

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGE3M)**

**OLUWAFEMI SHEKONI AYODEJI**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE APLICABILIDADE DE PERFIS GEOFÍSICOS DE  
RESISTIVIDADE EM CARVÃO**

**Porto Alegre**

**2015**

**OLUWAFEMI SHEKONI AYODEJI**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE APLICABILIDADE DE PERFIS GEOFÍSICOS DE  
RESISTIVIDADE EM CARVÃO**

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica. Área de Concentração: Tecnologia Mineral*

*Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa*

*Coorientador: Prof. Dr. Paulo Salvadoretti*

**Porto Alegre**

**2015**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

**OLUWAFEMI SHEKONI AYODEJI**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE APLICABILIDADE DE PERFIS GEOFÍSICOS DE  
RESISTIVIDADE EM CARVÃO**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa**

**Orientador**

**Prof. Dr. Paulo Salvadoretti**

**Coorientador**

**Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann**

**Coordenador do PPGE3M**

**Aprovado em: 13/11/2015**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Prof. Dr. Jair Carlos Koppe– PPGE3M/UFRGS**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vlória Cristina de Souza– PPGE3M/UFRGS**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vanessa Cerqueira Koppe– DEMIN/UFRGS**

## AGRADECIMENTOS

Ao fim de toda jornada é muito importante agradecer às pessoas que nos ajudaram, diretamente ou indiretamente.

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder esta conquista.

Aos meus pais, Elder e Mrs J.A. Ayodeji, pelo apoio desde quando nasci e por me darem uma educação sólida.

À minha esposa, Abimbola Kemi Ayodeji, por sua paciência ao longo desse tempo ao meu lado, me dando força e apoio para continuar. Muito obrigado por tudo.

Ao meu tio e primo (Enoch Omoniyi e Ifekayode Isaac Omoniyi), por terem me ajudado nos períodos de dificuldades, pelo apoio financeiro em minha chegada ao Brasil e pelos conselhos dados.

Aos professores, especialmente Prof. Paulo Salvadoretti e Prof. João Felipe C. L. Costa, pela oportunidade de aprendizado e pela paciência durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e colegas do laboratório, por compartilharam suas experiências e enriquecerem as aulas com discussões interessantes. Reconhecimento especial ao meu parceiro George Gasper por sua disponibilidade sempre para discutir e resolver as tarefas intensas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM) pelo auxílio financeiro.

À empresa Copelmi Mineração, principalmente o Geólogo Gustavo Bastiani, pelo apoio na realização dos trabalhos de campo e disponibilização de informações importantes.

*Few days to go  
Go nowhere someone has gone before  
Where no one else will go today  
You can go in search for answers  
Only to find more questions  
You might discover something unfamiliar  
Halfway around the world  
Or uncover something unexpected  
Far close to the home  
Sometime you might need to look back  
To see how you got here  
And where you might be heading  
And just when you think your dream has reach the end  
You will be surprise to find it's only just the beginning  
But you will keep going  
Because it's your dream  
Wherever, it goes...*

CNN Inspiration

## RESUMO

Este estudo apresenta a comparação e discussão entre registros de perfilagem geofísica obtidos por três sondas elétricas que medem resistividades de litologias. Uma análise detalhada foi feita para detectar qual destas sondas utilizadas proporciona a melhor opção em termos de identificação das camadas de carvão e resolução vertical. As sondas elétricas utilizadas foram: *guard log* (GLOG), *single point resistance* (SPR) e *induction log* (IND).

Para auxiliar na comparação entre esses diferentes perfis, outros dois registros geofísicos importantes foram incluídos: radiação gama natural (GN) e *optical televiewer* (OPTV), os quais ajudaram a identificar os estratos de carvão. No caso específico do OPTV, quando a situação é favorável, ele permite identificar os estratos de carvão e verificar a resolução vertical dos demais registros, em função da excelente resolução vertical. As imagens produzidas pelo OPTV podem, nas circunstâncias adequadas, servir como testemunho digital, para complementar ou mesmo substituir as amostras de sondagem com recuperação de testemunhos.

