sedimentares) ou fissuras (outros tipos de rocha) e representa a facilidade de passagem de fluidos por esses poros. O tamanho, a forma e a interconectividade dos vazios determinam a permeabilidade ou condutividade hidráulica da rocha (Figura 13). Contudo, em campo quem governa a permeabilidade do maciço, na maioria dos casos, é o sistema de descontinuidades (Carrasquilla, 2012).

Apesar de ser aparentemente simples a definição da permeabilidade, ela é na realidade bastante complexa. A vazão do fluido aumenta à proporção que aumenta o diferencial

de pressão exercido sobre o mesmo. Por outro lado, esse fluido terá maior dificuldade em escoar através da rocha, na proporção em que sua viscosidade aumenta.

A medida da permeabilidade da rocha é também muito importante na prática da Geotecnia, em problemas como:

- Bombeamento de fluido para o interior ou para fora de uma formação porosa;
- Disposição de rejeitos em formações porosas;
- Armazenamento de fluidos em cavernas;
- Poços;
- Previsão de fluxo em túneis.

A permeabilidade pode ser determinada, no laboratório, medindo-se o tempo necessário que um dado volume de fluido sob pressão leva para percolar através da amostra. O fluxo pode ser aplicado de duas formas:

- Fluxo divergente: dá-se de dentro para fora da amostra.
- Fluxo convergente: o fluxo se dá de fora para dentro da amostra.

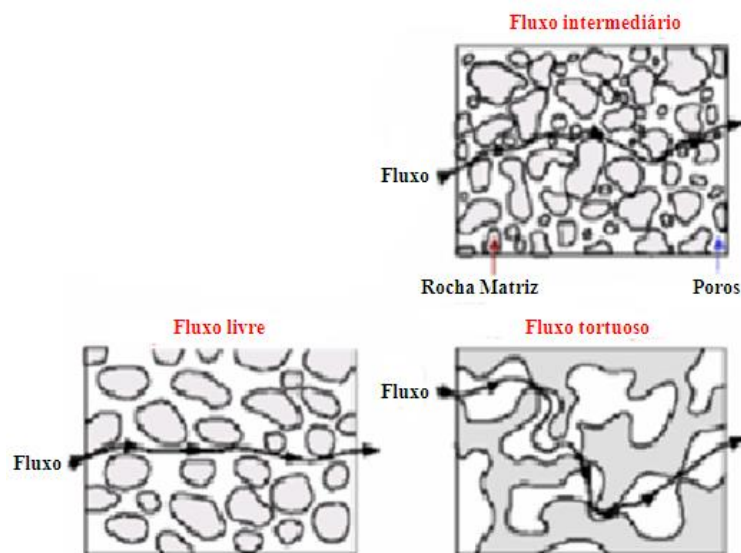


Figura 13. Variação da permeabilidade em diferentes padrões de porosidade, onde a interconectividade dos poros é quem controla o fluxo do sistema (Adaptado de Carrasquilla, 2012).

2.2.5. VELOCIDADE SÔNICA

Ondas acústicas são ondas de pressão que se propagam através da rocha de uma maneira e velocidade que são dependentes das características e da geometria do material atravessado (Carrasquilla, 2012).

As frentes de onda são classificadas pela forma como elas se movem em relação ao movimento das partículas. Existem dois tipos de frentes de onda: (Figura 14)

- Compressional – também conhecidas como ondas primárias, de pressão ou ondas P. A frente move-se na direção do deslocamento das partículas e com velocidade mais alta que a de cisalhamento.
- Cisalhante – também conhecida como transversal, secundária ou ondas S. Essas frentes de onda movem-se em direção perpendicular à direção de deslocamento das partículas e são mais lentas que as compressionais. Ondas de cisalhamento só se propagam em meios que possuem propriedades elásticas – sólidos ou fluidos altamente viscosos – e não se propagam na água.

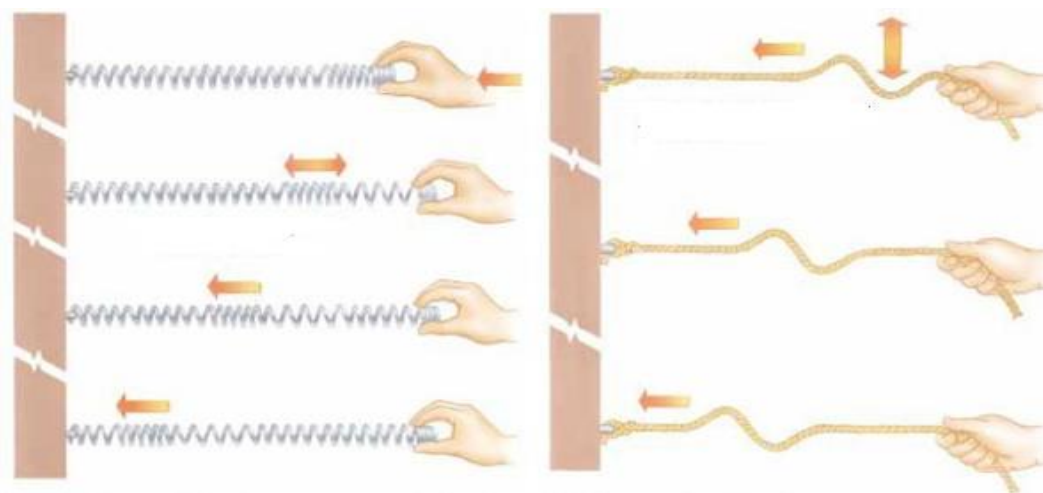


Figura 14. Modos de propagação de frentes de onda – compressional ou longitudinal (onda P, primária) à esquerda e de cisalhamento ou transversal (onda S, secundária) à direita (Thompson e Turk, 1997).

Frentes de onda de cisalhamento e de compressão são chamadas de *ondas de corpo*, pois elas se movem através da rocha até encontrarem uma interface – uma descontinuidade – como uma fratura ou um contato litológico. Nesse ponto, as ondas são refletidas e/ou refratadas para o novo meio. Os princípios de refração e reflexão das frentes de onda são guiados pela Lei de Snell e são dependentes do ângulo em que a frente atinge a interface e o contraste de velocidade/densidade entre os meios (Figura 15).

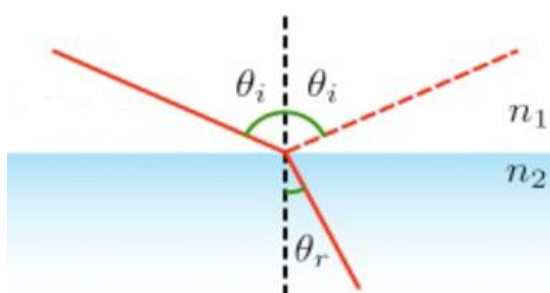


Figura 15. Uma frente de onda incidente sobre uma superfície origina uma onda refletida e outra refratada. A relação entre os ângulos de incidência (θ_i) e refração (θ_r) é governada pela Lei de Snell.

Esta propriedade-índice quantifica a velocidade de propagação das ondas P (primária) e S (secundária) em um corpo de prova de rocha, por meio de ensaios não destrutivos, e fornece informações sobre as características elásticas e o fissuramento da rocha. Este índice também é utilizado para avaliar a integridade das amostras antes de fazer algum ensaio e para agrupar amostras de comportamento similar para análises estatísticas (Guerra, 2011).

Fourmaintraux (1976) propõe determinar um índice que quantifica o grau de fissuramento na rocha, por meio de um ábaco que relaciona o índice de qualidade (IQ) e a porosidade (η) com o grau de fissuramento da rocha (Figura 16). O índice IQ é expresso através da razão entre a velocidade de onda longitudinal medida numa amostra de rocha e a velocidade longitudinal se a amostra de rocha não tivesse poros ou microfissuras.

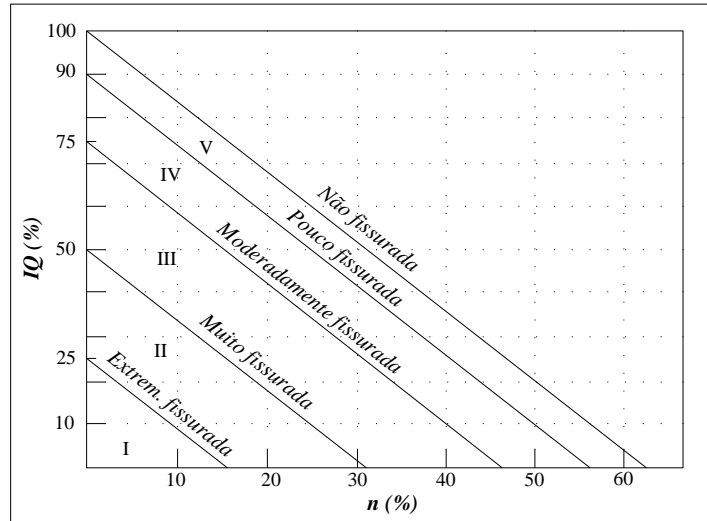


Figura 16. Ábaco para qualificar o grau de fissuramento numa rocha (Fourmaintraux, 1976).

2.2.6. DURABILIDADE

Todas as rochas são mais ou menos afetadas por ciclos de variação no nível de tensões (aquecimento-resfriamento, umedecimento-secagem, congelamento-degelo), que leva à fadiga e ruptura do material. O índice de durabilidade é bastante utilizado na determinação da durabilidade de rochas submetidas à ação mecânica e a ciclos de molhagem e secagem (Guerra, 2011).

O índice de alterabilidade está diretamente relacionado à composição mineralógica da rocha, que regula o grau de intemperismo químico, físico e biológico e indica a tendência de desagregação da rocha.

Portanto, durabilidade é a dificuldade que uma determinada rocha tem de se alterar. Alterabilidade é o inverso da durabilidade, ou seja, a facilidade que uma determinada rocha tem de se alterar. Algumas rochas deterioram-se muito rapidamente quando expostas às ações da natureza, como os folhelhos e alguns tipos de rochas vulcânicas, outras são mais resistentes, como os arenitos e quartzitos.

2.2.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO

A resistência determina a eficiência da rocha em manter o seu arranjo original, ou seja, em manter coesos os seus componentes. A resistência à compressão pode ser obtida de maneira direta, com o ensaio de compressão uniaxial, e de maneira indireta, pelo ensaio

de carga puntiforme (*point load test*) ou pelo *Esclerômetro de Schmidt* e corresponde à carga de ruptura da amostra.

A resistência à compressão simples (uniaxial) corresponde à carga de ruptura da amostra em função da sua área, sendo um parâmetro amplamente usado em diversas aplicações, como na classificação geomecânica de maciços rochosos, em critérios de ruptura de taludes e na estimativa da rugosidade de descontinuidades da rocha (Guerra, 2011). O *Esclerômetro de Schmidt* é usado comumente para estimar a resistência à compressão simples das paredes rochosas, porém também é aplicável em núcleos de rochas. Tem a vantagem de ser um ensaio rápido, onde pode ser executado um grande número de provas sem que isto acarrete maiores custos.

A resistência à tração é definida como a máxima tensão à tração que a rocha pode suportar (Goodman, 1989). Os materiais rochosos geralmente apresentam uma baixa resistência à tração, devido principalmente à existência de microfissuras.

A resistência à tração de um material rochoso pode ser obtida pelo ensaio de tração direto ou estimada por meio de diferentes ensaios, entre eles, o ensaio brasileiro e o ensaio à flexão (Guerra, 2011).

2.2.8. PROPRIEDADES ELÉTRICAS

Os corpos metálicos conduzem naturalmente a corrente elétrica através da transferência de elétrons entre seus átomos, enquanto nas rochas ela é transmitida de forma eletrolítica – movimentação iônica. Devido ao fato de que a matriz da rocha geralmente ser formada por minerais não condutivos – silicatos, óxidos e carbonatos – a condutividade elétrica é função da presença de fluidos condutivos na porosidade das rochas e, dessa forma, quanto maior a conectividade dos poros e a concentração iônica, maior será a condutividade elétrica. Fluidos pouco condutores, como a água doce, óleo e gás, tornam a rocha mais resistiva. Por outro lado, minerais bons condutores – geralmente metálicos – ocorrem em pequenas concentrações tendo pouca participação nas propriedades elétricas das rochas. Já as argilas, aumentam a condutividade elétrica por apresentarem elevada quantidade de cátions livres em sua estrutura.

2.3. GEOFÍSICA E PERFILAGEM

A Geofísica é a ciência que estuda as propriedades físicas da Terra tais como densidade, susceptibilidade magnética, radioatividade, calor, etc. Trabalhando em diferentes escalas – métrica a planetária – os métodos geofísicos podem ser aplicados a uma ampla gama de investigações, do estudo de todo o Planeta (geofísica da Terra sólida) à exploração de uma região específica da crosta para fins de engenharia, comerciais ou outros propósitos (geofísica aplicada) (Kearey *et al.* 2002).

Os métodos geofísicos são comumente utilizados de forma combinada, com um método suportando a interpretação do outro. Há uma divisão geral de métodos de levantamento geofísico em dois grandes grupos: os que fazem uso dos campos naturais da Terra, e aqueles que envolvem a aplicação na superfície de energia gerada artificialmente.

Alguns exemplos de aplicação dos métodos geofísicos:

- Geofísica de superfície – terrestre, marítima, aerotransportada ou satelital
- Geofísica de poço – perfilagem

A perfilagem geofísica pode ser definida como sendo uma técnica que busca pesquisar e analisar medidas em poços ou furos de sondagem, para determinar propriedades físicas e químicas de solos e rochas situadas nas vizinhanças dos furos.

A distinção entre a Geologia e a Geofísica e suas técnicas não é muito bem percebida; perfis de poços, por exemplo, são largamente usados em estudos geológicos, embora eles apresentem resultados obtidos em observações instrumentais geofísicas.

As rochas e algumas de suas propriedades, como porosidade, densidade, saturação em água e outras, podem ser identificadas com base em diferentes propriedades (Tabela 3), tais como:

- Elétricas – condutividade elétrica, polarização induzida, constante dielétrica, potencial eletroquímico. Indicado na prospecção de água.
- Magnéticas – susceptibilidade magnética. Método indicado na prospecção de minerais magnéticos.
- Acústicas – velocidade de propagação ou tempo de transito de ondas elásticas compressionais ou cisalhantes.

- Radioativas – radioatividade natural ou induzida.
- Mecânicas – métodos sísmicos para avaliação da densidade e porosidade.
- Térmicas – anomalias no gradiente geotérmico, servindo como um indicativo de potencial energético.

Tabela 3. Aplicação de alguns métodos de perfilagem geofísica e sua relação com as propriedades das rochas (Carrasquilla, 2012).

| <i>Perfil</i> | <i>Parâmetro medido</i> | <i>Propriedades derivadas</i> |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Cáliper | Diâmetro do poço | Resistência de rochas, tensões <i>in situ</i> |
| Potencial Espontâneo | Potencial elétrico natural | Salinidade, litologia, argilosidade |
| Raios Gama Natural | Radioatividade total | Litologia, argilosidade |
| Espectrometria de Raios Gama | Contagens ou concentrações de K, U e Th | Litologia, argilosidade |
| Macro resistividade | Resistividade elétrica com maior profundidade de investigação | Resistividade elétrica das rochas mais afastadas das paredes do poço |
| Micro resistividade | Resistividade elétrica com pequena profundidade de investigação | Resistividade elétrica das rochas nas vizinhanças das paredes do poço |
| Elétrico-indução | Condutividade elétrica | Saturação fluida |
| Densidade | Peso Específico e eletrônica das rochas | Porosidade e densidade de rochas |
| Neutrônico | Índice de hidrogênio | Porosidade |
| Sônico | Tempo de trânsito de ondas mecânicas nas rochas | Porosidade, propriedades elásticas |
| Dipmeter | Micro resistividade azimutal | Atitude e geometria das camadas |
| Imagem | Resistividade ou velocidade acústica | Estratigrafia, fraturas, dobramentos |

Na perfilagem tais propriedades podem ser obtidas com o deslocamento contínuo de um ou mais sensores dentro de um poço. A representação gráfica entre as profundidades reais e as propriedades petrofísicas, é denominada perfil geofísico. As unidades de perfilagem são descidas dentro dos furos utilizando-se variados tipos de sensores, calibrados, aferidos e monitorados para operarem dentro de uma faixa de precisão.

Entretanto, um conjunto de perfis geofísicos não fornece, necessariamente, propriedades para que se possa usar diretamente na avaliação do potencial das camadas. Na realidade, as propriedades petrofísicas são inferidas ou interpretadas a partir dos sinais registrados

pelos sensores. Problemas podem surgir quando mudanças significativas em uma situação geológica real de subsuperfície originam diferenças insignificantes nas magnitudes medidas durante um levantamento geofísico. De maneira análoga, podem surgir alterações nos perfis geofísicos, onde diferentes configurações geológicas podem reproduzir os dados observados. Assim, a interpretação geofísica preocupa-se tanto com a determinação das propriedades de subsuperfície que correspondem a todas as possíveis soluções, quanto com as hipóteses que restrinjam o número de soluções admissíveis (Kearey *et al.*, 2002), procurando-se chegar ao resultado mais adequado à geologia da área em estudo.

Dessa forma, a perfilagem não substitui completamente a amostragem testemunhada (direta), pois informações geológicas locais sempre serão necessárias para o perfeito entendimento e interpretação dos dados.

Apesar dessas limitações inerentes, o levantamento geofísico é uma ferramenta de inestimável valor para a investigação da geologia de subsuperfície e pode desempenhar um papel diferencial nos programas de pesquisa de recursos naturais.

Assim, os levantamentos medem a variação de algumas grandezas físicas em função tanto à posição quanto ao tempo e em qualquer caso, o modo mais simples de apresentar os dados é construindo um gráfico que mostre a variação da grandeza medida em relação à distância ou ao tempo, dependendo do caso. O gráfico irá apresentar uma forma de onda mais ou menos complexa, refletindo as variações físicas de subsuperfície, superpostas aos ruídos gerados por fatores não geológicos, da imprecisão dos instrumentos e das incertezas no levantamento. A função central na interpretação é separar o sinal do ruído. O processamento das formas de onda geofísicas visa maximizar o conteúdo do sinal e, com isso, realizar a interpretação geológica.

Dessa forma, a perfilagem geofísica de poço, também conhecida como perfilagem a cabo (*wire-line logging*), é utilizada para se obter informações sobre a sequência e espessura dos estratos rochosos atravessados durante a perfuração (Figura 17), na capacidade de definir as profundidades das interfaces geológicas, na definição de camadas com assinaturas geofísicas características, fornecendo condições estratigráficas para correlacionar informações entre um furo e outro, na obtenção de informações sobre

a rocha *in situ*, na caracterização do fraturamento das rochas e na verificação de aspectos construtivos dos furos de sonda (Kearey *et al.*, 2002).

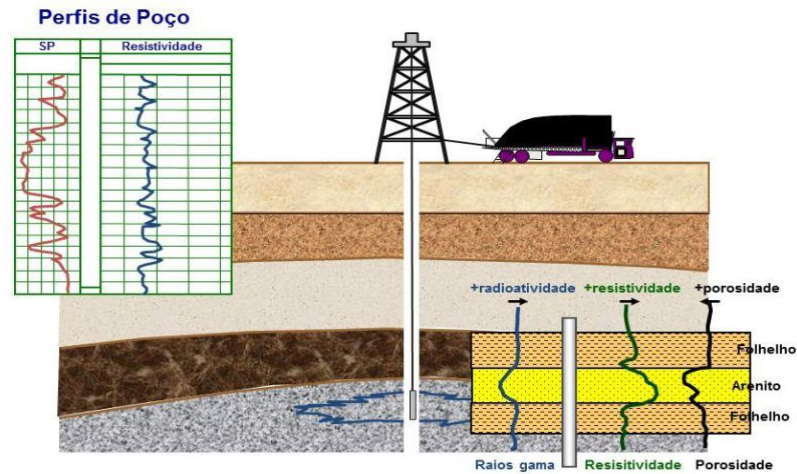


Figura 17. Figura esquemática exemplificando a interpretação de contatos litológicos a partir da avaliação de múltiplos perfis. O painel superior à esquerda apresenta os exemplos das curvas de potencial espontâneo (SP) e de resistividade. O painel inferior à direita, apresenta as curvas de raios gama, resistividade e porosidade e suas características ao atravessarem diferentes litologias como folhelho e arenito. (Carrasquilla, 2012)

Uma investigação pode ter uma maior ou menor penetração lateral, dependendo da distância entre a fonte e o receptor, onde com o aumento da distância aumenta-se a penetração na rocha e diminui a resolução do dado (Figura 18).

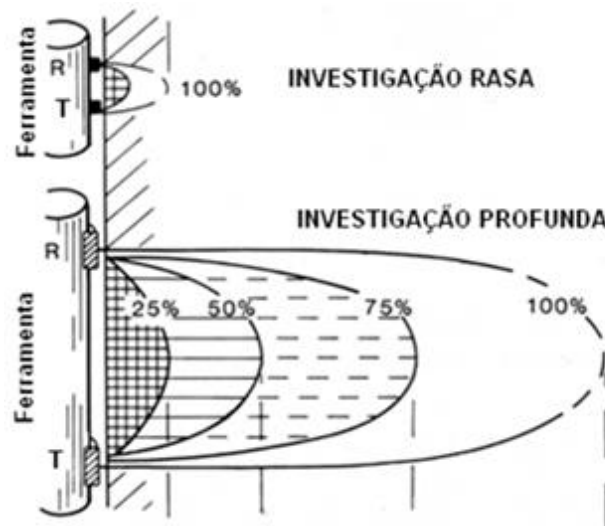


Figura 18. Relação entre espaçamento do conjunto transmissor / receptor e profundidade lateral da investigação. Quanto maior a distância do conjunto, maior a penetração lateral e menor a resolução do dado. (Carrasquilla, 2012)

A Figura 19 ilustra alguns tipos de perfis geofísicos com suas respectivas resoluções em função da profundidade de investigação.

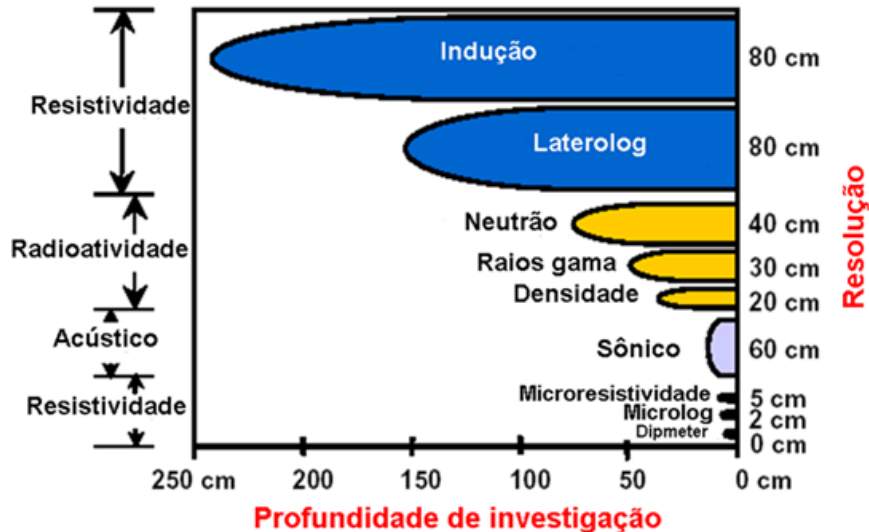


Figura 19. Relação da resolução e profundidade lateral na investigação geofísica para diferentes métodos. (Carrasquilla, 2012).

Como já discutido anteriormente, várias propriedades geológicas podem ser obtidas por perfilagem, como a espessura e mergulho de camadas, porosidade, permeabilidade, grau de saturação de água e/ou hidrocarbonetos, fraturamento, temperatura e outros. Portanto, na investigação de subsuperfície, os diferentes parâmetros petrofísicos são primordiais para a pesquisa e interpretação geológica. A perfilagem de furos é utilizada na determinação de propriedades físicas *in situ*, com base na existência de contrastes das propriedades das rochas (Fullagar e Fallon, 1997).

Na indústria do petróleo, a perfilagem de poços é uma ferramenta de uso rotineiro e de longa data, inclusive o desenvolvimento da tecnologia foi justamente para atender a demanda da pesquisa e, talvez em função disso, tenha sido pouco difundido na mineração justamente por se tratar de técnicas muitas específicas. Segundo Baltosser & Lawrence (1970), quase todos os métodos largamente utilizados na indústria de petróleo apresentam alguma limitação na pesquisa mineral, que acabou por redirecionar o foco

para métodos considerados “exóticos” na pesquisa do petróleo, como polarização induzida, susceptibilidade magnética, ativação nuclear e análises espectrais.

Na pesquisa do petróleo, é comum a perfuração atingir milhares de metros de profundidade e seria inconcebível a utilização de métodos tradicionais de sondagem testemunhada, tanto em custo quanto em prazo de execução. Dessa forma, a utilização de métodos de sondagem destrutiva é o mais indicado, daí veio a necessidade de se desenvolver técnicas indiretas para auxiliar a compreensão do que estava sendo perfurado.

A aplicação de técnicas de perfilagem geofísica na exploração mineral tem apresentado maior desenvolvimento a partir da década de 1990, com a evolução de novos equipamentos e *softwares* específicos (Killeen, 1997), o que acabou por abrir uma nova fronteira para a pesquisa.

Segundo Fullagar e Fallon (1997), a geofísica tornou-se um componente vital nas técnicas modernas de exploração de metais, fornecendo meios para delimitar horizontes mineralizáveis e caracterizar maciços rochosos a baixo custo, a partir de trabalhos de imageamento e de perfilagem.

A densidade, a radiação gama-natural, a susceptibilidade magnética e a condutividade elétrica são os principais parâmetros da perfilagem mineral, porque podem ser obtidos em furos secos ou preenchidos por água, e a velocidade sônica é o principal parâmetro de perfilagem geotécnica, fornecendo dados para a avaliação do grau de fraturamento, porosidade e deformação da rocha (Fullagar e Fallon, 1997).

Oliveira et al. (2008b), mostraram que a sondagem exploratória testemunhada é cara, e por ter uma malha amostral relativamente espaçada, não fornece condições adequadas para um cálculo confiável de volume de carvão para fins de planejamento de lavra. Assim foram utilizados furos de desmonte de rocha, numa malha amostral densa, para a execução da perfilagem geofísica – resistividade e raios gama natural – na identificação de contatos litológicos e no cálculo do volume de material contido na área em estudo. Os autores concluíram que a perfilagem mostrou-se como a melhor opção no processo de controle da produção, gerando resultados muito próximos da realidade.

A utilização de técnicas de perfilagem geofísica, embora não muito difundida na pesquisa do minério de ferro, já indicou bons resultados, como o apresentado por Gordon *et al.*, (2000) na empresa Iron Ore Company no Canadá, onde obtiveram excelente correlação entre a susceptibilidade magnética, densidade, concentração de magnetitas e teor de ferro no minério magnetítico, podendo servir como base para utilização no controle de qualidade e planejamento de mina.

Nos depósitos CID (Channel Iron Formation) de Yandi na Austrália, caracterizado por uma ocorrência de seixos de goethita e hematita com espessura métrica em níveis bem definidos, furos de sondagem com malha de 50 x 50 m são realizados para definição do recurso medido. Todos os furos são perfilados com calíper, gama natural, susceptibilidade magnética e densidade. A razão entre a densidade e o gama natural é utilizada para discriminar os horizontes de alto teor, pois nesses locais, a densidade tende a aumentar e o gama natural tende a diminuir (Butt e Fullagar, 2001).

Almeida (2011) estudou a obtenção da densidade *in situ* do minério de ferro e rochas encaixantes na região do Quadrilátero Ferrífero (MG), usando a técnica de perfilagem geofísica gama-gama. O autor concluiu que comparações feitas entre densidades determinadas por análises de laboratório e densidades estimadas por perfilagem geofísica mostrou diferenças inferiores a 15%. Ainda segundo Almeida (2011), a utilidade da técnica cresce quando a recuperação de testemunhos é deficiente ou inexistente, como ocorre em determinadas situações envolvendo minérios de ferro friáveis.

Nas minas australianas da BHP, a grande maioria dos furos é executada com perfuratriz rotopercussiva e os geólogos consultam os perfis de densidade, juntamente com outros perfis geofísicos, para refinar a interpretação dos contatos geológicos. Os dados de densidade proveniente dos perfis também são utilizados nos cálculos de recursos e reservas. Antes essas estimativas eram realizadas com base em dados históricos de densidade e medidas em testemunhos. Porém, estes métodos não geravam medidas consistentes de densidade *in situ* e o método foi substituído.

Dessa forma, o campo mostra-se promissor e o aprofundamento na análise das diferentes técnicas de perfilagem geofísica é imprescindível.

Vale ressaltar ainda que, algumas vezes, os perfis geofísicos são os únicos registros petrofísicos de um furo, principalmente quando não foram testemunhados por dificuldades operacionais e/ou econômicas. Por serem passíveis de fácil arquivamento na forma de mídias digitais, funcionam como registros eficientes e duradouros, além de permitir uma reinterpretação futura de dados à luz de novos conhecimentos geológicos.

2.3.1. PERFIL DE CÁLIPER

O perfil denominado *Cáliper* fornece um registro contínuo do diâmetro interno do furo de sondagem. Mudanças do diâmetro do furo podem estar relacionadas com a litologia, fraturas e com a técnica de perfuração (Conger, 1996). Este é um perfil essencial na interpretação de outros perfis, pois muitos deles são afetados por mudanças no diâmetro do furo.

O perfil também fornece informações sobre a construção do poço, litologia e porosidade secundária, como fraturas e aberturas por dissolução. Há vários tipos diferentes de cáliper, o mais comum tem três braços, posicionados em ângulo de 120° (Figura 20).



Figura 20. Sonda Cáliper de três braços para medição do diâmetro do furo.

Na indústria do petróleo, onde as técnicas de perfilagem são usadas à exaustão, medidas de cáliper são uma importante fonte de informação, como pode ser visto na Figura 21. Sua importância em rochas metamorfisadas será objeto de estudo, mas espera-se um comportamento similar.

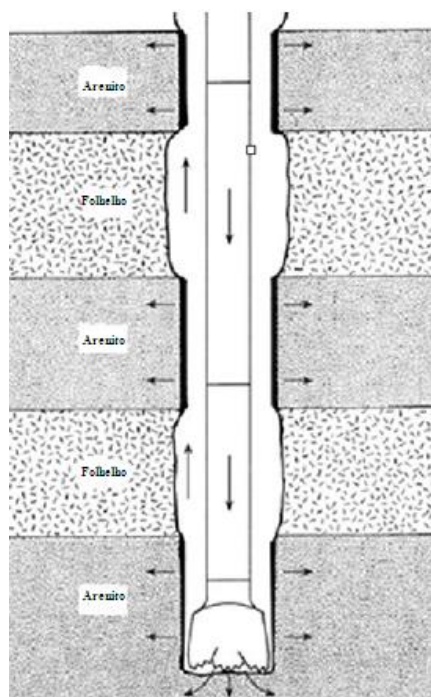


Figura 21. A medição pelo calibre fornece uma boa contribuição na interpretação de contatos litológicos, realçando as diferenças de resistência mecânica entre litologias mais ou menos competentes, mostrando, por exemplo, um maior diâmetro nos folhelhos do que nos arenitos. (Carrasquilla, 2012)

2.3.2. PERFILAGENS RADIOMÉTRICAS OU NUCLEARES

Os levantamentos radiométricos são úteis no mapeamento geológico, pois diferentes tipos de rochas podem ser reconhecidos pelo seu padrão de assinatura radioativa. Há mais de 50 isótopos radioativos de ocorrência natural, mas a maioria é rara ou fracamente radioativa. Os elementos de maior interesse na exploração radiométrica são o urânio, tório e potássio - ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K . Assim, os perfis radiométricos fazem uso da radioatividade natural produzida por esses elementos e induzida, obtida a partir do bombardeio de núcleos estáveis com raios gama ou de nêutrons (Kearey, *et al*, 2002).

Basicamente um átomo consiste de:

- Nêutrons – possuem massa e nenhuma carga elétrica
- Prótons – possuem massa e carga elétrica positiva
- Elétrons – possuem massa desprezível e carga elétrica negativa

O *número de massa* representa o número de prótons e nêutrons existentes no núcleo e o *número atômico* indica a quantidade de prótons do núcleo ou de elétrons da eletrosfera e define o tipo de elemento químico.

Elementos cujos núcleos atômicos contêm o mesmo número de prótons, mas diferentes números de nêutrons são chamados isótopos. Eles são formas do mesmo elemento com diferentes pesos atômicos. Alguns isótopos são estáveis e outros são instáveis, que podem se desintegrar espontaneamente para formar outros elementos. Essa desintegração é acompanhada pela emissão de radioatividade de três tipos possíveis:

- Partículas Alfa – de natureza positiva, possuem quatro vezes a massa do próton. Devido a sua grande massa, penetram somente algumas folhas de papel e no ar percorrem uns poucos centímetros.
- Partículas Beta – de natureza negativa, são elétrons de pequena massa e facilmente desviados pelos campos magnéticos. São paradas por uns poucos milímetros de alumínio e no ar percorrem poucos decímetros.
- Raios Gama – radiação eletromagnética de alta frequência ($> 10^{16}$ Hz) liberada de núcleos excitados durante as desintegrações. Não são desviados pelos campos magnéticos por não possuir carga elétrica. São paradas somente com vários centímetros de chumbo e no ar percorrem centenas de metros. (Figura 22)

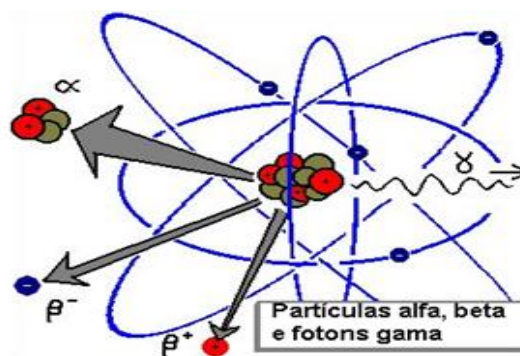


Figura 22. Esquema do decaimento radioativo devido a emissões de partículas alfa (α), beta (β) e gama (γ). (Carrasquilla, 2012).

Dos três tipos de radiações, os raios gama são utilizados pela perfilagem geofísica, devido a sua capacidade de penetração em material denso. Assim, a desintegração dos núcleos gera uma liberação de energia, chamada de decaimento radioativo, que pode levar à formação de um elemento estável ou a outro produto radioativo, o qual também pode sofrer um decaimento, num processo contínuo que só termina quando atinge um produto da desintegração que seja estável. A taxa de decaimento é exponencial e cada elemento apresenta um padrão característico, chamado de meia-vida, que pode ser definida como sendo o tempo necessário para desintegrar a metade da atividade inicial de um dado isótopo e isso pode ocorrer em frações de segundos a bilhões de anos. Por exemplo, a meia vida do ^{238}U é de cinco bilhões de anos, ou seja, a idade do planeta para que a meia-vida do ^{238}U decaia pela metade da sua atividade inicial (Carrasquilla, 2012).

O fato de as constantes de decaimento ser acuradamente conhecidas e não afetadas por condições externas como temperatura, pressão e composição química, forma a base da datação radiométrica.

Existem três séries radioativas de urânio e tório, cujos pais são ^{235}U , ^{238}U e ^{232}Th . Todos eles decaem para finalmente se estabilizar como isótopos de chumbo, passando por isótopos filhos intermediários. O urânio é detectado através da radiação gama emitida pelo bismuto (^{214}Bi) com pico em 1,76 MeV. O Tório é detectado pela radiação gama emitida pelo tálio (^{208}Tl) com pico característico em 2,62 MeV. O potássio não forma série de decaimento e cerca de 89% do ^{40}K decai por emissão de partículas beta para ^{40}Ca , e 11% para ^{40}Ar por captura K, que ocorre quando um elétron de órbita mais interna (K) penetra no núcleo. O potássio é detectado pela radiação gama de energia de 1,46 MeV (Carrasquilla, 2012) (Figura 23).

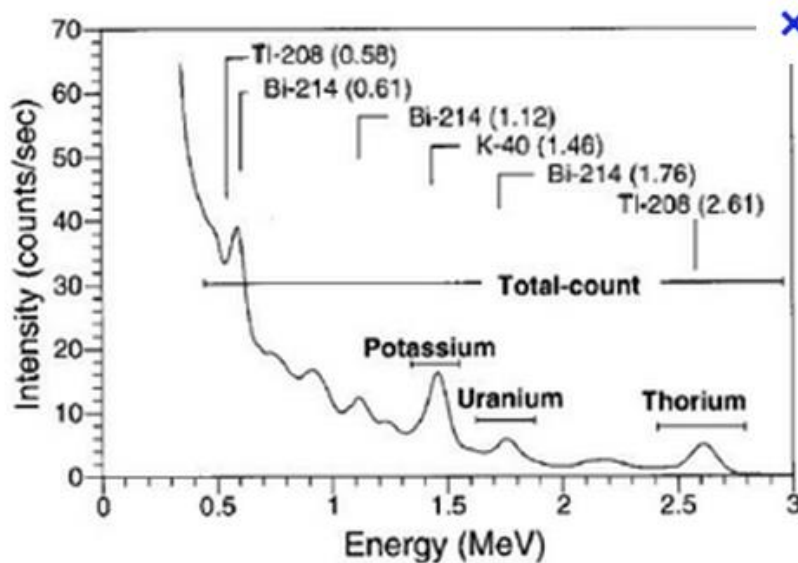


Figura 23. Curva padrão evidenciando os picos característicos de emissões de radiação gama para Potássio (1,46 MeV), Urânio (1,76 MeV) e Tório (2,62 MeV). Retirado de Minty (1997).

Desses três elementos radioativos importantes para a prospecção, o mais abundante nas rochas é o potássio, mas, em proporções variadas, os três ocorrem nas rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

De maneira geral, a distribuição do potássio, urânio e tório ocorre da seguinte forma:

- Nas rochas ígneas há uma maior concentração desses elementos nas rochas ácidas.
- Nas rochas sedimentares o urânio, devido sua elevada solubilidade, é facilmente incorporado às águas e disperso na bacia de sedimentação ou carregado com outros fragmentos e concentrando-se nos sedimentos. O tório tem pouca mobilidade, devido à baixa solubilidade, podendo penetrar na estrutura cristalina de outros minerais (zircão, apatita) ou ser carregado na forma de coloide acumulando-se em zonas de sedimentação profunda e de baixa energia, enriquecendo os sedimentos argilosos.
- Nas rochas metamórficas a radioatividade depende da concentração da rocha original, pois o metamorfismo pouco afeta as características radioativas de uma rocha (Figura 24).

| | U (ppm) | Th (ppm) | K (%) | Th/U |
|----------------------------------------------|---------|----------|-------|------|
| Ácidas (granito, granodiorito) | 3,5 | 18 | 3,3 | 5,1 |
| Intermediárias (diorito, andesito) | 1,8 | 7 | 2,3 | 4 |
| Básicas (gabro, basalto) | 0,5 | 3 | 0,8 | 6 |
| Ultrabásicas (dunito, peridotito) | 0,003 | 0,005 | 0,03 | 1,7 |

| | U (ppm) | Th (ppm) | K (%) | Th/U |
|-----------------------------------------|---------|----------|-------|------|
| Argila e folhelho | 4 | 11 | 3,2 | 2,8 |
| Arenito | 3 | 10 | 1,2 | 3,3 |
| Calcário | 1,4 | 1,8 | 0,3 | 1,3 |
| Evaporitos (halita, anidrita) | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 4 |

Figura 24. Valores médios de concentração de urânio, tório e potássio em algumas rochas ígneas (tabela superior) e sedimentares (tabela inferior). (Carrasquilla, 2012)

Levantamentos radiométricos, são apresentados na forma de perfis que fazem uso tanto da radioatividade natural ou induzida. A radioatividade em medições de furos e poços é geralmente expressa em unidades API (*American Petroleum Institute*, 1974), definidas de acordo com níveis de referência num poço de teste na Universidade de Houston, EUA (Kearey *et al.*, 2002).

Na perfilagem de furos, a radioatividade natural ajuda a separar zonas argilosas das arenosas e a radioatividade induzida atua na determinação da densidade e da porosidade das rochas. Medidas radiométricas podem também ser relacionadas com as unidades geológicas de uma área e fornecer indicações sobre os contatos geológicos (Kearey *et al.*, 2002).

2.3.3. PERFIL DE RAIOS GAMA – GAMA NATURAL

Os raios gama são ondas eletromagnéticas de alta energia (0,1 a 10 MeV) emitidas por núcleos atômicos na forma de radiação e o perfil é a medição da radioatividade natural em função da profundidade.

O princípio de medição baseia-se em detectores de radioatividade de diferentes tipos – câmara de ionização, tubo Geiger-Mueller, contador proporcional ou cintilômetro – deslocando-se a uma velocidade uniforme dentro do furo. Esses detectores são afetados principalmente 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 (Carrasquilla, 2012).

- O contador Geiger-Mueller consiste de uma câmara cilíndrica com gás inerte (como o argônio) a baixa pressão e um fio central sob alta voltagem em relação ao envoltório da câmara. A penetração dos raios gama na câmara provoca a ionização do gás, que torna-se condutor, provocando uma descarga do fio central, que após amplificada, pode ser registrada por um circuito integrado que apresenta o número de contagens por unidade de tempo. Em seguida, ocorre a desionização do gás e o restabelecimento da alta voltagem no fio central. O contador Geiger é barato e fácil de usar.
- A câmara de ionização é semelhante ao modelo anterior, porém o gás ionizável encontra-se sob alta pressão e a voltagem do fio central é baixa. Os raios gama provocam a passagem de uma fraca corrente no gás, que, devidamente amplificada, fornece uma indicação da radiação que penetra na câmara.
- O cintilômetro ou contador de cintilação baseia sua detecção no fato de que os raios gama apresentam a propriedade de produzir finas centelhas de luz ao atingirem certos tipos de cristais. Essas centelhas são convertidas em pulsos elétricos, cuja altura depende da quantidade de energia absorvida. Esse tipo de detector é muito mais eficiente que os detectores a gás porque possui uma maior massa de material (por unidade de volume) sensível à radiação. O cintilômetro é mais caro que o contador Geiger, mas é muito mais eficaz na detecção de raios gama (Figura 25).



Figura 25. Princípio do funcionamento de uma ferramenta GR (Gamma-Ray – Raios Gama), onde a radioatividade natural passa por um cintilômetro capaz de emitir fótons detectados por um amplificador, produzindo pulsos elétricos que geram o perfil. (Carrasquilla, 2012).

O efeito gerado pela presença de algum material entre a formação e o detector – lama, cimento ou revestimento – pode reduzir sensivelmente a quantidade total de raios gama nesse último, mas não descarta totalmente o valor registrado pelo perfil. Existem, todavia, correções para tais distorções (Carrasquilla, 2012).

As emissões radioativas têm natureza estatística, apresentando uma distribuição normal, isto é, o desvio padrão, observado em laboratório, é da ordem da raiz quadrada do número de desintegrações. Daí o surgimento do conceito de constante de tempo, que é o tempo, em segundos, no qual o detector realiza uma média aritmética dos fótons registrados. Portanto, qualquer contagem realizada por um detector representa uma média padronizada. A seleção entre a constante de tempo e a velocidade de perfilagem é realizada de modo a corresponder ao critério de aceitação da qualidade da leitura estatística. Resultados razoáveis podem ser obtidos com um tempo de contagem de 2 segundos e uma velocidade de subida de 0,15 m/s.

Rochas com presença de argilas tendem a apresentar maiores quantidades de elementos radioativos, em particular o ^{40}K , que ocorre em micas, feldspatos alcalinos e nos argilo-minerais, e ainda traços de ^{238}U , ^{232}Th , que produzem radiação gama detectável (Kearey et al., 2002). Em função disso, o perfil de radiação gama natural detecta muito bem a presença de argilas e folhelhos, com as formações arenosas apresentando baixos valores (Conger, 1996). (Figura 26).

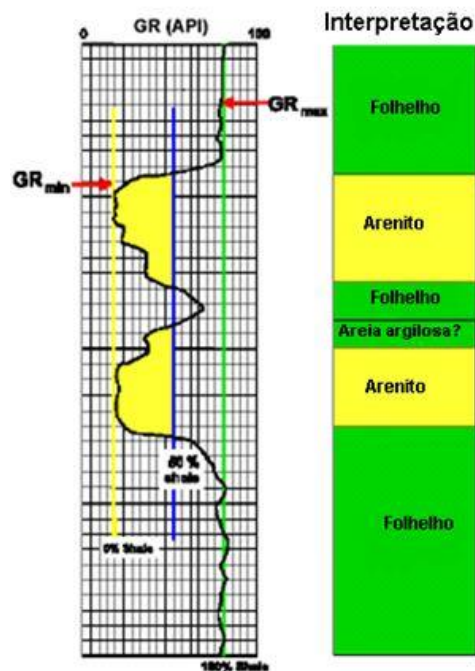


Figura 26. Exemplo de uma perfilagem de Raios-Gama mostrando a resposta de curva frente a unidades argilosas e arenosas. A figura da esquerda apresenta o perfil de raios gama (gama natural) e a figura da direita o perfil litológico interpretado, composto basicamente de folhelho e arenito (Carrasquilla, 2012).