Neste estudo, foram analisados dados obtidos em 4 depósitos de carvão diferentes: Área B3, Calombo, Cerro e Seival. Todos os depósitos de carvão acima citados situam-se no estado do Rio Grande do Sul (RS) - Brasil. Ao todo, 15 furos foram apresentados e discutidos. Destes, 13 são furos de sondagem com recuperação de testemunhos, enquanto que os dois restantes são furos de desmonte. As descrições geológicas dos 13 furos de sondagens são as informações principais utilizadas como parâmetro de controle nas comparações entre os perfis geofísicos, enquanto que as imagens OPTV serviram como uma alternativa para verificar a resolução vertical dos perfis elétricos.

Ao final das análises, verificou-se que o dispositivo *guard-log* (GLOG) tende a ter o melhor desempenho no aspecto de identificação litológica, demonstrando uma capacidade superior em relação aos demais arranjos em termos de resolução vertical. Estatisticamente, ele apresentou as estimativas de espessuras mais próximas em valor, em relação às espessuras proporcionadas pelas descrições geológicas de testemunhos de sondagem.

Palavras-chave: Geofísica, Carvão, Resistividade.

## ABSTRACT

This study presents a comparison and discussion between the geophysical logs obtained by three electrical probes that measure resistivity of lithologies. A detailed analysis was carried out to detect which of these probes, provides the best option in terms of identification of coal seams and vertical resolution. The electrical probes used were guard log (GLOG), single point resistance (SPR) and induction log (IND).

To aid the comparison between the different logs, two other important geophysical logs were included: natural gamma radiation (GN) and optical televiewer (OPTV), which helped to identify the coal seams. In the specific case of OPTV, when the situation is favorable, it identifies the coal seams and check the vertical resolution of the other logs, in function of its excellent vertical resolution. The images produced by OPTV can serve, in appropriate circumstances, as digital core sample to complement or even replace the diamond drill core samples recovery.

In this study, analyzed data were obtained from four different coal deposits, which are: B3 Area, Calombo, Cerro and Seival. All the coal deposits mentioned above are located in the state of Rio Grande do Sul (RS) - Brazil. In all, 15 boreholes were presented and discussed. Out of these, 13 are boreholes with recovered core samples, while the remaining two are blastholes. The geological descriptions of the 13 boreholes are the main information used as a control parameter in comparisons against the geophysical logs, while OPTV images served as an alternative to verify the vertical resolution of the electric logs.

At the end of the analysis, it was found that the guard-log probe (GLOG) tends to have better performance in the aspect of lithological identification, demonstrating a greater capacity in comparison with the other in terms of vertical resolution. Statistically, it presented the closest estimated value in relation to the coal seams thickness provided by geological description of the recovered core samples.

Keywords: Geophysics, Coal, Resistivity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imagem ilustrando a execução de perfilagem geofísica. ....	7
Figura 2 - Uma representação gráfica de um perfil geofísico. ....	8
Figura 3 - Representação em arquivo LAS de um perfil geofísico. ....	9
Figura 4 - Uma imagem mostrando os três conceitos importante de perfilagem geofísica.....	10
Figura 5 - Imagem ilustrativa de volume de investigação esférico. ....	10
Figura 6 - Resolução vertical em uma sonda com volume de investigação esférico .....	11
Figura 7 - Efeito do furo com variação em suas dimensões sobre o valor lido pela sonda.....	11
Figura 8 - Imagens de alguns equipamentos de perfilagem. ....	12
Figura 9 - Séries radioativas naturais. ....	14
Figura 10 - Aleatoriedade das contagens (decaimentos). ....	15
Figura 11 - Exemplo de um registro de emissão de radiação gama natural. ....	17
Figura 12 - Valores médios de emissão de radiação gama natural para algumas formações... 17	
Figura 13 - Um exemplo do volume (de investigação) para obtenção da resistência. ....	19
Figura 14 - Um diagrama esquemático de funcionamento de perfilagem resistência pontual. 23	
Figura 15 - Uma típica resposta dos registros da sonda SPR de furo B3 – 72.....	23
Figura 16 - Distribuição dos eletrodos na sonda <i>guard-log</i> (A), mostrando o volume de investigação (B).....	25
Figura 17 - As linhas equipotenciais e de corrente em sondas para medir resistividade com focalizadores.....	25
Figura 18 - Uma típica resposta da sonda GLOG no furo B3 – 72. ....	26
Figura 19 - Uma típica resposta dos registros da sonda IND no furo B3 – 72, mostrando as curvas de condutividade e resistividades dos arranjos <i>short-spacing</i> e <i>long-spacing</i> .....	27
Figura 20 - Imagem coletada pela sonda OPTV.....	28
Figura 21 - Comparação de vários valores de filtro de 0, 5 e 10 respectivamente.....	30
Figura 22 - A sequência de apresentação dos registros de cada sonda: NG, GLOG, SPR, IND e OPTV.....	31
Figura 23 - Imagens ilustrativas de execuções de perfilagem de sonda OPTV <i>uphole</i> (A e C) e <i>downhole</i> (B e D). As linhas verticais escuras foram geradas por gotas de sujeira sobre o vidro da câmera OPTV. ....	35
Figura 24 - (A) e (B); Furo de desmonte e perfuratriz de desmonte respectivamente. ....	36
Figura 25 - Testemunhos recuperados dentro da caixa. ....	37