O perfil pode ser realizado em poços abertos ou revestidos (Conger, 1996), mas a intensidade da radiação é reduzida nesse último caso. Na indústria do petróleo, é utilizado na identificação litológica, na correlação geológica, na estimativa da argilosidade, na análise dos ambientes deposicionais de bacias sedimentares e na identificação de discordâncias geológicas.

Os folhelhos são as rochas que apresentam os mais altos valores de radioatividade após os evaporitos potássicos. Para as demais rochas sedimentares importantes na indústria do petróleo – calcários, dolomitos e arenitos – a presença ou não de elementos radioativos depende de sua origem deposicional. De maneira geral, os carbonatos por terem origem a partir de organismos marinhos, tendem a registrar os menores valores de radioatividade, enquanto os dolomitos, por estarem sujeitos a águas percolantes com possibilidades de contaminações radioativas, tendem a apresentar valores superiores aos calcários. Os arenitos, quando impuros e contaminados com argila, são os que

apresentam os maiores valores de radioatividade. Do contrário, arenitos puros e sem argilas, tendem a valores bem baixos (Carrasquilla, 2012).

Nessas condições a utilização da perfilagem de raios gama natural fornece excelentes resultados, ressaltando principalmente as camadas argilosas. Rashidi, *et al.* (2009) mostram que o perfil de raios gama é utilizado, inclusive, em simulações de perfuração para se estimar o percentual de argilas e areias em função da profundidade do furo e, dessa forma, definir previamente a broca mais adequada para a perfuração.

Contudo é importante ressaltar que, de maneira geral, a variação litológica da pesquisa de petróleo é menos complexa que na pesquisa de minério de ferro.

2.3.4. PERFIL DE DENSIDADE (GAMA-GAMA)

O perfil registra as variações, em contagens por segundo, das densidades das camadas com a profundidade, pois existe uma relação entre a contribuição volumétrica de cada elemento constituinte e a densidade total da rocha. A medida de densidade total de uma rocha é realizada através do bombardeio das paredes do poço por um feixe monoenergético de raios gama através de uma fonte radioativa, geralmente ^{60}Co ou ^{137}Cs (Telford *et al.*, 1990; Kearey *et al.*, 2002).

Os fótons dos raios gama colidem “elásticamente” com os elétrons e tem sua energia reduzida, um fenômeno conhecido como *Espalhamento Compton*. O efeito Compton ocorre quando um fóton incidente colide com um elétron, sendo sua energia dividida entre a energia cinética do elétron e um fóton (raio gama) “dissipado”. O efeito é proporcional à densidade eletrônica da formação, gerando assim, uma curva de densidade.

A probabilidade de ocorrência de um choque entre os raios gama e a matéria depende das propriedades nucleares dos materiais envolvidos e da energia do fóton. Quanto maior a seção eficaz (diâmetro aparente de um núcleo a ser atingido) maior a probabilidade de uma interação se realizar. Os raios gama ao sair da fonte chocam-se sucessivamente com os elétrons das formações, o que faz com que percam intensidade e, portanto, quanto mais denso o meio, maior a absorção dos raios gama e menor a contagem no detector (Carrasquilla, 2012).

O levantamento de campo é realizado a partir de uma sonda, com um patim que sulca o reboco, sendo pressionada contra a parede do furo a partir de uma mola. A maior parte do espalhamento ocorre numa faixa de 75 mm a partir da sonda. Versões modernas utilizam espaçamentos longos e curtos para os detectores, os quais são sensíveis ao material mais distante e próximo da sonda (Figura 27), eliminando-se, dessa forma, o efeito do reboco. A porosidade pode ser estimada a partir das medidas de densidade (Kearey *et al.*, 2002), após uma etapa de correção do efeito de reboco do furo.

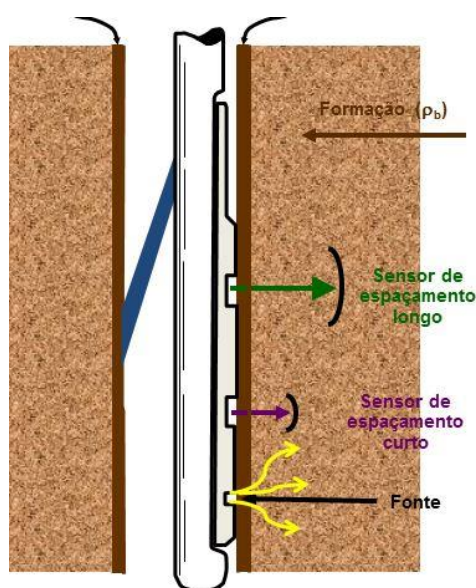


Figura 27. Perfil de densidade, evidenciando o acoplamento da ferramenta com as paredes do furo para melhor leitura e a localização da fonte e dos sensores de espaçamento curto e longo (Carrasquilla, 2012).

Como o efeito Compton é diretamente proporcional ao número de elétrons por unidade de volume da matéria (densidade eletrônica) e como o número de elétrons por unidade de volume é proporcional à densidade (massa/volume) da rocha, deduz-se que este perfil responde diretamente à densidade da formação e inversamente à sua porosidade.

A obtenção do peso específico (densidade) é uma variável de extrema importância na indústria do minério de ferro, pois as estimativas de recursos de um depósito são inicialmente realizadas sobre o volume (em metros cúbicos) e posteriormente, com base

nos valores de densidade, em toneladas. Todos os cálculos estruturais de engenharia, beneficiamento, logística e comercialização são também realizados com base em toneladas. Assim, valores confiáveis de densidade são fundamentais para a quantificação da jazida.

O perfil geofísico gama-gama avalia a densidade a partir da leitura de valores de contagens por segundo, posteriormente convertidas para densidade, com taxas de aquisição variáveis, sendo a mais comum, com espaçamento centimétrico, exprimindo os dados na forma de uma curva e, dessa forma, sendo bastante sensível a pequenas alterações de densidade locais. É utilizado um tratamento estatístico dos dados para a determinação de um valor único de densidade para cada litologia atravessada.

2.3.5. PERFIL DE NÊUTRONS OU PERFIL NEUTRÔNICO

Os *nêutrons* são partículas destituídas de carga elétrica e mesma massa do átomo de hidrogênio. Sendo partículas neutras e muito pequenas, podem penetrar profundamente na matéria, interagindo com os núcleos dos elementos que compõem as rochas de forma elástica ou inelástica.

Uma fonte radioativa emite continuamente nêutrons de alta energia (~ 4,5 MeV) e, diferentemente do perfil de densidade, onde o princípio de medição baseia-se na perda de energia dos raios-gama artificiais por meio de choques com elétrons orbitais, o perfil de nêutrons baseia-se no choque de nêutrons artificiais com os núcleos dos elementos presentes nas rochas. A maior parte desses núcleos tem massa muito maior que a dos nêutrons, que retornam elasticamente com muito pouca perda de energia cinética. Entretanto, um íon de hidrogênio tem praticamente a mesma massa que um nêutron e, assim, a colisão transfere considerável energia cinética, tornando o nêutron lento a ponto de ser absorvido por um núcleo maior. Dessa forma, a velocidade da perda de energia é proporcional à quantidade de hidrogênios da formação rochosa e à medida que perdem energia, os nêutrons mudam de estágio, passando por *epitermal* – 100 a 0,025 eV – e *termal* – abaixo de 0,025 eV – quando então se dispersam sem ordem e sem perder energia, até que uma parte da qual colide com o cintilômetro (Carrasquilla, 2012) (Figura 28).

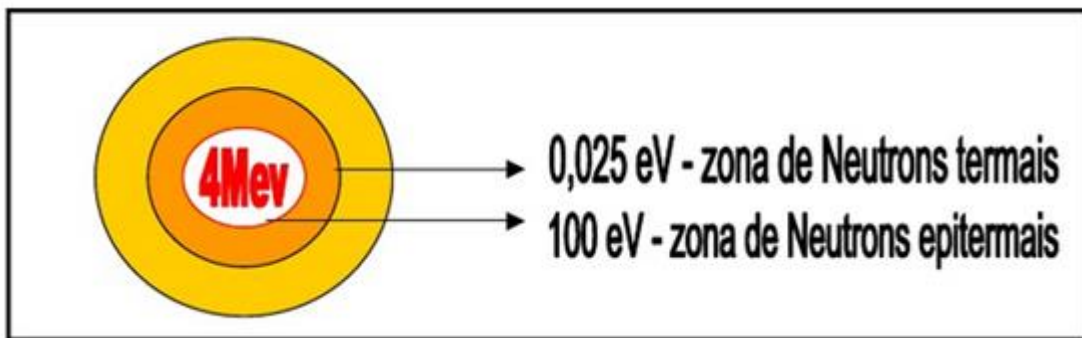


Figura 28. Estágios de energia do nêutron (Carrasquilla, 2012).

A ferramenta é composta por uma fonte de material radioativo – plutônio (Pu) ou Amerício (Am) – em contato com um outro elemento que tenha seus nêutrons fracamente unidos, como o berílio (Be). As partículas “alfa”, produzidas pelo plutônio ou amerício colidindo com os núcleos de berílio expulsam do mesmo, alguns nêutrons. Quanto maior a energia das partículas alfa, maior será a energia dos nêutrons expulsos. Além da fonte e uma distância fixa, tem-se um cintilômetro.

Assim, a ferramenta mede a quantidade de nêutrons termiais, que é inversamente proporcional à concentração de hidrogênio na rocha. Os nêutrons identificam as partículas de hidrogênio independentemente do local onde elas estejam alojadas, nas moléculas de óleo, gás, água livre (nos poros das rochas), nas águas adsorvidas nos argilominerais, ou ainda, nas águas de cristalização, como na goethita (Fe(OH)_n) ou chamosita (Rider, 2002) (Figura 29).

O levantamento neutrônico é usado na identificação da litologia, na identificação de óleo leve e gás e, principalmente, para avaliar a porosidade das rochas saturadas com base na quantidade de hidrogênio presente na formação rochosa.

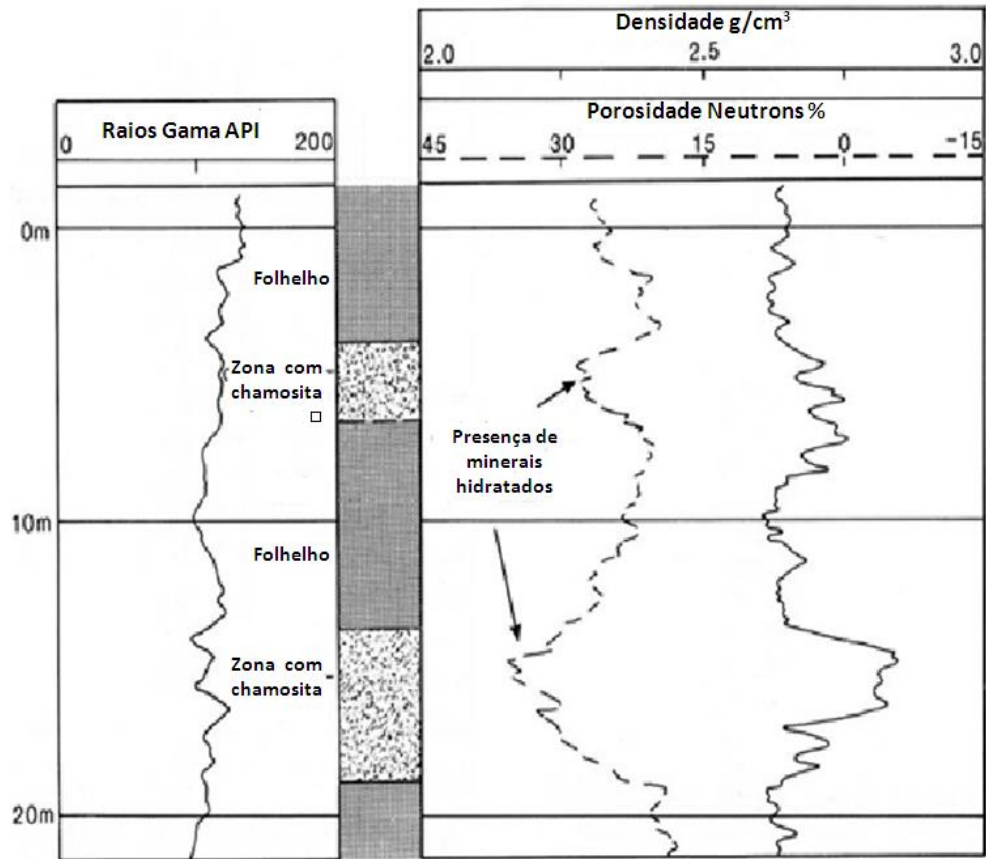


Figura 29. A presença da Chamosita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), um mineral de ferro hidratado, causa alterações no perfil de nêutrons (Adaptada de Rider, 2002).

Em rochas sedimentares tais como arenitos e calcários, os íons de hidrogênio estão localizados nos fluidos dos poros, de forma que a concentração desses íons é inteiramente dependente da porosidade (Kearey *et al.*, 2002). As porosidades em folhelhos podem não ser porosidades verdadeiras, pois hidróxidos em argilas e micas produzirão altas porosidades aparentes. Com o aumento da profundidade e compressão dos estratos, os folhelhos perderão água levando a um decréscimo da porosidade. As respostas em carvão serão altas devido à presença de hidrocarbonetos, dependendo da qualidade do carvão. Leituras em rochas ígneas e metamórficas não refletem as porosidades verdadeiras devido aos seus componentes químicos – hidrogênio é medido não apenas em espaços porosos, mas em hidróxidos como hornblenda, biotita e muscovita.

Consequentemente, é prudente a identificação prévia da litologia por outros métodos, antes que estimativas de porosidade sejam efetuadas. O método pode ser usado em poço aberto ou revestido e o perfil é apresentado em percentuais de porosidade.

2.3.6. PERFIL ACÚSTICO OU SÔNICO

Representa uma série de perfis que investigam as velocidades de propagação de ondas de deformação de um meio elástico. O nome *sônico* provém do perfil de ondas *P* que correspondem à onda sonora. Eles medem a velocidade das ondas sísmicas nas rochas ao longo das paredes do furo, a partir da determinação do tempo de trânsito dessas ondas.

A sonda normalmente contém um ou dois pares de receptores, distanciados cerca de 300 mm, e uma fonte acústica a uns 900-1500 mm do receptor mais próximo, emitindo pulsos ultrassônicos a uma frequência baixa de 20-40 kHz (Kearey *et al.*, 2002). Os pulsos emitidos ativam os receptores em tempos diferentes, e o diferencial nesses tempos pode ser medido (tempo de trânsito) em *microsegundos por pé* de rocha (ms/ft). O tempo de trânsito tem como recíproca a velocidade, que pode ser expressa em *pés por segundo* (ft/s) ou *metros por segundo* (m/s).

Esse tipo de sonda resulta em comprimentos de transmissão que levam a uma penetração de somente uns poucos centímetros na rocha e permitem a discriminação de camadas de somente uns poucos decímetros de espessura. Contudo, são grandemente afetadas por danos feitos pela perfuração à parede do furo e para superar isso, aumenta-se o tamanho da ferramenta em função de um maior espaçamento entre os receptores (Carrasquilla, 2012).

Os transmissores e receptores consistem de transdutores feitos de cristais, cerâmica ou bobinas magnéticas. Eles têm a função de produzir uma deformação mecânica em resposta a um sinal elétrico (transmissor) ou produzir um sinal elétrico quando ele deforma (receptor).

Se a sonda estiver num furo inclinado ou se o diâmetro apresentar variações, isso resulta em diferenças no comprimento das trajetórias das ondas sísmicas e esse problema pode ser contornado com a utilização de uma segunda fonte emissora, de forma que o efeito

da inclinação e variações consideráveis no diâmetro são compensadas quando todas as quatro trajetórias forem consideradas no tratamento dos dados, fornecendo um *Perfil Compensado de Furo* ou BHC (*Bore Hole Compensated*) – (Figura 30).

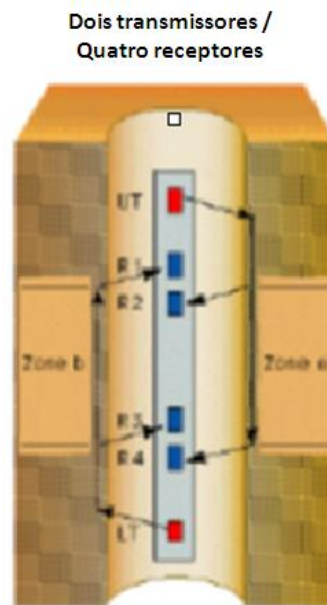


Figura 30. Dois transmissores (T) e dois pares de receptores (R1 a R4) permitem medidas precisas independente da inclinação do furo e de variações no diâmetro; esse perfil é denominado de Perfil Compensado (Carrasquilla, 2012).

A velocidade do som varia em função do meio pelo qual se propaga, sendo maior com o aumento da densidade do meio e, velocidade de propagação maior, significa tempo menor. Assim, o tempo gasto por uma onda sonora nos sólidos, para percorrer uma mesma distância fixa, é bem menor que nos líquidos e gases.

Ao se considerar duas rochas semelhantes, a que tiver maior porosidade apresentará um tempo de trânsito maior do que a de menor porosidade; conseqüentemente, há uma relação direta entre o perfil sônico e a porosidade da rocha.

A porosidade pode ser estimada a partir das medições sônicas, a velocidade na rocha pode ser determinada em amostras do furo e nos fluidos a partir de valores padrão (Kearey, et al. 2002). O método auxilia também na interpretação litológica, na identificação de fraturas e descontinuidades e no levantamento de propriedades mecânicas das rochas.

2.3.7. PERFILAGEM DE TEMPERATURA

O perfil de temperatura fornece um registro contínuo da variação vertical da temperatura da água/fluido dentro do furo (Conger, 1996). Os gradientes de temperatura podem ser medidos através de uma seção do furo, utilizando-se de uma ferramenta com um determinado número de termotransmissores pouco espaçados.

Os gradientes até cerca de 20 m da superfície são fortemente afetados por mudanças diurnas e sazonais no grau de insolação e não fornecem estimativas razoáveis do fluxo de calor. Estratos porosos podem também influenciar fortemente o gradiente de temperatura, pelo fato de que fluidos contidos nos poros funcionam como um absorvedor térmico (Carrasquilla, 2012). Medições do fluxo de calor são uma importante ferramenta na prospecção de fontes de energia térmica (Figura 31).

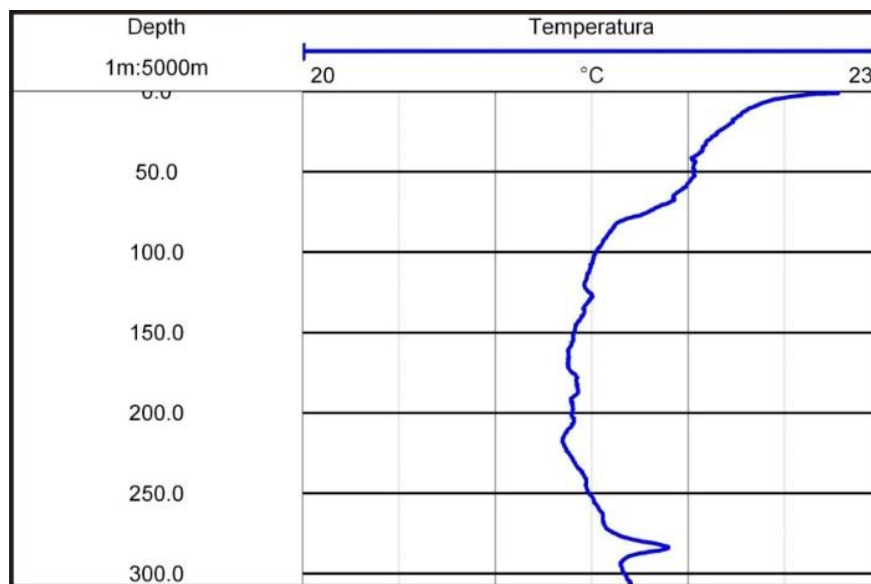


Figura 31. Perfil de temperatura, mostrando sua variação em função da profundidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. A PESQUISA DO MINÉRIO DE FERRO

Na pesquisa de qualquer bem mineral, o ponto chave para uma boa interpretação geológica é a formação de um banco de dados consistente e confiável, pois quanto mais robusta for essa etapa, melhor será o resultado da interpretação e menor será o risco do empreendimento, tanto no aspecto técnico quanto econômico.

O objetivo central de uma investigação geológica é a delimitação espacial de unidades mineralizáveis, com determinação do volume do corpo e de suas características químicas, físicas e, se possível, econômicas (Grossi Sad e Valente, 2007).

Trabalhos básicos de mapeamento geológico com coletas de amostras para estudos químicos e geoquímicos, aliados a análises de imageamentos e cartas topográficas, são algumas das técnicas utilizadas na identificação primária de depósitos minerais. Assim, pode-se definir um *depósito mineral* como sendo a ocorrência de um corpo geológico espacialmente delimitado, explotável e que seja economicamente viável.

Técnicas de aerolevantamentos geofísicos – magnetométricos, gravimétricos e mais recentemente de gradiometria da gravidade – são exemplos de importantes ferramentas na prospecção de grandes depósitos minerais, principalmente de formação ferrífera, cobrindo extensas áreas com uma relação custo/benefício satisfatória.

Com relação à pesquisa de subsuperfície, existem várias técnicas de investigação, mas basicamente podem ser subdivididas em dois grandes grupos:

- Dados obtidos de forma direta, que permitem o acesso ao material investigado, seja na superfície ou através de amostras de sondagem. A utilização de equipamentos específicos para a realização de furos de sonda representa o método tradicional de investigação de subsuperfície. Essa sondagem pode ser subdividida em dois tipos básicos: testemunhada ou destrutiva (Figura 32);
- Dados obtidos de forma indireta, referindo-se aos métodos onde não é possível o acesso ao material investigado. Portanto, utilizam-se metodologias alternativas

para se atingir o objetivo. Dentre elas, destacam-se as metodologias geofísicas e mais especificamente, a perfilagem geofísica de furos.

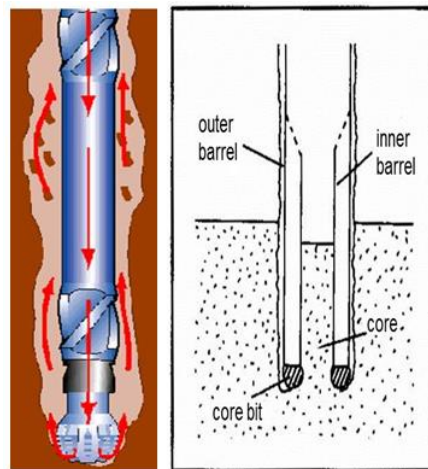


Figura 32. Dados diretos: Sondagem rotoperfuração não testemunhada (esquerda) e sondagem convencional testemunhada (direita), onde o material atravessado é coletado pelo barrilete (Carrasquilla, 2012).

Com relação às técnicas de perfuração com amostragem direta, cada uma delas apresenta suas próprias características, mas em geral é um investimento de risco:

- A sondagem testemunhada, devido ao seu próprio caráter, tem no testemunho de sondagem sua maior importância, representando um registro fiel do material atravessado pela coluna de perfuração. É vital na realização de ensaios físicos e químicos, além de ser muito útil na identificação de descontinuidades rochosas. Contudo o método apresenta uma evolução lenta com relação ao avanço da perfuração, pois após alguns metros perfurados, toda a coluna de perfuração precisa ser retirada para a coleta do testemunho e à medida que o furo se aprofunda maior será esse tempo.
- A sondagem rotoperfuração, tem como característica principal, a destruição do material atravessado durante o avanço da perfuração, que é carregado para a superfície pela injeção de fluido (ar comprimido ou lama) através da coluna de perfuração. Todas as litologias atravessadas chegam à superfície em forma de um material fino misturado com pedregulhos, onde não se tem um controle

exato da localização dos corpos e contatos litológicos. Materiais de densidades diferentes poderão chegar à superfície juntos, apesar de cortados em diferentes profundidades. Contudo, é uma técnica muito utilizada na prospecção quando não se tem muita rigidez com relação à localização espacial das unidades litológicas e por ser rápida e barata.

Técnicas de obtenção direta e indireta de dados são ferramentas complementares (Kearey *et al.*, 2002) e, na medida do possível, o ideal é a utilização de ambas as metodologias, explorando suas aplicabilidades como forma de minimizar custos e tempo na obtenção de dados e é nesse aspecto que a perfilagem geofísica cresce em importância.

3.2. FASES DA PESQUISA GEOLÓGICA

No caso específico da pesquisa de minério de ferro e após a identificação de um possível depósito, inicia-se a fase de quantificação e qualificação da jazida. Essa etapa pode ser subdividida, basicamente, em duas fases:

- Fase de Recursos – representa a pesquisa inicial, onde a malha de sondagem é mais aberta, exploratória e investigativa, possuindo um caráter quantitativo e de definição dos limites dos corpos. Nessa fase os dados devem exprimir a potencialidade do depósito, onde o desejável é a geração de dados de forma rápida, barata, mas com a melhor precisão possível, buscando maximizar a relação custo/benefício, visto que o depósito pode não ser economicamente viável.
- Fase de Reserva – com o depósito sendo viável, inicia-se a pesquisa em malha de sondagem fechada, com foco na elaboração de modelos granuloquímicos precisos, que irão suportar as subsequentes atividades de estudos para geração de cava e planejamento de lavra, possuindo um caráter mais qualitativo.

3.3. O CAMPO DE CALIBRAÇÃO GAMA-GAMA

Como discutido anteriormente, a determinação precisa de valores da densidade é de suma importância para a indústria do minério de ferro. Operações de perfilagem geofísica para determinação de densidades *in situ* envolvem condicionantes sobre as quais dificilmente tem-se um controle efetivo e diversos parâmetros, tais como, porosidade, variações no diâmetro do furo e consequente resposta no acoplamento da ferramenta com as paredes do furo, controle geológico das camadas, variações na composição mineralógica numa mesma unidade litológica, diferentes níveis de compactidade e imprecisões na descrição dos testemunhos de sondagem, são alguns exemplos de variáveis que interferem nos resultados (Oliveira *et al.*, 2011).

Com base nessas dificuldades, a Vale desenvolveu um recurso técnico visando um controle sobre os dados de determinação da densidade, o *Campo de Aferição Gama-Gama*. O *campo* constitui-se numa torre metálica, que abriga um poço de provas estratificado com intervalos 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 33).



Figura 33. Campo de Aferição Gama-Gama construído pela Vale com certificação do IPT.

Assim, com o objetivo de simular uma perfuração, foram construídos quatro blocos cilíndricos com altura de um metro e com um furo central, simulando as dimensões de um furo HQ (96,3 mm), por onde é possível descer a ferramenta gama-gama para verificar a aferição do equipamento (Figura 34).



Figura 34. Posicionamento do bloco de base na torre, à esquerda e à direita, com detalhe do furo no centro do bloco por onde descera a ferramenta de perfilagem gama-gama.

A construção de corpos com densidades distintas e controladas que servem de base para essa calibração foi realizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), nas dependências da VALE (IPT, 2011). A composição de cada bloco e respectivas densidades é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Densidade e composição de cada bloco do campo de calibragem. (IPT, 2011)

| Bloco | Densidade (kg/m³) | Composição |
|--------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1 | 4500 | 3 tipos de minérios de ferro + cimento + água |
| 2 | 3500 | 3 tipos de minérios de ferro + brita + cimento + água |
| 3 | 2500 | 1 tipo de minério de ferro + brita + cimento + água |
| 4 | 1500 | Areia + cimento + água + isopor |

O bloco de maior densidade situa-se na base do poço de provas, obedecendo uma ordem, com o bloco de menor densidade, no topo do campo (Figura 35).

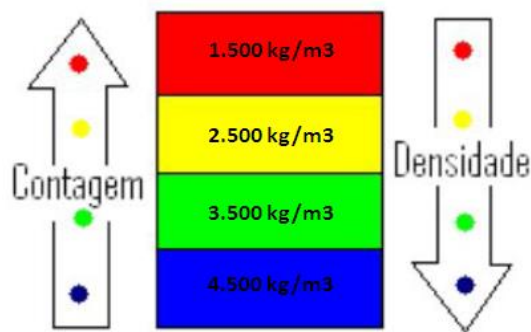


Figura 35. Disposição dos blocos por densidade *versus* contagem.

Após a conclusão do campo, foram realizados testes para medir a acurácia do sistema na medição da densidade *in situ*. As ferramentas utilizadas nos levantamentos foram do tipo *slimline* que operam em furos com diâmetros entre 10 cm e 20 cm. O conjunto de ferramentas utilizadas foi o DD6, da empresa Weatherford, que inclui uma fonte radioativa de Cs¹³⁷, com um detector de partículas em uma faixa de energia definida, acoplada a uma ferramenta cáliper, para controle do diâmetro dos furos e acoplamento da ferramenta à parede do furo.

Com base no princípio físico que rege a interação da fonte radioativa com os materiais atravessados, espera-se que, para os blocos de maior densidade haja maior resistência à penetração da radiação gama por parte do material perfilado, resultando em valores de contagem de chegadas menor, ao passo que, para os blocos de menor densidade, onde a massa contida no mesmo volume é menor, espera-se um valor maior de chegadas, portanto uma contagem maior.

As emissões são medidas em contagens por segundo (cps) e não dependem exclusivamente da densidade, tendo relação direta com a estrutura atômica dos materiais, e os valores de densidade definidos para cada bloco com base na perfilagem *gama-gama*, deve contar com uma quantidade representativa de medidas para que seja possível associar contagens com densidade aparente com uma margem de aproximação aceitável.

Os resultados dos testes realizados se mostraram satisfatórios, indicando boa concordância entre os valores medidos pela ferramenta de perfilagem gama-gama e os valores nominais de cada bloco do campo de aferição (Figura 36).

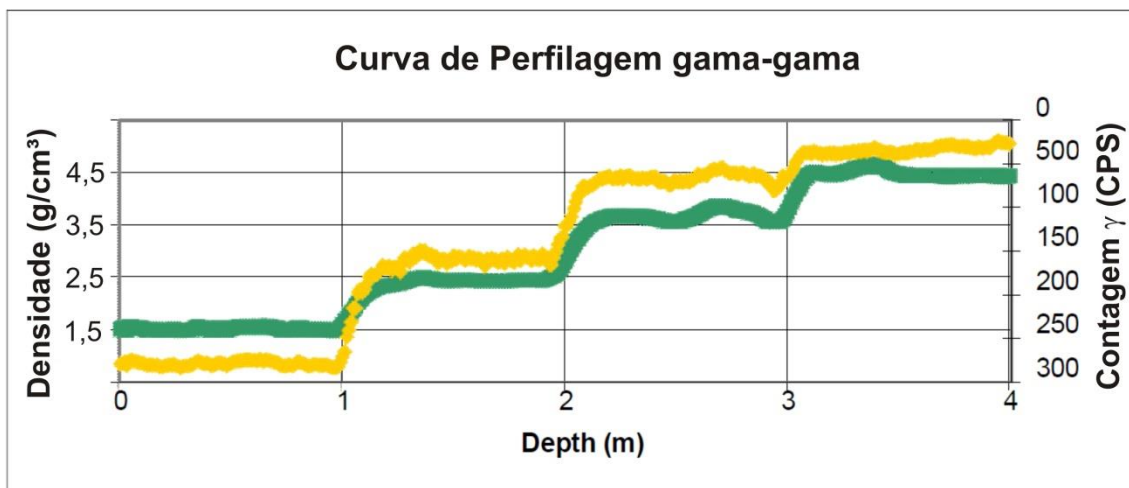


Figura 36. Aferição da ferramenta de perfilagem gama-gama, com a curva amarela indicando a contagem e curva verde o valor da densidade medido (Pereira, 2012).

3.4. INSTRUMENTAÇÃO PARA PERFILAGEM GEOFÍSICA DE CAMPO

Com relação à instrumentação necessária para a perfilagem de furo, basicamente é composta por um sistema composto por uma haste tubular de metal cilíndrico conhecido como *sonda*, com diâmetro variando entre 40 e 60 mm e com 1,5 a 3 m de comprimento. As sondas ficam suspensas no poço por um cabo blindado multinúcleo e baixadas até a base do furo, sendo feito o registro enquanto a sonda é içada de volta através da seção. O tempo para o levantamento de dados pode ser estimado entre 3 a 5 m/s. Os dados da perfilagem são armazenados numa central computadorizada para posterior processamento (Figura 37). A instrumentação de superfície, incluindo registradores, polias de cabo e guinchos, é instalada num caminhão localizado próximo à boca do furo. Um conjunto típico de perfilagem para pequenas profundidades, até por volta de 200m, pesa em torno de 200 kg.

As sondas geralmente contêm combinações de sensores que não interferem uns com os outros, gerando condições de levantamento de um amplo conjunto de perfis geofísicos numa única operação de perfilagem.

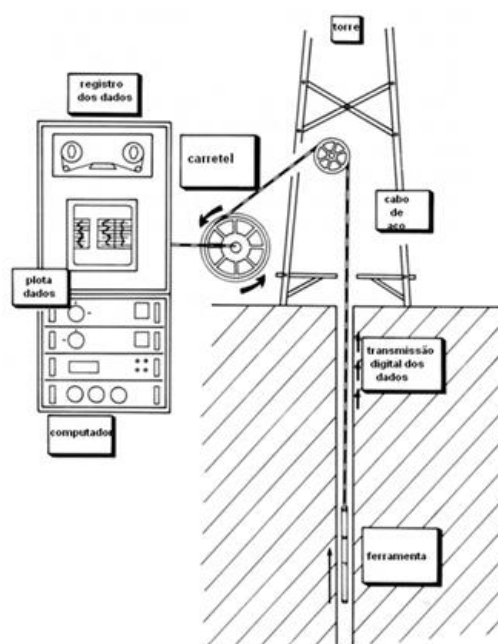


Figura 37. Esquema de obtenção de dados do furo (Carrasquilla, 2012). O conjunto de perfilagem, com polias e guincho instalados num veículo apropriado, é sustentado por um cabo multinúcleo blindado, conectado a uma central computadorizada de captura e registro de dados.

A Figura 38 mostra a Unidade de Perfilagem Geofísica – UPG – utilizada no levantamento de campo, consistindo num veículo contendo a sonda, o guincho para a descida da sonda e uma central computadorizada para leitura e armazenamento digital de dados, além dos procedimentos iniciais de descida do conjunto de perfilagem. A metodologia de perfilagem é sempre realizada com a descida do conjunto de ferramentas até o final do furo, com as leituras sendo realizadas na subida do conjunto. Isso ocorre em função do calíper, que ficaria preso nas rugosidades do furo caso descesse aberto.



Unidade de Perfilagem Geofísica - UPG



Detalhe da UPG



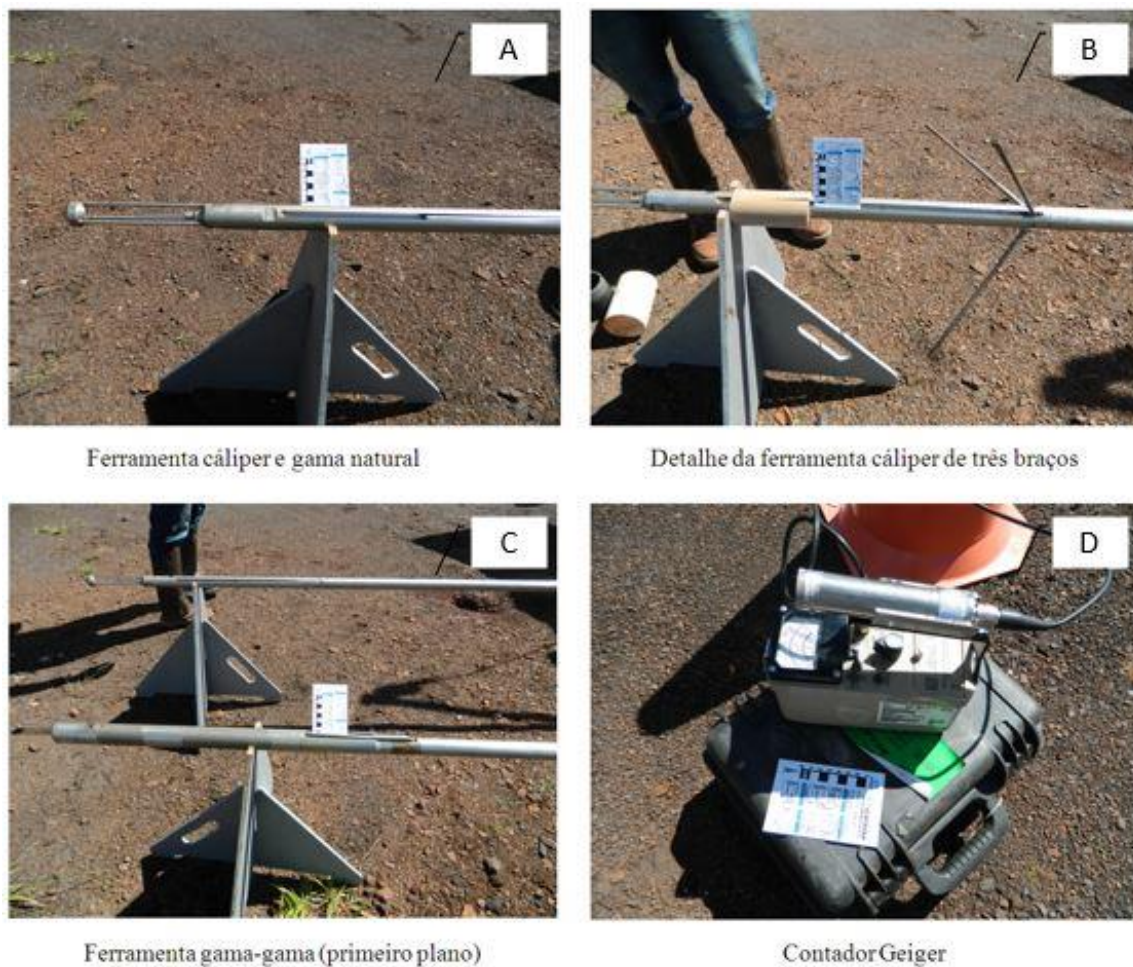
Descida do conjunto de ferramentas de perfilagem



Perfilagem geofísica do furo

Figura 38. Unidade de Perfilagem Geofísica – UPG – na Mina de Capanema (A). Detalhe da UPG com localização do guincho e roldanas (B). Início da descida do conjunto de ferramentas de perfilagem geofísica (C). Perfilagem do furo em andamento (D).

A Figura 39 mostra alguns detalhes das ferramentas de perfilagem – calíper de três braços fechado e aberto, gama natural e gama-gama – além do Contador Geiger utilizado para monitoramento de emissão de radioatividade.



Ferramenta cáliper e gama natural

Detalhe da ferramenta cáliper de três braços

Ferramenta gama-gama (primeiro plano)

Contador Geiger

Figura 39. Ferramentas de perfilagem. Sensor de gama natural e cáliper fechado (A). Detalhe do cáliper de três braços aberto (B). Sensor de densidade gama-gama em primeiro plano (C). Contador Geiger para monitoramento da radioatividade na frente de trabalho (D).

A Mina de Capanema foi escolhida para a realização desse trabalho em função de estar com as operações paralisadas e com desenvolvimento de uma campanha de pesquisa visando reavaliação do potencial de minério remanescente, com programação de sondagem em torno de 30 mil metros. A mina fornece condições controladas para estudos, pois permite a livre escolha de pontos específicos para sondagem sem impactar em operações de lavra.

Toda a campanha programada foi testemunhada, com realização de perfilagens de raios gama natural, gama-gama (densidade), além do levantamento do cáliper. A título de

teste para avaliação do desempenho na pesquisa de minério de ferro, também foram realizadas perfilagens sônica e de nêutrons em alguns furos pré-selecionados.

Os levantamentos de campo – perfilagens – foram realizados por empresa especializada, que fez o tratamento dos dados brutos, entregando arquivos digitais dos perfis na forma de curvas. Esses arquivos foram analisados em detalhe, utilizando-se do *software* WellCad, fazendo-se o cruzamento dos dados geofísicos com os testemunhos de sondagem, suas respectivas descrições e análises laboratoriais – físicas e químicas.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE DADOS

4.1. ANÁLISE COMPARATIVA

O trabalho consistiu na escolha de alguns furos de sonda onde foram comparados os dados obtidos na amostragem direta – testemunhada – com aqueles obtidos indiretamente, através da perfilagem geofísica (Figura 40).

Dessa forma, o estudo iniciou-se com a comparação das respostas da perfilagem frente às descrições litológicas dos testemunhos, suas respectivas análises químicas e físicas, e às seções geológicas interpretadas, na mesma profundidade.

Utilizando-se todas essas informações, foi realizado um cruzamento de dados, procurando avaliar as causas para variações expressivas dos dados de perfilagem, como também avaliar a assinatura na perfilagem frente às mudanças composicionais e/ou texturais dos testemunhos. Eventualmente, em função da escala das curvas, fez-se necessária a utilização do *software* WellCad na aplicação de maior detalhamento em algumas porções das curvas, a fim de melhorar as condições para interpretação.

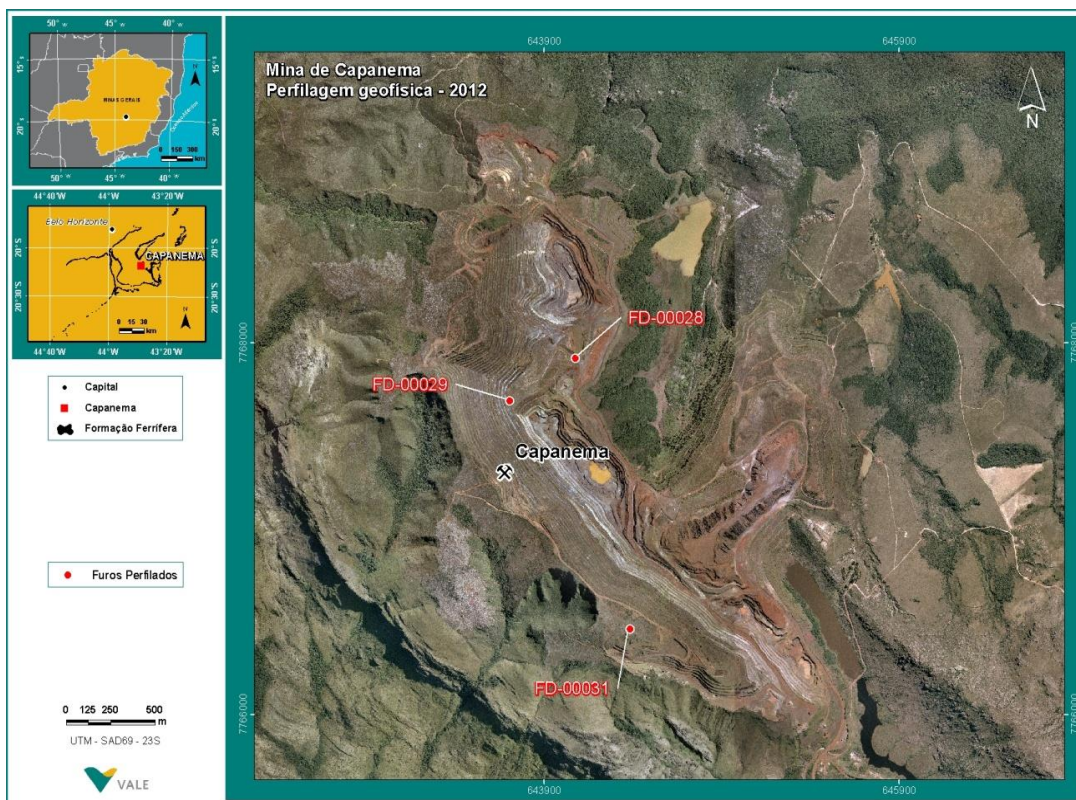
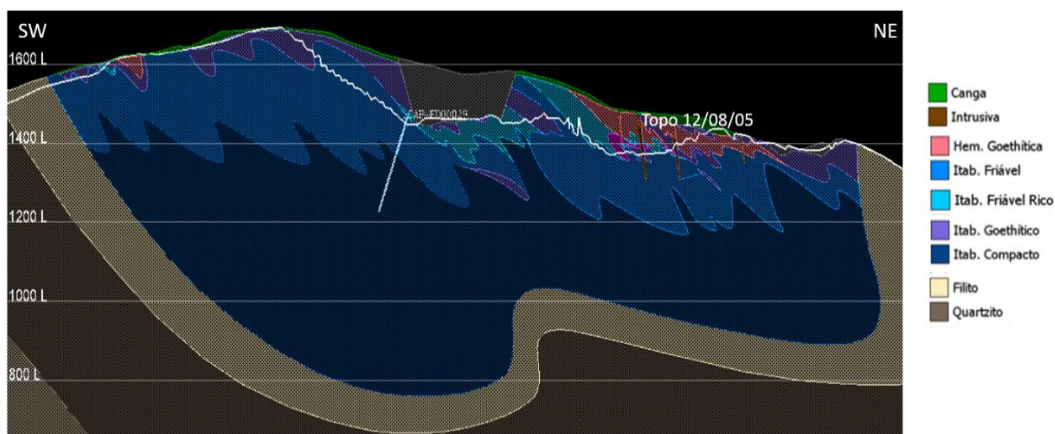


Figura 40. Imagem aérea da Mina de Capanema evidenciando a localização dos três furos de sonda estudados.