Figura 26 - Uma imagem comparativa de perfis obtido da perfilagem com a descrição geológica.....	39
Figura 27 - Localização da área de estudo B3.....	40
Figura 28 - Mapa geológico de área B3. ....	42
Figura 29 - Perfil geológico típico observado na área B3. ....	43
Figura 30 - Perfil geológica típico observado na Área Cerro.....	47
Figura 31 - Perfil geológico típico observado na Área Calombo.....	50
Figura 32 - (A) e (B): Seção estratigráfica – Jazida de carvão Candiota/Bloco Seival.....	51
Figura 33 - Teste no furo T1 (Área B-3) – Imagem comparativas de furo lavado (esquerda) e não lavado (direita).....	56
Figura 34 - Imagens do furo T1 - (A) furo lavado e (B) furo seco mostrando aparecimento de material de cor clara. ....	56
Figura 35 - Imagens de T1 - (A) furo lavado sem indicação de contraste entre litologias e (B) furo seco, com contraste de cor entre litologias. ....	57
Figura 36 - Teste no furo T2 (Área B-3) – Imagem comparativa com a iluminação nos níveis 14 e 17. Adicionalmente, a primeira coluna (esquerda) mostra o perfil gama natural (em azul) e resistividade (segunda coluna, em vermelho), ambos adquiridos com a sonda GLOG. ....	58
Figura 37 - Teste de água decantada de furo (Cal – 57) em Calombo. Notar os perfis gama natural (verde) e SPR (vermelho), marcando os estratos de carvão.....	59
Figura 38 - Teste em RA-48 com adição de flocculante. Os registros em verde e vermelho são de gama natural e SPR, respectivamente.....	60
Figura 39 - Imagem indicando o efeito de flocculante nas resistividades lidas no furo SVN-37, para comparação com outros furos próximos (SVN-36 e 38). As camadas de carvão são indicadas pelas setas pretas.....	61
Figura 40 - Análise de condutividade do fluido com flocculante. Ao esquerda, jarra com flocculante e à direita, jarra sem flocculante.....	62
Figura 41 - Imagem detalhando a camada S no furo B3-60.....	64
Figura 42 - Imagem detalhando as demais camadas em B3-60. ....	64
Figura 43 - Imagem de comparação entre SPR e AE, comprovando a sua utilidade como registro auxiliar para SPR em B3-60.....	65
Figura 44 - Imagem de sinal de resistividade em intercalações de pirita em B3-61. ....	66
Figura 45 - Repetições de sinais no registro de SPR no furo B3-61. ....	66