Como o banco de dados de sondagem em Capanema é bastante expressivo, tem-se disponível o modelo geológico da mina com a interpretação das seções dos furos em análise, auxiliando na compreensão do contexto regional.

4.2. ANÁLISE DO FURO FD-29

De acordo com a descrição geológica, o furo FD-29 atravessou um aterro até os 12m, passando para um itabirito friável até a profundidade de 86,40m, gradando para itabirito compacto até o final. Ao longo de todo o furo, os itabiritos mostraram-se pouco hidratados, com variações na granulometria e na compactidade, variando de friável a compacto, com eventuais passagens argilosas. O furo atingiu a profundidade final de 252,90 m. A Figura 41 traz uma seção geológica com a interpretação do furo FD-29.



FD-29

Figura 41. Seção geológica interpretada do furo FD-29.

Com relação aos dados indiretos, o furo foi perfilado por um conjunto de ferramentas composto pelo levantamento de gama natural, gama-gama (densidade), nêutrons, sônico, temperatura e cáliper. Não foi possível a perfilagem em toda a perfuração, devido ao trancamento do furo em 133 m e conseqüente obstrução à passagem da sonda.

Na análise dos dados foi possível a identificação de algumas divergências entre os registros da sondagem e da perfilagem. O primeiro contato descrito em 12 m – entre o aterro e o itabirito (Figura 42) – na verdade parece estar em torno de 10 m, como evidenciado pela queda brusca no registro do perfil de gama natural (Figura 44 (A)), que deixou bem registrado o contato entre o material argiloso (aterro) e outro arenoso (itabirito). O registro dos dados da densidade também mostra uma alteração no padrão na profundidade a partir de 10 m, com aumento do valor médio e diminuição do desvio-padrão, evidenciado pela redução da amplitude da curva (Figura 44 (A)).

Dessa forma, a análise dos registros da perfilagem sugere haver uma defasagem aproximada de 2 m, em relação ao registro da sondagem, mostrando-se uma ferramenta útil para a realização de um ajuste fino na descrição do testemunho, com melhor determinação e controle sobre a profundidade.



Figura 42. Testemunhos do furo FD-29 mostrando o contato entre o aterro (material amarronzado e mais argiloso na parte esquerda da foto) e itabirito (mais arenoso e de cor acinzentada, do centro para a direita da foto).

Outro fator que sugere essa defasagem entre os dois registros é a predominância de material argiloso até a profundidade de 6 m (Figura 43), sendo que o pico máximo de argilosidade no perfil de gama natural ocorre em torno de 4 m (Figura 44 (B)). A partir daí, ocorre uma diminuição gradual e progressiva na concentração de argilas até o contato com o itabirito silicoso.

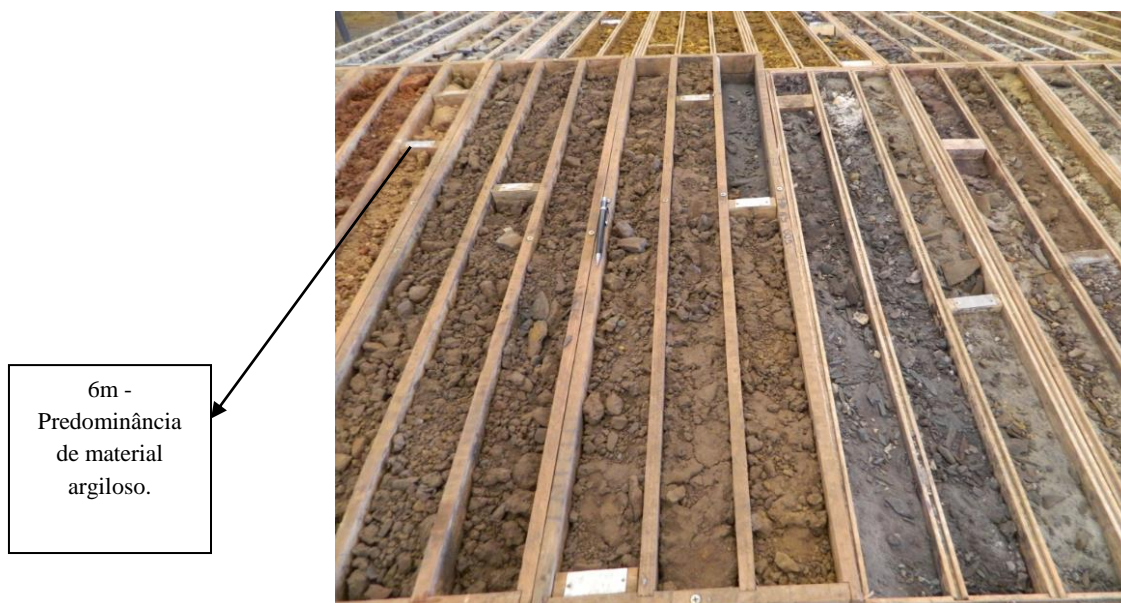


Figura 43. Testemunhos do furo FD-29 mostrando o material descrito como aterro, predominantemente argiloso até 6 m (canto superior esquerdo da foto e de coloração vermelho amarelada), com progressiva redução no percentual de argilas (na região central da foto e de coloração mais amarronzada) até o contato com o itabirito em 12 m (material acinzentado na porção direita da foto).

Outra observação no cruzamento das informações refere-se ao aumento do diâmetro do furo entre 4 e 5 m evidenciado no perfil do cáliper, coincidindo com o pico na argilosidade registrado na curva do gama natural, refletindo, dessa forma, uma porção mais argilosa e menos consistente do aterro, que originou o desmoronamento das paredes do furo nessa profundidade (Figura 44 (C)).

A Figura 44 (D) mostra ainda um detalhe dos perfis gama natural, densidade e nêutrons, mostrando uma concordância das informações, ou seja, o aumento da porosidade indicado na curva de nêutrons reflete numa queda da densidade, que coincide com aumento do percentual de argilas no aterro. Essa particularidade acontece pelo fato de se tratar de uma área de aterro, formada por material relativamente inconsolidado, pois se fosse rocha, o comportamento poderia ser diferente.

A partir do contato da base do aterro, inicia-se, segundo a descrição geológica, um pacote de itabirito friável. Comparando-se os registros de cáliper e densidade, percebem-se alguns nuances significativos.

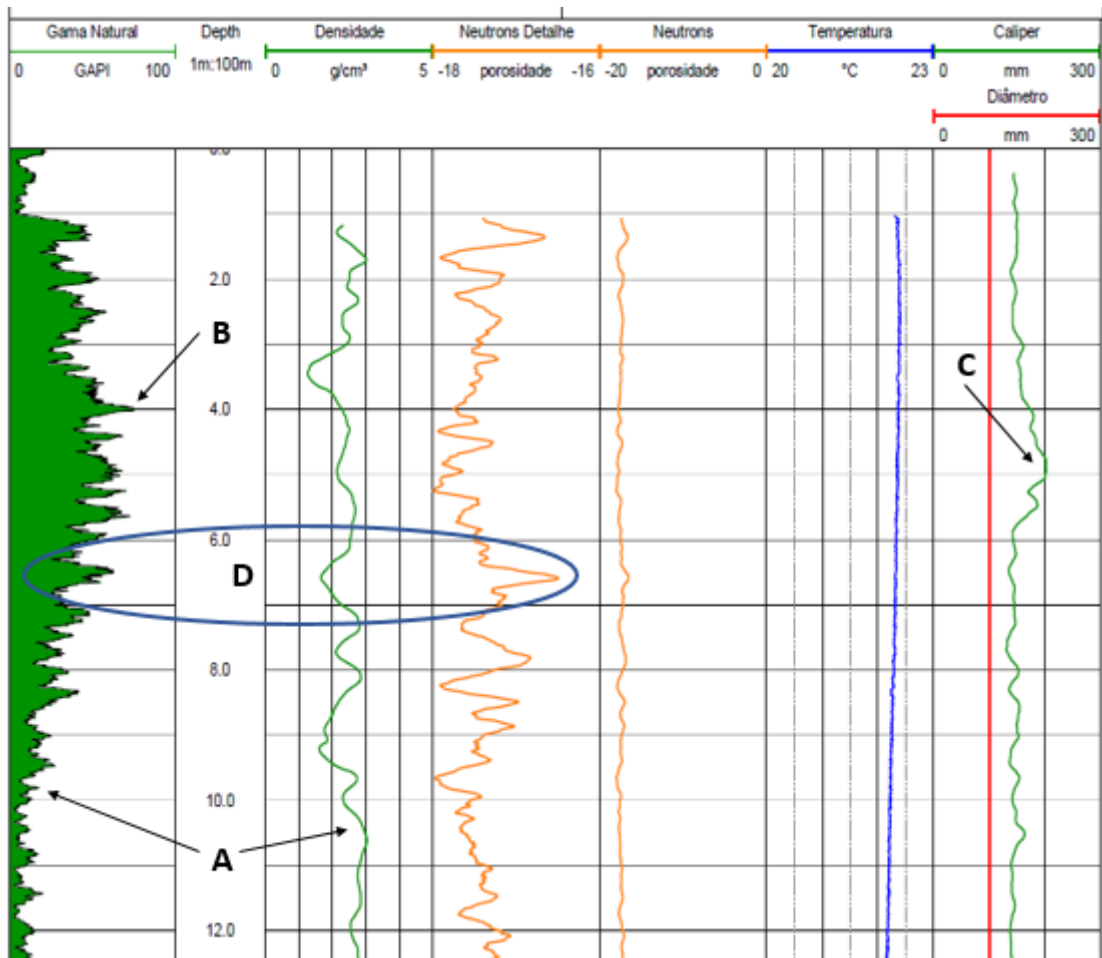


Figura 44. Detalhes nos perfis geofísicos do furo FD-29. Da esquerda para a direita tem-se a curva verde do perfil de gama natural, seguida pela curva verde de densidade, depois por duas curvas laranja do perfil de nêutrons, temperatura em azul e na extremidade direita o perfil de cáliper. Em (A) tem-se a queda brusca da argilosidade em 10m, coincidente com o padrão mais retilíneo da curva de densidade, refletindo o contato do aterro com o itabirito. Em (B) a região de pico da argilosidade coincidente com a ocorrência de desmoronamento das paredes do furo e maior diâmetro do cáliper (C). Em (D) o aumento da porosidade na curva de nêutrons coincide com um ponto de queda da densidade e aumento da concentração em argilas no aterro.

A partir dos 10 m de profundidade a densidade se eleva e o perfil da curva mostra um menor desvio, num padrão mais regular (Figura 44 (A)), com valor médio abaixo de $2,50 \text{ g/cm}^3$ até em torno de 26 m. A Figura 45 mostra os testemunhos de sondagem na profundidade entre 19 m e 28,30 m onde é possível perceber uma alteração do material, saindo de um padrão mais desagregado para outro mais íntegro e cilíndrico e, de acordo com os perfis de densidade e nêutrons, mais densos e com menor porosidade. O perfil

de nêutrons, como esperado, mostra que com a diminuição da porosidade ocorre um aumento da densidade (Figura 45).

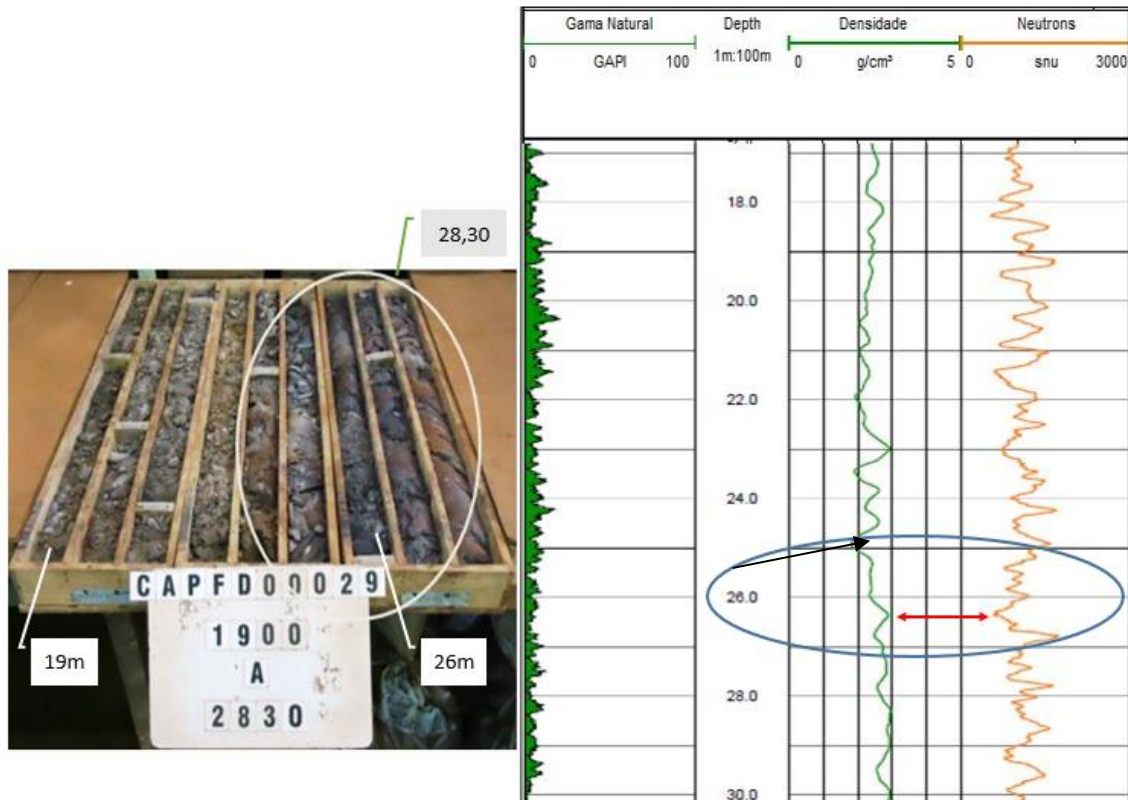


Figura 45. Apresenta à esquerda os testemunhos de sondagem do furo FD-29 na profundidade entre 19m e 28,30m, mostrando um aumento da compactidade do minério itabirítico em torno de 26m, com os testemunhos se mostrando mais cilíndricos. A figura da direita mostra os perfis de gama natural à esquerda, seguido pelos perfis de densidade e nêutrons à direita. Percebe-se um aumento no patamar de densidade um pouco acima de 26m de profundidade e ainda a sua correlação na diminuição da porosidade evidenciada no perfil de nêutrons.

A partir dos 26 m, percebe-se uma ligeira alteração no padrão, com aumento do valor médio da densidade para $2,64 \text{ g/cm}^3$, e aproximando-se de um formato de “serrote” até em torno de 63 m de profundidade. No intervalo entre 63 m e 75 m a densidade média eleva-se para $2,80 \text{ g/cm}^3$, sendo também percebida uma alteração no perfil de nêutrons com queda da porosidade e ainda no cáliber, com menor rugosidade nas paredes do furo. A partir de 75 m até o final do furo, percebe-se outra queda na porosidade, com

alteração no perfil de nêutrons e subida do valor médio da densidade, atingindo 3,24 g/cm³ e manutenção do perfil liso do calíper (Figura 46).

De maneira similar, a curva do calíper mostra-se mais irregular até a profundidade de 26 m, tornando-se, a partir daí, um pouco mais retilínea e eventualmente, mostrando o mesmo padrão tipo “serrote” do perfil de densidade. Esse comportamento segue até a profundidade aproximada de 63 m, quando o diâmetro do furo reduz de valores médios próximos a 135 mm para algo em torno de 100 mm, tornando as paredes lisas e sem variações significativas (Figura 46).

O perfil sônico, que iniciou as leituras somente abaixo de 75m de profundidade, mostrou uma tendência em se aumentar a velocidade das ondas “P” com a profundidade, refletindo a maior compacidade da rocha em direção ao fim do furo. A presença do “delta” invertido do perfil de densidade a 85 m de profundidade, com leve perturbação no diâmetro do furo e início efetivo de leituras no perfil sônico, foi interpretada como sendo o nível freático no furo (Figura 46).

A avaliação conjunta das variações evidenciadas nos perfis do furo, sugerem que todo esse comportamento pode ser explicado por uma variação da compacidade do pacote de itabiritos em função da profundidade, inicialmente com características friáveis e passagens mais compactas até 63 m, gradando para um itabirito semi-compacto até 75 m e depois para um itabirito compacto até o final da perfilagem em 133 m.

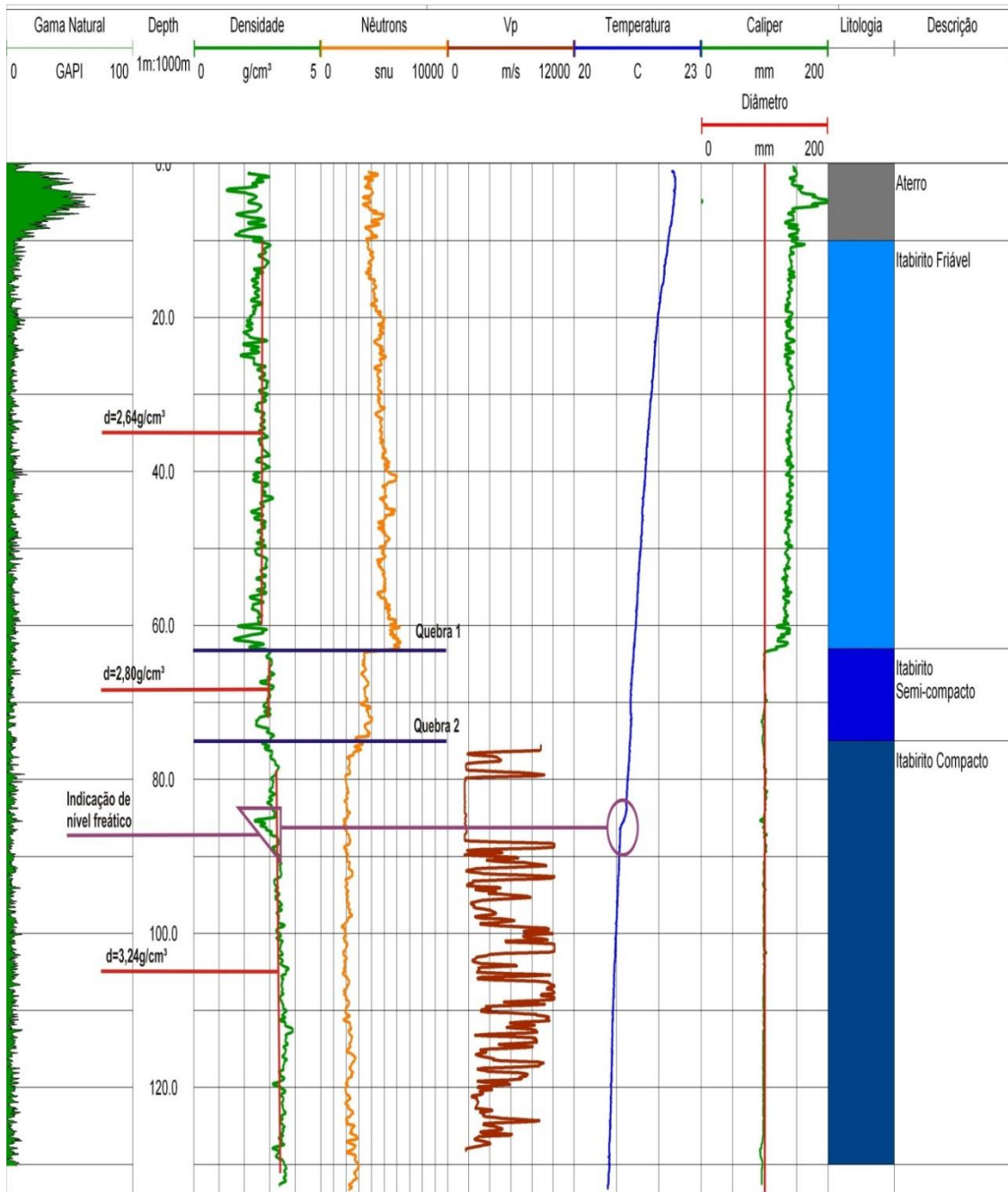


Figura 46. Apresenta da esquerda para a direita um detalhe dos perfis gama natural e densidade (linhas verdes), nêutrons (linha laranja), sônico (linha marrom-avermelhada), temperatura (linha azul) e calíper (linha verde). A partir da profundidade de 63m percebe-se um aumento na densidade média, redução da porosidade, com queda acentuada no perfil de nêutrons e o calíper mostrando uma redução no diâmetro das paredes. Em 75m ocorre nova queda da porosidade e aumento da densidade média. O delta invertido no perfil de densidade, com pequena alteração do calíper em torno de 85m foi interpretado como sendo o nível freático. O perfil sônico mostra um aumento da compacidade em direção ao fundo e sem leitura quando atinge 75m. Todo esse comportamento foi interpretado como sendo uma zona de transição dos itabiritos com diferentes graus de compacidade, friável até os 63m, semi-compacto até 75m e compacto até o final.

Embora essa interpretação não seja a mesma da descrição geológica, que separou o pacote de itabiritos em dois horizontes, friável até 86,40 m e depois compacto até o fim do furo, a interpretação apresentada encontra respaldo e subsídios nos registros da perfilagem geofísica, podendo ser considerada como um refinamento da descrição tradicional. O valor de 86,40 m definido na descrição geológica como sendo o contato do itabirito friável com o compacto, na verdade pode estar relacionado ao nível do lençol freático, onde oscilações sazonais acabam causando um abrandamento do material e confundindo o geólogo descritor. Além disso, a interpretação também encontra concordância com as análises físicas do testemunho, apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados químicos e de distribuição granulométrica do Furo FD-29, sendo “CA” o comprimento do intervalo amostrado.

| Furo | De | Até | CA | Fe | SiO₂ | G1 | G2 | G3 | G4 |
|-------------|-----------|------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| FD29 | 12,00 | 22,15 | 10,15 | 47,35 | 29,46 | 21,82 | 15,87 | 18,95 | 43,36 |
| FD29 | 22,15 | 33,35 | 11,20 | 46,47 | 30,94 | 28,99 | 14,85 | 14,03 | 42,13 |
| FD29 | 33,35 | 44,10 | 10,75 | 48,90 | 26,05 | 45,64 | 14,86 | 12,91 | 26,59 |
| FD29 | 44,10 | 54,80 | 10,70 | 48,71 | 28,33 | 43,84 | 14,86 | 9,86 | 31,45 |
| FD29 | 54,80 | 65,75 | 10,95 | 44,74 | 33,94 | 72,90 | 7,54 | 6,22 | 13,34 |
| FD29 | 65,75 | 76,05 | 10,30 | 43,07 | 34,80 | 69,63 | 7,69 | 9,36 | 13,32 |
| FD29 | 76,05 | 86,40 | 10,35 | 45,45 | 32,07 | 65,54 | 7,85 | 6,99 | 19,62 |
| FD29 | 86,40 | 94,40 | 8,00 | 45,33 | 33,56 | 85,34 | 4,49 | 3,14 | 7,03 |
| FD29 | 94,40 | 103,75 | 9,35 | 45,57 | 30,48 | 86,41 | 4,77 | 2,67 | 6,16 |
| FD29 | 103,75 | 112,15 | 8,40 | 45,93 | 29,60 | 93,24 | 2,54 | 1,33 | 2,89 |
| FD29 | 112,15 | 122,20 | 10,05 | 44,20 | 35,04 | 97,58 | 0,87 | 0,57 | 0,98 |
| FD29 | 122,20 | 132,85 | 10,65 | 43,84 | 35,31 | 97,72 | 0,97 | 0,67 | 0,64 |
| FD29 | 132,85 | 142,35 | 9,50 | 42,59 | 37,67 | 98,10 | 0,75 | 0,68 | 0,47 |

Os valores G1 a G4 indica o percentual retido em diferentes peneiras de classificação granulométrica, que servirão de parâmetro para a avaliação do minério e definição de sua vocação como produto comercial, onde G1 indica materiais mais grossos e G4 os materiais mais finos. Dessa forma, seguem os limites granulométricos de cada faixa:

- G1 = percentual de material acima de 8 mm
- G2 = percentual de material abaixo de 8 mm e acima de 1 mm
- G3 = percentual de material abaixo de 1 mm e acima de 0,15 mm
- G4 = percentual abaixo de 0,15 mm

Na indústria da mineração de ferro, a definição de um itabirito ser compacto ou não, é baseada no percentual retido na fração grossa (G1), contudo esse valor não é fixo, sendo uma função da usina que irá fazer o tratamento do material. Portanto, podem ter situações em que um material com G1 maior que 70% seja definido como compacto e em outros casos, somente quando G1 for maior que 80%. Esse tipo de classificação, portanto, pode não refletir diretamente a tipologia do material, sendo muito mais uma função da capacidade dos equipamentos de britagem que se dispõe.

Dessa forma, embora a descrição geológica do testemunho defina que o itabirito friável encontra-se até a profundidade de 86 m, os registros da perfilagem sugerem uma transição de um material mais friável para outro progressivamente mais compacto a partir do intervalo entre 54,80 m e 65,75 m de profundidade, com G1 saindo de 43,84% para 72,90% (Tabela 5).

As Figuras 47 e 48, elaboradas a partir da curva granulométrica da faixa grossa (G1) apresentada na Tabela 5, exprimem o aumento linear da compactidade da rocha com a profundidade e evidenciam os três horizontes físicos de classificação dos itabiritos, corroborando com a reinterpretação do furo.

Mais uma vez, os dados da perfilagem se mostram uma importante ferramenta como suporte às atividades de descrição de testemunhos e na classificação litológica.

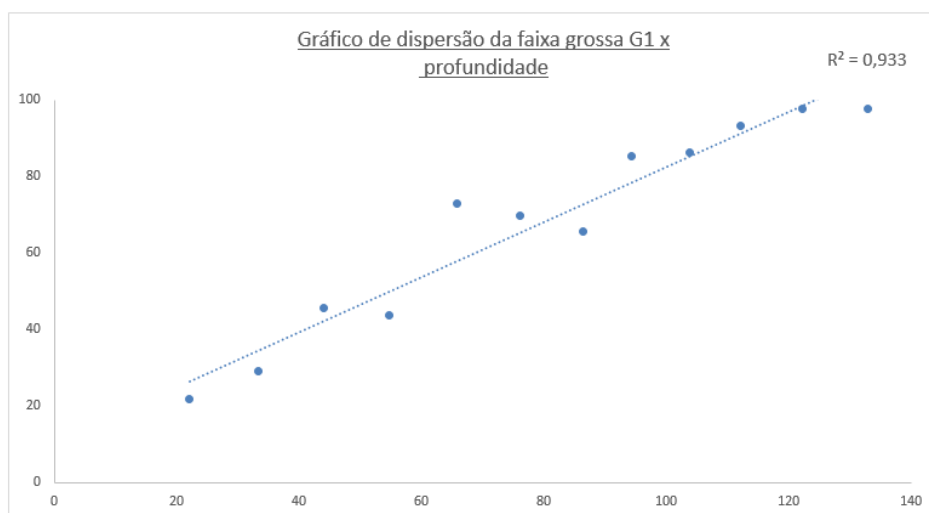


Figura 47. Gráfico com dispersão da curva granulométrica da faixa grossa (G1) em função da profundidade, evidenciando o aumento da compactidade da rocha em direção ao fim do furo.

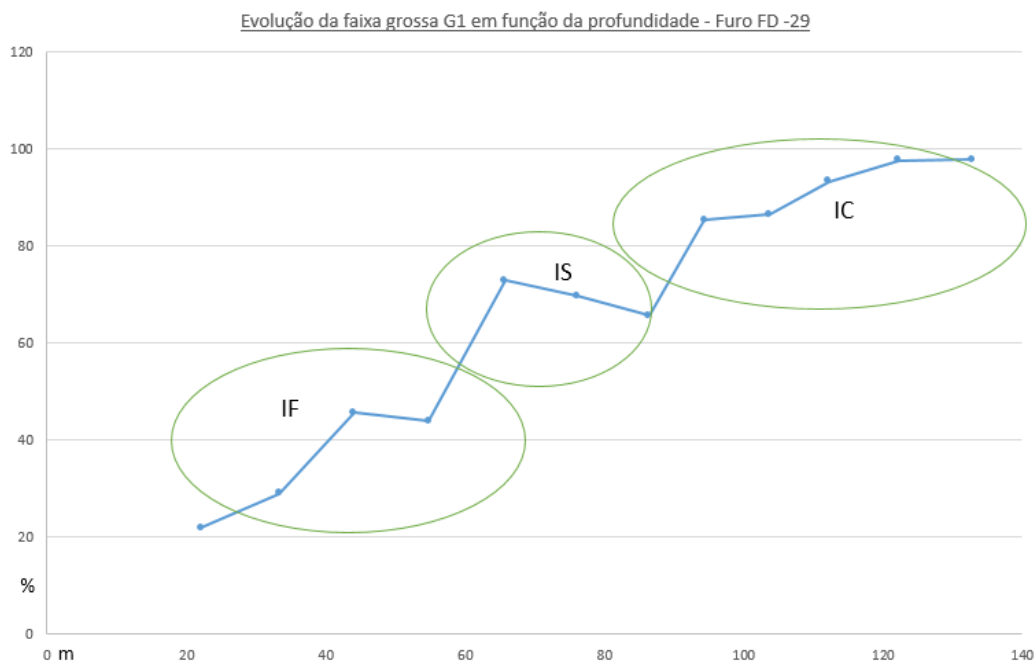


Figura 48. Evolução da curva granulométrica da faixa grossa (G1) com a profundidade no furo FD-29, mostrando ser factível a subdivisão dos itabiritos em friáveis (IF), semi-compactos (IS) e compactos (IC) corroborando com a interpretação da perfilagem geofísica.

Como já discutido, o aumento da densidade está associado a uma diminuição da porosidade da rocha, como observado na transição dos itabiritos friáveis para compactos. Contudo, o aumento da densidade também pode ser influenciado pela composição mineralógica da rocha e, com a diminuição da concentração de minerais de ferro com a profundidade, marcada pela redução de teores em ferro nas análises químicas (Tabela 5), era de se esperar uma redução da densidade. Porém, essa relação não é observada de forma clara, ocorrendo uma tendência no aumento da densidade em função da profundidade. Dessa forma, o fator compacidade/porosidade mostra-se mais proeminente que a composição química da rocha. O efeito do fator concentração de minerais de ferro, talvez fosse mais bem compreendido quando da presença de horizontes hematíticos de alto teor em ferro, porém, infelizmente nenhuma camada desse tipo foi interceptada nos furos estudados.

A Figura 49 traz um detalhe dos perfis de densidade, nêutrons e sônico, com exagero de escala para ilustrar as relações discutidas acima. Nas posições marcadas em (A) ocorre

situação normal e lógica, onde com a redução da porosidade, há um aumento da compacidade e consequente aumento da densidade. Já na posição marcada em (B), ocorre que com a diminuição da porosidade e aumento da compacidade, a densidade diminui; isso pode estar associado a uma diminuição localizada do percentual de minerais de ferro. Contudo, essa questão fica ainda em aberto, pois não foram realizados estudos de acompanhamento mineralógico sistematizado que poderiam comprovar essa hipótese e, embora haja análises químicas disponíveis, o intervalo das amostras é muito grande, diluindo as pequenas variações que ocorrem.

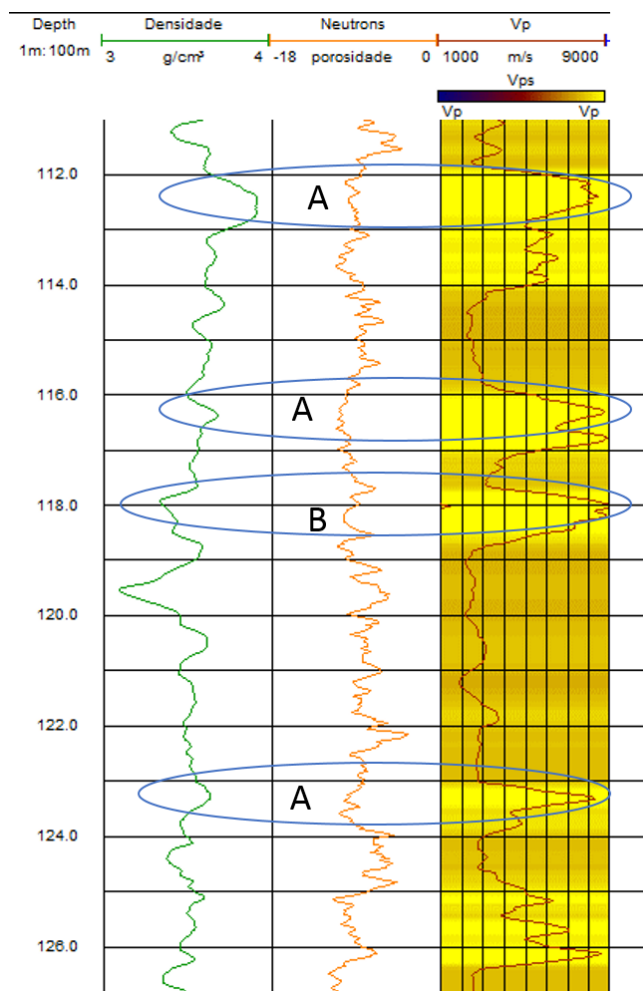


Figura 49. Detalhe dos perfis de densidade (linha verde à esquerda), nêutrons (linha do centro) e sônico (linha vermelha à direita), mostrando em (A): aumento da compacidade, diminuição da porosidade e aumento da densidade e em (B): aumento da compacidade, redução da porosidade e queda na densidade, onde a concentração de minerais ferrosos poderia estar prevalecendo.

4.3. ANÁLISE DO FURO FD-31

A sondagem testemunhada atingiu a profundidade de 179,20 m e a perfilagem geofísica chegou somente até 70 m. Segundo a descrição geológica, basicamente o furo atravessou uma camada de aterro até os 3,60 m, passando para uma canga de 17 m de espessura até uma profundidade pouco superior a 20 m, gradando para um hematitito goethítico friável até os 45 m e posteriormente para um itabirito goethítico friável até 76,50 m. A partir daí, passa para um itabirito silicoso friável, progressivamente mais compacto.

Dessa forma, o pacote rochoso até uma profundidade em torno de 76,50 m representa o nível intemperizado superficial, com abundância de minerais tipicamente de ambientes hidratados, como goethitas, caulinitas e gibsitais. Essa interpretação é corroborada pelas análises laboratoriais do testemunho (Tabela 6), onde podem ser vistos os elevados percentuais em ferro, alumina e perda ao fogo. A transição do hematitito para o itabirito, ambos, goethíticos, também pode ser reconhecida a partir de 45 m, com queda no teor em ferro e aumento em sílica.

Tabela 6. Resultados das análises físicas e químicas do furo FD31, para G1>6,3mm; 1mm<G2<6,3mm; 0,15mm<G3<1mm e G4<0,15mm

| Furo | Profundidade (m) | | Litologia | Fe | SiO ₂ | P | Al ₂ O ₃ | PF | G1 | G2 | G3 | G4 |
|-------|------------------|-------|-----------|------|------------------|-----|--------------------------------|-----|----|----|----|----|
| | De | Até | | | | | | | | | | |
| FD 31 | 3,6 | 12,4 | CG | 58,4 | 2,0 | 0,2 | 4,6 | 9,0 | 49 | 32 | 12 | 6 |
| FD 31 | 12,4 | 20,6 | CG | 59,5 | 2,0 | 0,2 | 3,9 | 8,6 | 49 | 33 | 10 | 7 |
| FD 31 | 20,6 | 32,4 | HGOF | 61,0 | 3,8 | 0,1 | 1,7 | 7,0 | 33 | 23 | 19 | 26 |
| FD 31 | 32,4 | 44,9 | HGOF | 61,0 | 5,1 | 0,1 | 1,5 | 5,9 | 26 | 22 | 18 | 33 |
| FD 31 | 44,9 | 56,3 | IGOF | 52,3 | 19,2 | 0,1 | 1,2 | 5,0 | 41 | 20 | 14 | 25 |
| FD 31 | 56,3 | 66,6 | IGOF | 48,8 | 24,5 | 0,1 | 1,7 | 3,9 | 20 | 15 | 21 | 44 |
| FD 31 | 66,6 | 76,5 | IGOF | 59,9 | 8,5 | 0,1 | 0,7 | 4,6 | 18 | 20 | 20 | 42 |
| FD 31 | 76,5 | 87,3 | IF | 54,0 | 20,5 | 0,0 | 0,6 | 1,6 | 62 | 11 | 8 | 20 |
| FD 31 | 87,3 | 97,2 | IS | 46,2 | 30,9 | 0,0 | 0,6 | 2,3 | 75 | 7 | 7 | 11 |
| FD 31 | 97,2 | 107,1 | IS | 42,4 | 35,5 | 0,1 | 0,3 | 3,2 | 66 | 7 | 8 | 19 |
| FD 31 | 107,1 | 118,9 | IC | 38,6 | 40,6 | 0,1 | 0,2 | 3,6 | 87 | 4 | 3 | 6 |
| FD 31 | 118,9 | 128,0 | IF | 41,9 | 33,7 | 0,1 | 1,7 | 4,3 | 42 | 13 | 12 | 33 |
| FD 31 | 128,0 | 138,2 | IC | 39,7 | 39,8 | 0,1 | 0,6 | 2,8 | 90 | 3 | 2 | 5 |
| FD 31 | 138,2 | 148,3 | IC | 39,3 | 40,0 | 0,1 | 0,5 | 3,3 | 90 | 3 | 2 | 5 |
| FD 31 | 148,3 | 158,5 | IC | 43,1 | 34,1 | 0,1 | 0,5 | 3,5 | 83 | 6 | 4 | 7 |
| FD 31 | 158,5 | 169,0 | IC | 44,5 | 34,0 | 0,0 | 0,5 | 1,6 | 89 | 4 | 2 | 5 |
| FD 31 | 169,0 | 179,2 | IC | 42,3 | 38,1 | 0,1 | 0,5 | 1,6 | 95 | 2 | 1 | 2 |

O aterro superficial, descrito nos primeiros 3,60 m, pode ser identificado a partir de variações significativas nos perfis de gama natural, densidade e ainda no cáliper (Figura 50). Essas variações estão sendo interpretadas como sendo a transição de um aterro mais arenoso para a canga superficial, com aumento relativo em argilas, produto final de alterações químicas, como também no aumento da porosidade, primária e secundária, fruto da saída de elementos solúveis e consequente redução na densidade.

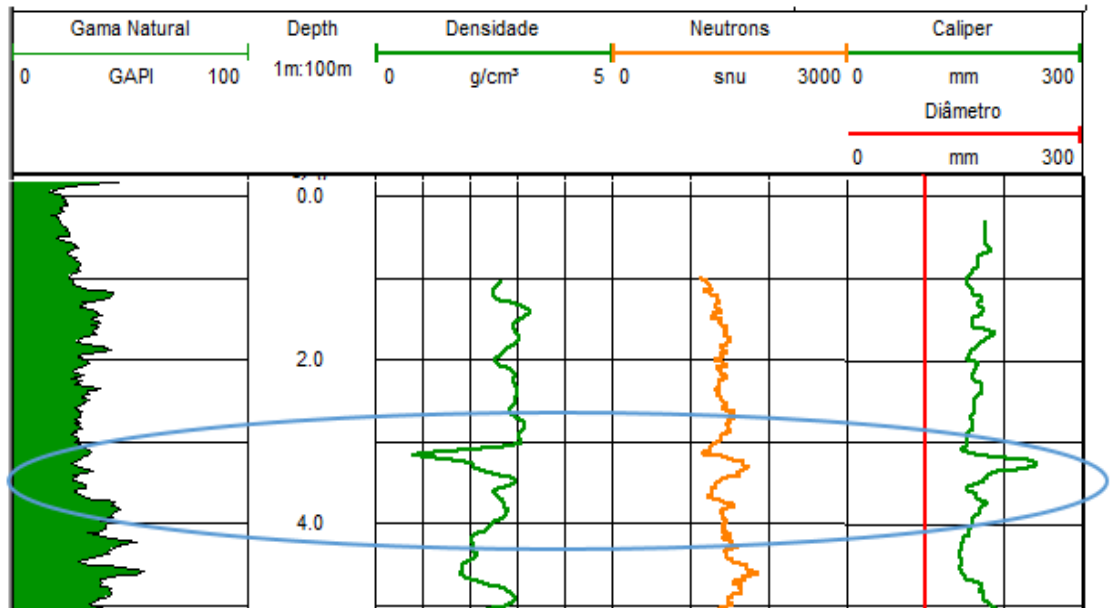


Figura 50. Detalhe da perfilagem do furo FD-31. Da esquerda para a direita tem-se o perfil de gama natural, seguido pela linha verde da densidade, laranja do perfil de nêutrons e cáliper na extremidade direita, evidenciando a transição do aterro para a canga, com aumento das argilas, e variações significativas em todos os perfis.

O intervalo de 17 m descrito como canga – entre 3,60 e 20,60 m – é marcado nos perfis mostrados na Figura 51 como um segmento argiloso e de densidade e porosidades variáveis. O diâmetro do cáliper sugere uma correlação direta com níveis argilosos do perfil de gama natural.

A grande variação do perfil de nêutrons, nesse caso apresentado em “snu” (*Signal Neutral Units*), onde as maiores contagens indicam menores concentrações em hidrogênio e consequentes menores porosidades podem estar refletindo pelo menos duas situações distintas: a presença de água na porosidade da rocha ou variações na

composição mineralógica evidenciando intervalos com maior percentual de minerais hidratados.

Embora o perfil de nêutrons possa estar refletindo a presença da hidroxila, isso não ficou evidenciado nessa avaliação e estudos mais aprofundados devem ser realizados, como uma caracterização mineralógica sistemática. A descrição geológica do furo e as análises químicas não são suficientes na resolução dessa questão, visto que os intervalos amostrais se mostram muito longos, acabando por diluir pequenas variações composicionais. Isso evidencia, mais uma vez, o nível de detalhamento da perfilagem geofísica.

Particularmente no intervalo entre 8 m e 11 m, percebem-se grandes alterações nos perfis de densidade, de nêutrons e do diâmetro do furo, podendo estar associado a uma passagem com maior porosidade, com ocorrência, inclusive, de pequenos vazios, o que explicaria as alterações identificadas.

O contato de base, com gradação para o hematitito goethítico a partir dos 20 m, ficou bem evidenciado somente no perfil de gama natural, com queda progressiva na concentração de argilas (Figura 51). No perfil de cáliper percebe-se uma pequena alteração nas condições das paredes do furo, mostrando uma tendência de menores arrombamentos e rugosidades, sugerindo um material mais resistente, embora sem variações nas condições gerais de densidade.

A Figura 52 apresenta os testemunhos de sondagem na região de contato entre a canga e o hematito goethítico, evidenciando a dificuldade de interpretação devido à sutileza nas diferenças entre um material e outro. Basicamente, percebe-se apenas uma variação na tonalidade do material.

Portanto, em situações como essa, que envolve material bastante hidratado e superficial, qualquer dado adicional que venha a auxiliar na definição dos contatos é de suma importância. Como apresentado na Figura 51, a curva da perfilagem de gama natural conseguiu evidenciar bem o contato que, nesse caso, mostra um bom conhecimento do geólogo descritor a respeito das particularidades da área em estudo.