Figura 46 - Imagem mostrando 3 camadas de carvão (S, M1 e M2) e os correspondentes perfis geofísicos.....	67
Figura 47 - Imagens de comportamento do registro SPR em paraconglomerado (A) no furo B3-62 e (B) no furo B3-63. ....	68
Figura 48 - Imagem deslocada nos registros elétricos do furo B3-63 (com repetição de sinal para SPR).....	69
Figura 49 - Imagem não individualizada de estratos M2 e M3 no registro de GLOG B3-63..	70
Figura 50 - Imagem de deslocamento vertical menor nos registros elétricos no furo B3-66 (réplicas para SPR). ....	70
Figura 51 - Imagem de concordância de registros elétricos com testemunho em furo B3-66.	71
Figura 52 - Imagem sem deslocamento no registro de GLOG em furo B3-72 ( image de réplica para SPR).....	72
Figura 53 - Imagem de alguns estratos de carvão e siltitos bem identificados pelo GLOG em B3-72. ....	72
Figura 54 - Não reconhecimento de teto e base das camadas no registro de SPR (B3-72).....	73
Figura 55 - Identificação de nódulo de pirita no registro de SPR em furo B3-72. Nota: as escalas de apresentação dos registros elétricos são mais baixas que a média dos valores adotados em outros perfis. ....	73
Figura 56 - Imagem mostrando a dificuldade de registro IND para individualizar estratos menores que 0,5 m.....	74
Figura 57 - Imagem mostrando o registro de IND na identificação de camada maior que 0,5 m no furo B3-72.....	75
Figura 58 - Falha de GLOG por falta d'água no furo CRN-72. ....	76
Figura 59 - A identificação da camada M2 e discriminação da marga entre siltitos no furo CRN-72. ....	77
Figura 60 - O sinal de alta resistividades no registro de GLOG e IND para identificar estrato de arenito. ....	78
Figura 61 - Camada M3 não identificada no registro de IND no furo CRN-72. ....	79
Figura 62 - Imagem mostrando a dificuldade para registrar a base da camada S e o registro exagerado pelo SPR no furo CRN-81.....	80
Figura 63 - Imagem mostrando uma grande diferença entre as espessuras estimadas de registros elétricos e da sondagem no furo CRN-81.....	80