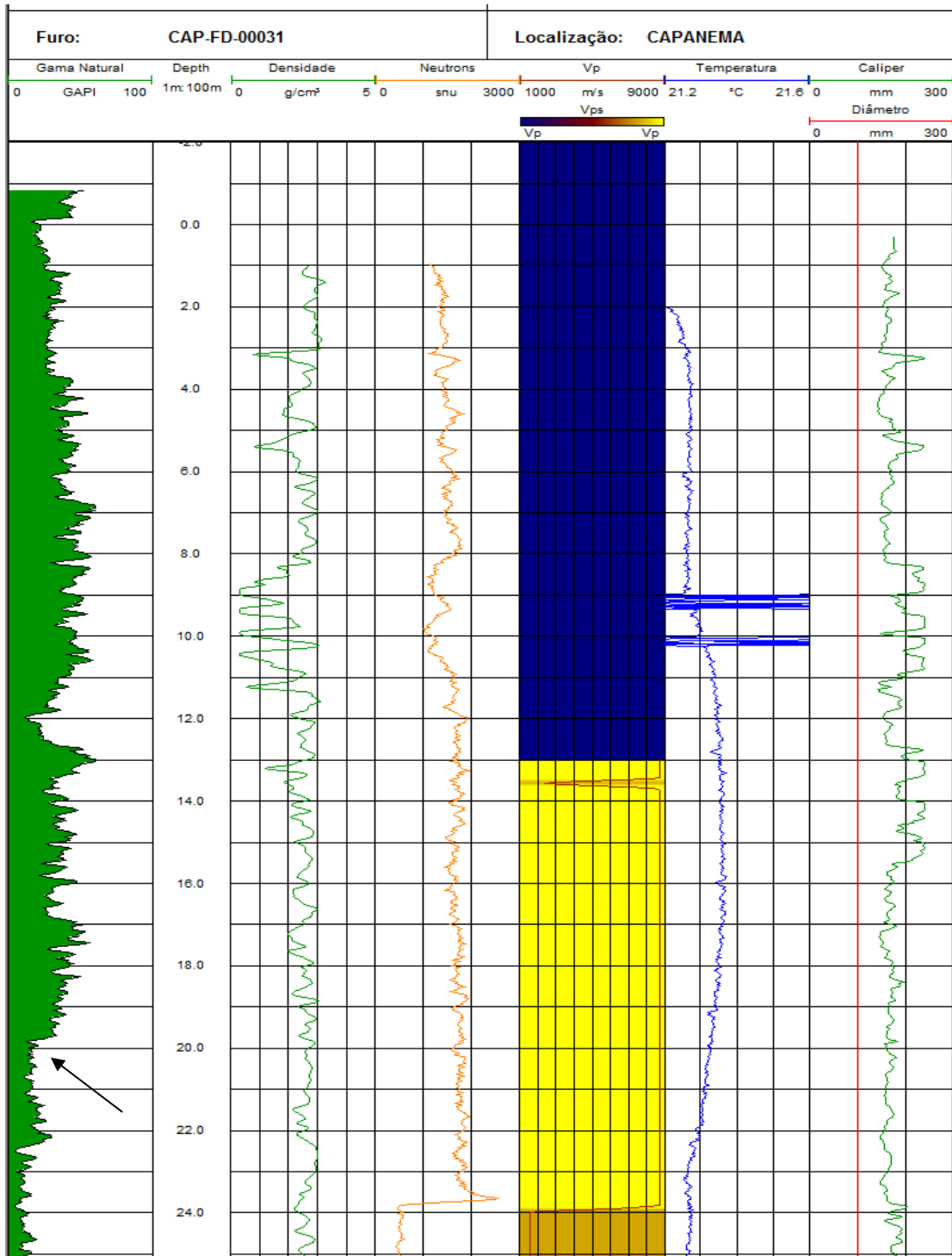


Figura 51. Detalhe da perfilagem do furo FD-31, da esquerda para a direita, tem-se as curvas de gama natural, densidade, nêutrons, sônica, temperatura e cáliper. O contato da canga com o hematito goethítico em 20,60 m só ficou bem evidenciado no perfil de gama natural e uma leve diminuição das rugosidades nas paredes do furo.

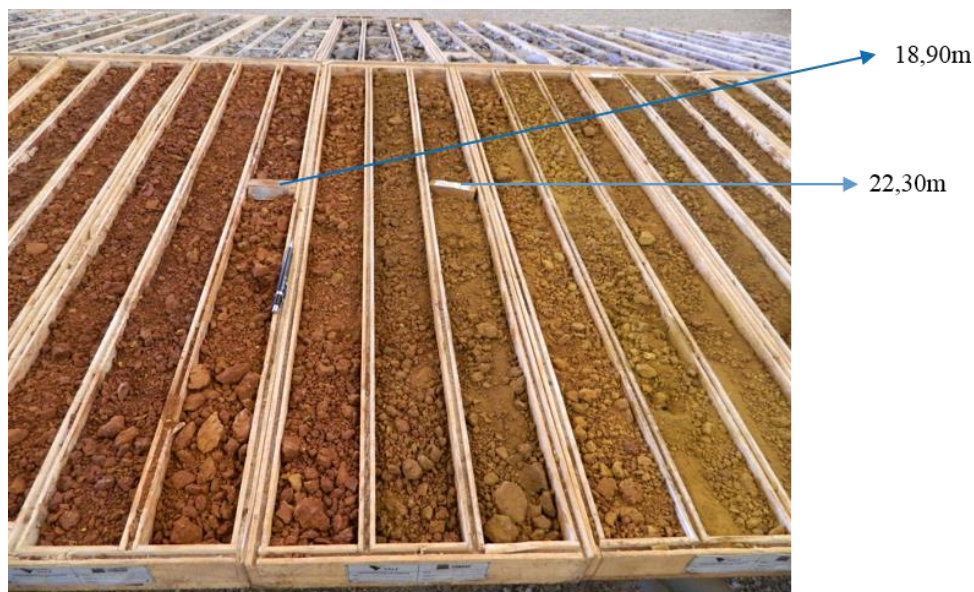


Figura 52. Transição da canga, mais argilosa e avermelhada (à esquerda) para um hematititos goethítico, menos argiloso, mais arenoso, fino e amarelado (à direita), em torno de 20m de profundidade.

O perfil sônico não mostrou nenhuma alteração ao longo do intervalo até 20,60 m. Contudo a 24 m de profundidade ocorre uma grande variação na curva sônica, que associada à profunda alteração na contagem de nêutrons, foi interpretada como sendo o contato com o lençol freático (Figura 53). O furo FD-31 situa-se numa cota bem inferior quando comparado ao furo FD-29.

A partir desse ponto, a perfilagem não mostrou grandes alterações, com níveis mais argilosos acontecendo eventualmente e com maior estabilidade das paredes do furo. O perfil de densidade, apesar de mostrar um padrão de “serrote”, apresenta ligeira tendência de aumento no intervalo entre 36 m e 43 m, passando de valores na casa de $2,45 \text{ g/cm}^3$ para $2,85 \text{ g/cm}^3$, em concordância com um intervalo um pouco mais rico em ferro (Tabela 6). A partir daí, mostra ligeira queda sugerindo a transição para os itabiritos goethíticos descritos a partir de 45 m de profundidade.

Na profundidade em torno de 70 m ocorre um contato brusco de um itabirito acinzentado e silicoso, com outro itabirito, ocre e mais argiloso, como mostra a Figura 54. Nesse contato, o furo se fechou e a ferramenta de perfilagem teve seu avanço impedido.

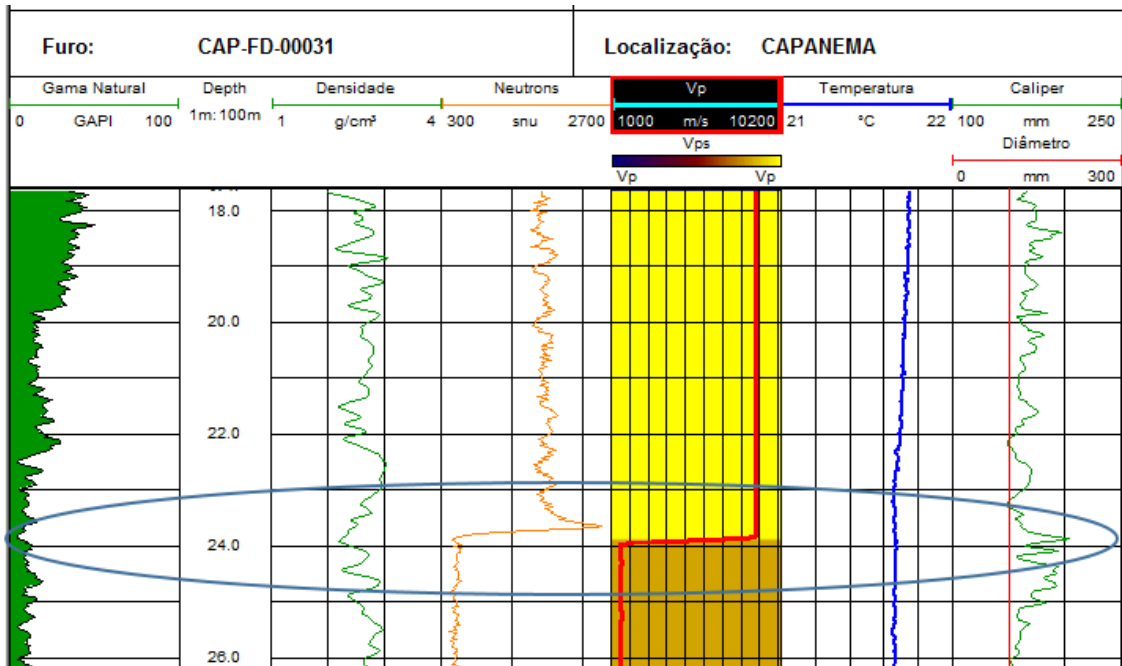


Figura 53. Detalhe da perfilagem mostrando a interpretação do topo do lençol freático e alterações nos perfis de nêutrons (curva laranja no centro), sônico (curva vermelha sobre fundo colorido) e de cáliper (curva verde na extremidade direita).

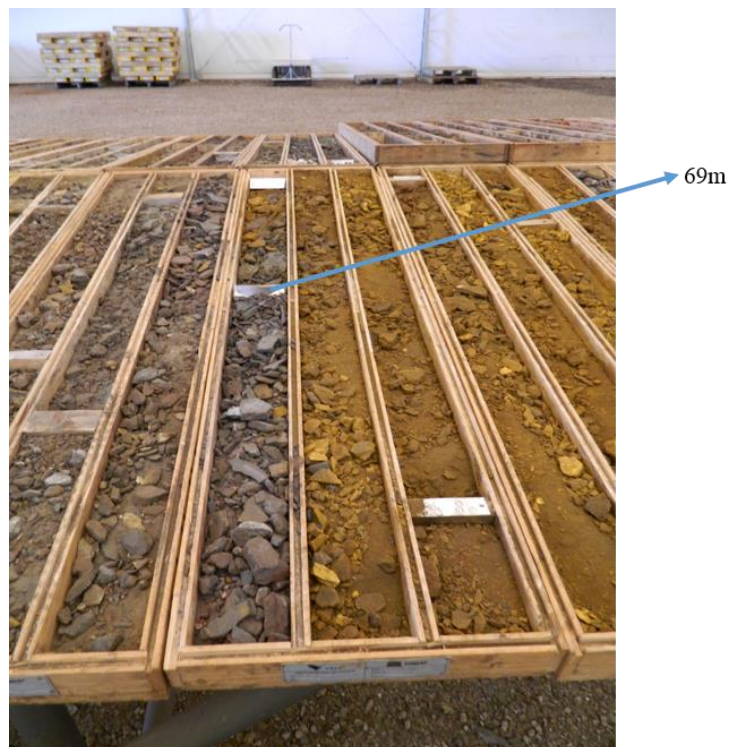


Figura 54. Detalhe do contato entre diferentes itabiritos, um mais silicoso e de coloração acinzentada e outro mais argiloso e de cor ocre. A descida da ferramenta foi obstruída exatamente no contato com o material mais argiloso e menos competente.

De maneira geral, o furo não apresentou grandes variações ao longo da profundidade perfilada e com base nas análises químicas, todo o pacote rochoso aparenta ter o mesmo padrão com níveis mais argilosos no início e um pouco menos argilosos a partir de 20 m de profundidade. As variações regulares de densidade podem estar relacionadas a variações na composição mineralógica e também na maior ou menor incidência de poros, visto tratar-se de um material bastante intemperizado. Em função disso, o pacote rochoso entre 3,60 m e 76,90 m pode ser classificado como uma rocha ferruginosa alterada, localmente denominada de WH – *weathered hematite* – hematitito hidratado ou goethitizado, que tem como características principais, percentuais elevados em ferro – em torno de 60 % – com altos valores de PF (perda ao fogo) devido à abundância de minerais hidratados, baixa sílica e elevado teores de contaminantes, como a alumina e o fósforo (Tabela 6). A Figura 55 mostra a seção geológica do furo e respectiva interpretação geológica.

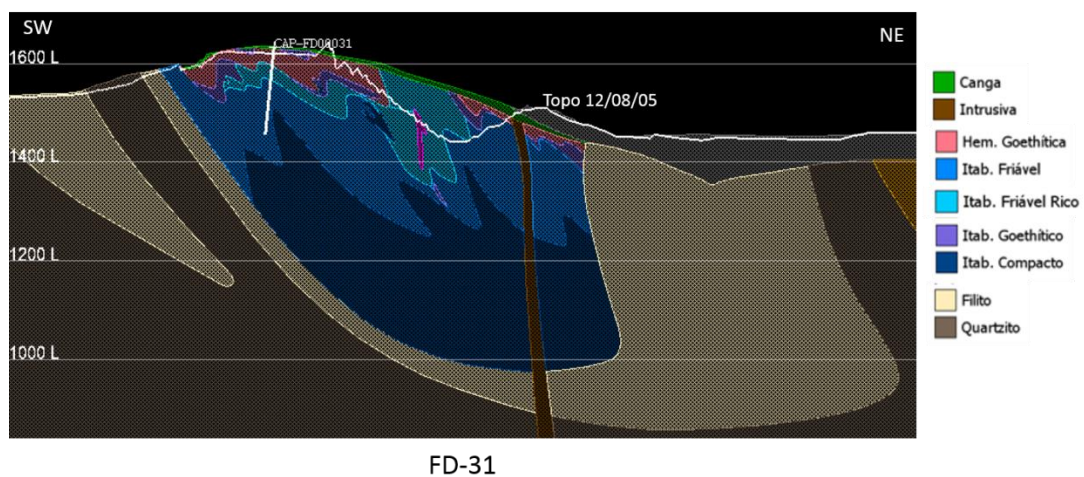


Figura 55. Seção com interpretação geológica do furo FD-31

4.4. ANÁLISE DO FURO FD-28

O furo FD-28 atingiu a profundidade máxima de 360 m, contudo somente os primeiros 98 m foram perfilados, devido ao trancamento do furo na transição de um material mais argiloso para outro mais arenoso. O furo foi perfilado somente com as ferramentas de gama natural, gama-gama, temperatura e cáliper; ainda assim, passível de obtenção de informações consistentes.

A descrição geológica do furo consiste basicamente num aterro superficial de 3 m, passando para um hematitito goethítico até 31 m, seguido por um filito sericítico de coloração ocre até próximo aos 37 m e depois para um itabirito goethítico até 77 m. A partir daí, vai até o final composto por itabiritos com diferentes níveis de compactidade e teores em ferro progressivamente mais baixos.

A Figura 56 mostra a seção geológica interpretada.

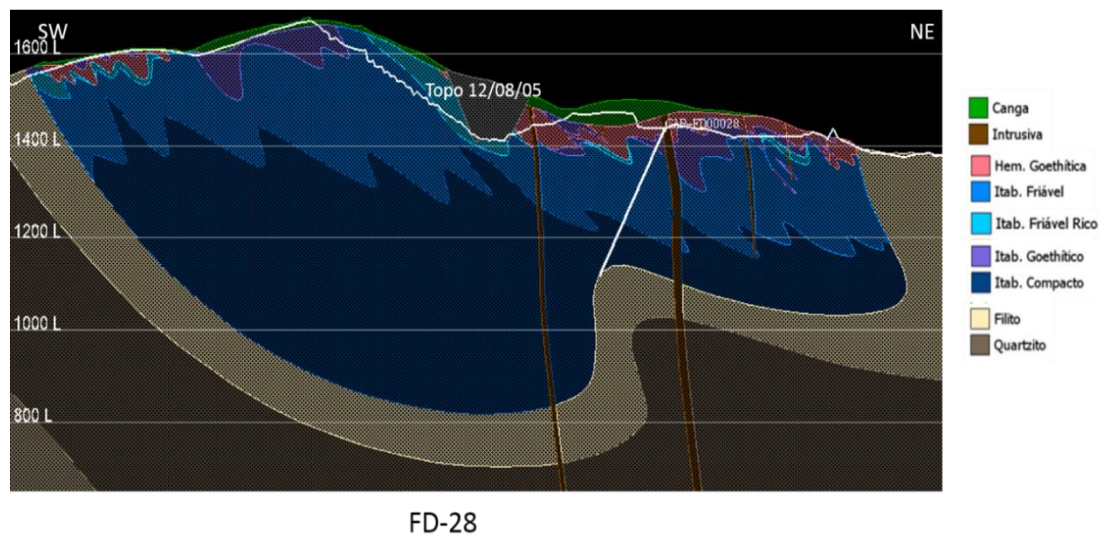


Figura 56. Seção geológica interpretada do furo FD-28.

O perfil de gama natural mostra uma tendência na redução das argilas com a profundidade até próximo a 27 m, onde sofre forte alteração até os 33 m, com um material argiloso marcando esse intervalo (Figura 57). Comparando-se com a descrição e ainda com a interpretação geológica, percebe-se uma tendência de defasagem em torno de 4 m entre os dados apontados na sondagem e na perfilagem geofísica. O intervalo de aproximadamente 6 m descrito como “filito sericítico”, na verdade representa uma intrusão de rocha máfica profundamente alterada.

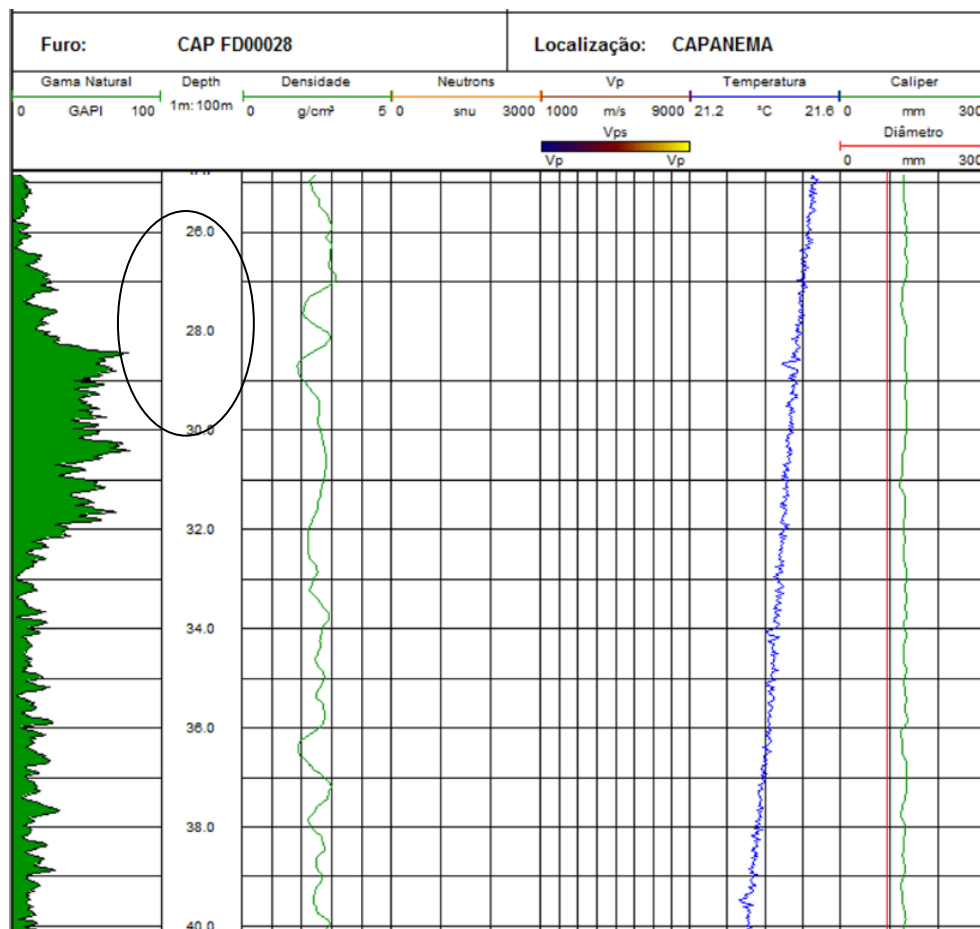


Figura 57. Perfilagem geofísica mostrando o registro da intrusiva máfica no perfil de gama natural, curva verde preenchida na extremidade esquerda, na profundidade entre 27 e 33 m.

A uma profundidade de 51m, o valor médio da densidade no perfil gama-gama muda do patamar abaixo de $3,0\text{g/cm}^3$ para outro entre $3,5$ e $4,0\text{g/cm}^3$, podendo ser explicado pelo aumento do teor em ferro entre 47 m e 77 m, principalmente no intervalo a partir de 56,25 m, onde o teor em ferro assume um pico de concentração (Tabela 7) e corroborando com a tendência de defasagem em torno de 4 m. A perfilagem do cáliper também mostra uma diminuição da rugosidade das paredes do furo após os mesmos 51 m, mostrando a transição para um material mais consistente, permanecendo sem variações significativas até o fim do intervalo perfilado (Figura 58).

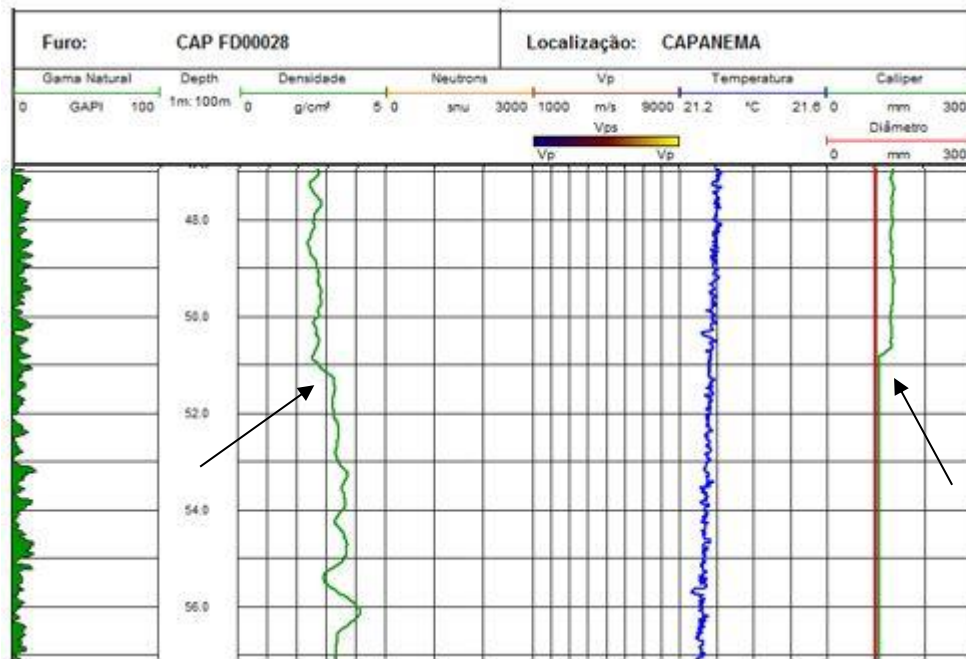


Figura 58. Detalhe da perfilagem no furo FD-28. Da esquerda para a direita tem-se a curva do perfil de gama natural, seguida pela de densidade em verde e contínua, depois o perfil de temperatura em azul e na extremidade direita o perfil de cáliper. As duas setas mostram a alteração nos perfis de densidade e cáliper a partir de 51m,

Contudo, a partir dos 77 m percebe-se uma redução considerável nos teores em ferro e sem reduções nos valores de densidade, talvez uma redução da porosidade do material, com conseqüente aumento da compacidade, possa estar contribuindo nesse efeito. De maneira análoga à discussão do furo FD-29, uma investigação mais profunda dessa relação mostra-se necessária.

Embora seja perceptível no resultado das análises químicas e na descrição geológica a transição do material intemperizado para o itabirito silicoso, essa transição não fica bem evidenciada na perfilagem geofísica. O perfil de gama natural sugere a presença de argilas nos itabiritos ao longo de todo o intervalo perfilado, que de certa forma, encontra respaldo nos resultados das análises químicas (Tabela 7), com resultados de alumina acima de 1,5% até pelo menos 107 m de profundidade, sendo a caulinita o principal argilo-mineral aluminoso.

A Tabela 7 mostra o resultado das análises químicas do furo FD-28 até a profundidade de 180 m e, similar ao furo FD-31, o intervalo entre 2,90 e 77 m representa o pacote de material intemperizado superficial, localmente denominado de WH – *Weathered Hematite* – descrito como itabiritos e hematititos goethíticos.

Tabela 7. Resultados das análises químicas do furo FD 28

| Furo | De | Até | Lito | Fe | SiO ₂ | P | Al ₂ O ₃ | PF |
|-------|--------|--------|------|------|------------------|------|--------------------------------|-----|
| FD 28 | 2,90 | 12,85 | HGOF | 59,2 | 7,0 | 0,09 | 3,1 | 5,1 |
| FD 28 | 12,85 | 21,55 | HGOF | 58,6 | 5,2 | 0,14 | 2,8 | 8,0 |
| FD 28 | 21,55 | 31,00 | HGOF | 59,0 | 5,8 | 0,12 | 3,6 | 6,4 |
| FD 28 | 36,80 | 46,90 | IGOF | 58,4 | 6,6 | 0,13 | 1,8 | 8,0 |
| FD 28 | 46,90 | 56,25 | IGOF | 60,6 | 4,3 | 0,15 | 1,3 | 7,8 |
| FD 28 | 56,25 | 66,35 | IGOF | 61,8 | 2,5 | 0,17 | 1,6 | 7,7 |
| FD 28 | 66,35 | 76,80 | IGOF | 60,2 | 6,5 | 0,15 | 1,3 | 6,0 |
| FD 28 | 76,80 | 86,50 | IF | 52,5 | 20,2 | 0,08 | 1,7 | 3,3 |
| FD 28 | 86,50 | 96,45 | IF | 38,5 | 38,7 | 0,05 | 2,2 | 3,8 |
| FD 28 | 96,45 | 107,10 | IF | 41,8 | 34,6 | 0,08 | 1,8 | 3,3 |
| FD 28 | 107,10 | 117,95 | IF | 43,9 | 33,0 | 0,03 | 1,4 | 2,5 |

4.5. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Os resultados da análise comparativa entre os métodos direto e indireto discutidos anteriormente, sugerem êxito na aplicação na pesquisa exploratória do minério de ferro. Embora estudos mais detalhados se tornem necessários, os resultados obtidos sugerem a possibilidade de alterações na malha de sondagem, com a substituição parcial de furos testemunhados por furos executados com sonda roto-percussiva.

Contudo, essa possibilidade requer a formação prévia de uma base conceitual sólida da geologia local, de forma a poder definir pontos onde a sondagem testemunhada pudesse ser substituída pela roto-percussiva e ambas, com acompanhamento da perfilagem. Assim, em uma seção geológica onde seriam perfurados três furos, poder-se-ia avaliar a possibilidade de execução do furo central sem a testemunhagem, com os dois furos extremos servindo como referência para a interpretação geológica do furo central.

A Figura 59 exemplifica uma programação hipotética de sondagem exploratória num ambiente geológico relativamente pouco complexo. De um total de 21 furos, 13 seriam testemunhados e 8 roto-percussivos, mas todos com perfilagem geofísica.

Um furo roto-percussivo custa em torno de 35% menos que um furo testemunhado, portanto, a cada três furos roto-percussivos executados, gera-se uma economia para execução de um testemunhado. Além da redução do custo, tem-se o fator tempo, pois a execução de um furo testemunhado é muito mais demorada do que um roto-percussivo.

Logicamente, essa alteração na malha de pesquisa é função de algumas variáveis, principalmente o grau de detalhamento necessário para o projeto e a complexidade geológica.

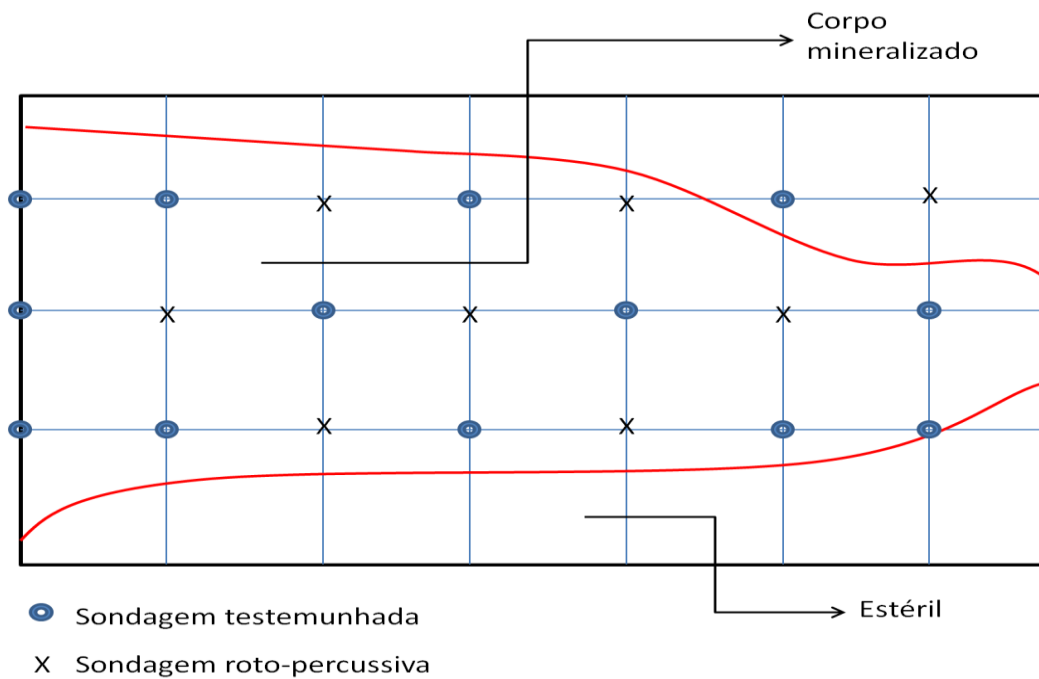


Figura 59. Programação de sondagem hipotética, mostrando possibilidade de alteração da malha de sondagem, com substituição de alguns furos testemunhados por roto-percussivos e todos com perfilagem geofísica, gerando diminuição de tempo e custos na pesquisa.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados apresentados, a aplicação de técnicas de perfilagem geofísica mostrou-se uma poderosa ferramenta na pesquisa do minério de ferro.

Inicialmente, percebe-se sua grande utilidade na descrição dos testemunhos e na definição precisa da profundidade de interfaces geológicas, realçando nuances não percebidas numa simples avaliação visual, pois eventualmente podem ocorrer distorções significativas em relação aos apontamentos de dados gerados na etapa de sondagem.

Além disso, na descrição é que são definidos os intervalos de amostragem para a realização das análises laboratoriais, onde primeiramente procura-se respeitar os contatos litológicos, mas muitas vezes, quando na presença da mesma litologia, essa definição apresenta um comprimento fixo. Essa prática acaba diluindo informações preciosas na interpretação geológica e geotécnica do maciço. Dessa forma, dados da perfilagem auxiliam na definição de cortes mais precisos nos intervalos de amostragem, melhorando o processo de caracterização física e química da área em estudo.

A análise dos testemunhos e sua comparação com os perfis geofísicos devem ser realizadas com o testemunho íntegro, antes da realização de amostragens para ensaios de laboratório. Os serviços de perfilagem do furo devem ser realizados imediatamente após o término da perfuração, de forma a reduzir o risco de fechamento das paredes e consequente impossibilidade de descida da coluna de perfilagem até a profundidade final. Em todos os furos estudados, o equipamento não atingiu a profundidade desejada, pois foi executada num tempo considerável após a conclusão da perfuração. Esse fato serviu de aprendizado e essa informação passou a ser um agente balizador no desenvolvimento dos trabalhos subsequentes.

De maneira geral, quanto mais compacta a rocha menor será a probabilidade de trancamento do furo, entretanto, passagens mais friáveis ou menos resistentes poderão impedir o avanço da coluna de perfilagem. Uma forma de eliminar esse risco é o revestimento do furo com utilização de hastes. Porém, apesar dessa técnica gerar condições mais seguras de trabalho, a presença do revestimento metálico causa um ruído no levantamento de dados, que precisa ter um tratamento adequado visando não comprometer o resultado final. Para isso, técnicas matemáticas específicas estão sendo

desenvolvidas para eliminar esse efeito, visto que essa influência varia de acordo com o método utilizado.

A partir do cruzamento de dados dos diferentes perfis geofísicos, a metodologia de análise se mostrou como uma ferramenta bastante satisfatória na definição de contatos litológicos, marcando bem a presença de materiais hidratados, níveis argilosos e contatos litológicos de diferentes compacidades. Os níveis argilosos e intrusões de rochas máficas ficaram bastante evidentes nos perfis de gama natural. Diferenças de compacidade nos itabiritos ficaram bem registradas nos perfis de cáliper, densidade, sônico e nêutrons. O cruzamento do perfil de nêutrons com o de densidade mostrou boas correlações. Tudo isso reforça a importância da avaliação cruzada e no cuidado da definição da suíte de sensores a ser adotada.

Com relação à presença de material hidratado superficial, percebem-se várias perturbações nos perfis de nêutrons. Contudo, não foi possível concluir se as alterações observadas possuem uma relação direta da hidroxila presente em minerais hidratados – goethitas e argilo-minerais – ou se são fruto da presença de água em poros inter e intra-partículas. O melhor entendimento desse processo requer estudos mais detalhados e sistematizados, podendo, inclusive, haver a participação de ambos os processos.

Dentre os furos analisados, nenhum deles apresentou horizontes hematíticos, o que acabou por impedir a avaliação da influência desse tipo de rocha nos perfis estudados.

De maneira geral, na análise em itabiritos foi possível observar que a influência da compacidade da rocha nos perfis de densidade, foi maior do que a concentração de minerais pesados (ricos em ferro), mostrando uma tendência de aumento da densidade com a profundidade, mesmo havendo uma redução do teor em ferro. Somente em alguns pontos localizados, foram observadas pequenas alterações nos perfis de densidade e sônico quando na presença de passagens mais ricas em ferro.

Valores precisos de densidade são de suma importância na indústria do minério de ferro, pois a cubagem de um depósito é definida em massa (t) e jazidas de classe mundial podem atingir uma escala de volume da ordem de centenas de milhões de

metros cúbicos. Assim, pequenas variações de densidade apresentam grande impacto na tonelagem final estimada.

Métodos tradicionais de obtenção da densidade são realizados a partir da coleta de amostras superficiais e de testemunhos e isso acarreta dois problemas básicos: a informação é pontual e o material é retirado de sua condição natural de confinamento, causando um relaxamento com conseqüente aumento da porosidade e redução da densidade original. Essa questão torna-se ainda mais crítica ao se analisar litologias friáveis e/ou argilosas. A perfilagem geofísica de densidade realiza leituras *in situ*, gerando condições para melhores estimativas, com possível redução da margem de erro. A indústria do petróleo faz uso dessa técnica de forma rotineira, mas na mineração, esse processo ainda não se encontra muito difundido.

O campo de investigação da aplicabilidade da perfilagem geofísica na mineração de ferro mostrou-se vasto e bastante promissor, ficando evidente que os perfis se complementam e a metodologia de informação comparativa mostrou-se bastante satisfatória. Contudo, um aprofundamento dessa base conceitual se faz necessária. Outros métodos não avaliados, como a susceptibilidade magnética e a indução elétrica merecem ser investigados. Métodos ópticos, de aplicação direta na geotecnia, também fornecem outra linha promissora.

Além de todas as questões apresentadas, a utilização da perfilagem geofísica pode também ser útil na redução de custos e tempo com a pesquisa mineral. Essa redução baseia-se na possibilidade de ampliação da malha de sondagem testemunhada e substituição por furos de sonda roto-percussivos, com a perfilagem geofísica sendo realizadas em ambas as campanhas e servindo de suporte na interpretação geológica de subsuperfície. Isso tem como base o fato de que camadas litológicas distintas possuem uma assinatura geofísica característica, possibilitando a correlação entre os furos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. (1998). *Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco craton region, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero*. Precambrian Research, n° 90, p. 29-58.

ALMEIDA L. G.; ENDO I., FONSECA M. A. (2002). *Sistema de nappes na porção meridional do Quadrilátero Ferrífero, MG*. Sociedade Brasileira de Geologia, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, *Anais*, p. 615.

ALMEIDA L. G. (2004). *Evolução Tectônica da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais*. Dep. de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de mestrado, 110 p.

ALMEIDA L. G.; CASTRO P. T.; ENDO I.; FONSECA M. A. (2005). *O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: Uma Revisão Estratigráfica*. Rev. Bras. Geoc., n° 35, v. 2, p. 177-186.

ALMEIDA, T. (2011). *A perfilagem geofísica gama-gama em depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero – uma ferramenta para medições de densidade de rochas*. Dissertação de Mestrado, PPGEM / UFRS, 164 p.

AMORIM L. Q.; ALKMIM, F. F. (2011). *New Ore Types from the Cauê Banded Iron Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil – Responses to the Growing Demand*. Iron Ore Conference, Perth, Western Austrália, p. 59-71.

AMERICAM PETROLEUM INSTITUTE (API). (1974). *Recommended practice for standart calibration and format for nuclear logs*. API rept. no. 33, API, Dallas, Texas.

ASFAHANI, J. (2002). *Low activity spectrometric Gamma-Gamma borehole logging tool for the metalliferous industry*. Earth Science, v. 13, p. 1-18.

BALTOSSER, R. W.; LAWRENCE, H. W. (1970). *Application of well logging techniques in metallic mineral mining*. Geophysics, v. 38, p. 143-152.

BUTT, A. L.; FULLAGAR, P. K. (2001). *Stratigraphic Log Interpretation at Tandicoogina*. Aseg, application of geophysical logging to metalliferous mining, 21 p.

CARRASQUILLA, A. G. (2012). *Perfilagem de poços*. Notas de Aula.

CHEMALE F. Jr.; ROSIÈRE C. A.; ENDO, I. (1994). *The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. *Precambrian. Research*, n°65, p. 25-54.

CONGER, R. W. (1996). *Borehole geophysical logging for water-resources investigations in Pennsylvania*. US Department of the Interior, US Geological Survey, Fact Sheet 218-95, 4p.

DERBY O. (1906). *The Serra do Espinhaço, Brazil*. *Jour. Geol.*, n°14, v. 3, p. 374-401.

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

ENDO I. (1997). *Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no Interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes, Minas Gerais*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP), Tese de Doutorado, 243p.

ENDO, I.; MARIANO, D. F.; ROSSI, D. Q. (2012). *Estratigrafia e arcabouço estrutural dos Distritos Ferríferos de Fábrica Nova e Complexo Fazendão, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Convênio Vale / UFOP / Fundação Gorceix. Relatório interno. 122p.

FONSECA, L. (2000). *Caracterização mineralógica do ROM (Run of Mine) da Mina de Capanema*. Relatório Interno Minas da Serra Geral (MSG). 20p.

FOURMAINTRAUX, D. (1976). *Characterization of rock*. Laboratory test, Chapter IV.

FRANCO A. S. P. (2003). *Geometria e evolução tectônica do sinclinal Ouro Fino. Quadrilátero Ferrífero, MG*. Departamento de Geologia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 102 p.

FULLAGAR, P.K.; FALLON, G.N. (1997). *Geophysics in metalliferous mines for ore body delineation and rock mass characterisation*. Proceedings of Exploration 97: Fourth decennial international conference on mineral exploration. Edited by A.G. Gubins, p. 573-584.

GIRÃO NERY, G., (2004). *Perfilagem Geofísica*. Hidrolog – Serviços de Perfilagem Ltda. 183 pp.

GOODMAN, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons, New York, USA, 562p.

GORDON, R. L.; LERICHE, T.; MacMAHON, S. (2000). *Improving grade control through borehole geophysics: Case study from Iron Ore Company of Canada*. Quantec Geoscience Ltd. 10p.

GROSSI SAD, J. H. e VALENTE, J. M. G. (2007). *Delineação de Depósitos Minerais*. Geosol e Fundação Victor Dequech, Belo Horizonte / MG, 271p.

GUERRA, G. J. Z. (2011). *Caracterização geomecânica de maciços rochosos intemperizados*. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, Dissertação de Mestrado, 186p.

GUIMARÃES D. (1951). *Arqui-Brasil e sua evolução geológica*. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. Boletim. 88. 314p.

GUIMARÃES, F. P.; MASSAHUD, J. S.; VIVEIROS, J. F. M. (1986). *A Mina de ferro de Capanema, na parte central do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Principais Depósitos Mineraiis do Brasil. DNPM/CVRD, Brasília. Vol. II, p. 97-101.

HARDER E. C.; CHAMBERLIN R. T. (1915). *The geology of central Minas Gerais, Brazil*. *Jour. Geol.*, n° 23, v. 4, p. 341-378.

HASHIZUME, B. K.; HORTA, R. M.; D'ASSUMPÇÃO, L. F. G. (2001). *Avaliação geometalúrgica da Pilha WH para produção de granulados – Mina de Capanema – MSG*. Relatório Interno MSG / Vale. 41p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. (2012). *Informações e análises da economia mineral brasileira*. 7ª Edição. Brasília. 68p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. (2011). *Controle tecnológico dos concretos com diferentes densidades empregados na execução dos blocos de calibração da sonda de perfilagem de raios gama-gama*. 29p. (Relatório Interno Vale).

JAMES, H.L. (1954). *Sedimentary facies of iron-formation*. *Economic Geology*, n° 49, p. 235-293.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. (2002). *Geofísica de Exploração*. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 438p.

KILLEEN, P. G. (1997). *Borehole Geophysics: Exploring the third dimension*. Proceedings of Exploration 97: Fourth decennial international conference on mineral exploration. Edited by A.G. Gubins, p. 31-42.

MARSHAK S.; ALKMIM F. F.; EVANGELISTA H. J. (1992). *Proterozoic crustal extension and the generation of dome and keel structure in an granite-greenstone terrane*. *Nature*, n° 357, p. 491-493.

MINTY, B., (1997). *Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry*. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, n°17, v.2, p. 39-50.

MOON C. J.; WHATELEY M .K. G.; EVANS A. M. (2006). *Introduction to mineral exploration*. 2nd Edition. Blackwell Publishing. 469p.

OLIVEIRA, L. J.; SALVADORETTI, P.; WEBBER, T., (2007). *Aplicação de perfílagem geofísica em furos de sondagem nos alvos Dois Irmãos e Maquiné – Cia Vale do Rio Doce / MG*. Fundação Luiz Englert, Porto Alegre, 195 p. (Relatório Interno Vale).

OLIVEIRA, L. J.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. C.; SALVADORETTI, P.; BASTIANI, G. A.; CARVALHO JR., J. A. (2008a). *Inferência de variáveis tecnológicas de minério com uso de perfílagem geofísica em mineração de carvão – Mina do Seival, RS – Brasil*. Brasil Mining Site, 13 p.

OLIVEIRA, L. J., SOUZA, F. S. DE, COSTA, J. F. C. L., KOPPE, J. C.; SALVADORETTI, P., BASTIANI, G. A., CARVALHO JÚNIOR, J. A. C. (2008b) *Benefício do adensamento amostral com perfílagem geofísica no planejamento de lavra a curto prazo*. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, n°.61, v.3, p. 317-321.

OLIVEIRA, S. J.; UENDRO CARLOS, D.; PARANHOS, G.; CARMO, R.; BRAGA, M. A. (2011). *Perfílagem geofísica gama-gama como ferramenta para auxílio na descrição e interpretação geológica*. 2° seminário Vale de Geologia do Minério de Ferro e 1° de Espeleologia. Belo Horizonte.

PEÑA, N. (2013). *Acoustic & optical televiewer*. Weatherford, Wireline Slimline Services, 18p. (Relatório interno Vale).

PEREIRA, W. R. (2012). *Perfilagem Geofísica*. Apresentação Setorial VALE/GAEMF, Nova Lima, 26 slides. (Relatório interno)

PFLUG, K. A.; KILLEEN, P. G.; MWENIFUMBO, C. J. (1997). *Application of borehole geophysics to gold exploration*. Proceedings of Exploration 97: Fourth decennial international conference on mineral exploration. Edited by A.G. Gubins, p. 717-720.

RASHIDI, B.; HARELAND, G.; SHIRKAVAND, F. (2009). *Lithological determination from logs*. Canadian International Petroleum Conference (CIPC), Calgary, Alberta, Canada. 8p.

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, n°2, v.1, p. 1-11.

RIDER, M., (2002). *The Geological interpretation of well logs*. Whittles Publishing, Malta, 280 p.

SACCO, T.; SUSLICK, S. B.; VIDAL, A. C. (2007). *Modelagem Geológica 3D do Campo de Namorado Utilizando Dados de Perfilagem de Poços Verticais*. In: 4°, PDPETRO, Campinas (SP). *Anais*.

SHORE, M. (2010). *Physical properties measurements for mineral exploration geophysics*. SEG Denver Annual Meeting, USA. p. 4414-4417.

SPIER, C. A.; OLIVEIRA, S. M. B.; SIAL, A. N.; RIOS, F. J. (2007). *Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Precambrian Research n°152, p.170-206.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, United Kingdom, 770 p.

THOMPSON, G. R. & TURK, J. (1997). *Introduction to Physical Geology*. Brooks Cole, 2º Ed., 432p.

VAZ DE MELO, M. T. & SEABRA JR, A. A. G. (2000). *Geologia Econômica do Jazimento de Minério de Ferro da Mina de São Vicente, Itabirito, MG*. Minas da Serra Geral S/A. Relatório Interno. 69p.

ZAVAGLIA, G. (1995). Condicionantes geológicos do comportamento dos minérios de ferro do Depósito de Tamanduá (MG) no processo metalúrgico de redução direta. Departamento de Geologia, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO 1 – Perfilagem geofísica do furo FD-29

7.2. ANEXO 2 – Perfilagem geofísica do furo FD-31

7.3. ANEXO 3 – Perfilagem geofísica do furo FD-28