Figura 64 - Imagem de GLOG demonstrando sua eficácia para discriminar os componentes que constituem a camada M2 no furo CRN-81.....	81
Figura 65 - Imagem mostrando a dificuldade para estabelecer o contato entre a camada S e arenito no furo CRN-82.....	82
Figura 66 - Identificação de M1 (deslocado) e não identificação de M2 no furo CRN-82.....	83
Figura 67 - Imagem mostrando a transição de parte de furo seco para água no furo CAL-58B. ....	85
Figura 68 - Imagens capturadas de OPTV em (A) furo seco e (B) furo com água. ....	86
Figura 69 - Problemas no reconhecimento de estratos de carvão na imagem de OPTV.....	86
Figura 70 - Identificação da camada A no furo CAL-57.....	87
Figura 71 - Não visualização da camada de carvão A, sem a cor preta esperada. Furo CAL-57. ....	88
Figura 72 - Não visualização por OPTV de estratos de carvão S2, S3 e M. Furo CAL-57. ....	89
Figura 73 - Imagem de repetição de sinais para identificação de (A) camada S3 e (B) camada M no furo CAL-57.....	90
Figura 74 - Imagem mostrando perfis completos utilizados no furo SVN-37. ....	91
Figura 75 - Camadas abaixo de 74,3m não visíveis pelo OPTV no furo SVN-37.....	92
Figura 76 - Identificação de camadas no registro de GLOG no furo SVN-37.....	93
Figura 77 - Imagem indicativa de resolução vertical de GLOG da ordem de 10cm no furo SVN-37. ....	94
Figura 78 - Imagem de registro do GLOG como um bom discriminador de <i>partings</i> no furo SVN-37.....	94
Figura 79 - Imagem mostrando a dificuldade do registro de IND para individualizar as camadas S5 e S4 no furo SVN-37.....	95
Figura 80 - Imagem apresentando a dificuldade do registro de IND ao mostrar intercalações de estéril entre estratos de carvão no furo SVN-37.....	96
Figura 81 - Imagem mostrando uma espessura estimada do <i>parting</i> menor que a proporcionada por testemunho no registro de SPR no furo SVN-37. ....	96
Figura 82 - Imagem ilustrando a não identificação da camada I no furo SVN-37.....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de alguns parâmetros geofísicos para diferentes <i>ranks</i> do carvão .....	6
Tabela 2 - Informações de cada sonda utilizada neste trabalho. ....	7
Tabela 3 - Velocidades típicas de perfilagem.....	16
Tabela 4 - Exemplo de valores de resistividade em alguns minerais e rochas.....	20
Tabela 5 - A padronização de escalas e unidades dos perfis. ....	31
Tabela 6 - A tabela de coleta de dados indicando os nomes de furos, perfis coletados e data coletados. ....	53
Tabela 7 - Estratos de carvão em furos de sondagem na Área B3 e espessuras estimadas de carvão definidos por descrição geológica e perfis de resistividade. ND = Registro Não Disponível; NV = Contato Litológico Não Visível. ....	63
Tabela 8 - Estratos de carvão para os furos de sondagem na Área B3 e espessuras definidas na descrição geológica e perfilagem geofísica. ND = Perfil geofísico não disponível; NV = estrato não visível na perfilagem.....	76
Tabela 9 - Estratos de carvão dos furos de sondagem na companhia Calombo e os resultados obtidos de espessuras estimadas nos registros elétricos em relação às descrições geológicas. ND = perfil geofísico não disponível; NV = estrato não visível na perfilagem.....	84
Tabela 10 - Estratos de carvão do furo SVN-37 em Seival e as espessuras estimadas pelos registros elétricos. S/N=Camada sem nome. ....	91
Tabela 11 - Percentagem de sucesso na detecção de estratos de carvão para as sondas GLOG, IND e SPR. Obs: ND = Perfil não disponível, NI = Camada Não Identificada, F/A = Falta de Água, R/I = Registro Incompleto. ....	98
Tabela 12 - Estatísticas de diferenças entre espessuras de estratos por perfilagem e por análise de testemunhos de sondagem. NV = estrato não visível na perfilagem. ....	99
Tabela 13 - Estatísticas de diferenças entre espessuras de estratos por perfilagem e por análise de testemunhos de sondagem. NV = estrato não visível na perfilagem, ND = Perfil geofísico não disponível.....	100

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO .....	3
1.2. ETAPAS .....	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DESSA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>2. FUNDAMENTOS DE PERFILAGEM GEOFÍSICA E SUA APLICAÇÃO A DEPÓSITOS DE CARVÃO</b> .....	5
2.1. CONCEITOS BÁSICOS .....	6
2.2. PERFILAGEM GEOFÍSICA EM GERAL .....	12
2.3. PERFILAGEM NUCLEAR .....	13
<b>2.3.1. Aspectos Fundamentais</b> .....	13
<b>2.3.2. Removendo os Efeitos Estatísticos</b> .....	15
<b>2.3.3. Sonda para Medição da Emissão Natural de Raios Gama</b> .....	16
<b>2.3.4. Princípio de funcionamento da sonda de Gama Natural</b> .....	17
<b>2.3.5. Unidades de medida dos detectores</b> .....	18
2.4. PERFILAGEM ELÉTRICA .....	18
<b>2.4.1. Resistência e Resistividade</b> .....	18
<b>2.4.2. Influência da Litologia</b> .....	20
<b>2.4.3. Princípio de funcionamento das sondas de resistividade</b> .....	21
2.5. FILMAGEM DE FUROS DE SONDAGEM .....	27
<b>2.5.1. Princípio de funcionamento da sonda OPTV</b> .....	28
<b>2.5.2. Tratamento do fluido contido no furo de sondagem</b> .....	29
2.6. PADRONIZAÇÃO DOS PERFIS .....	29
<b>2.6.1. Filtros</b> .....	29
<b>2.6.2. Shift para Perfis</b> .....	30
<b>2.6.3. Escalas e Unidades</b> .....	30
<b>2.6.4. Organização dos Perfis</b> .....	31
2.7. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO E AFERIÇÕES EM CAMPO .....	31
<b>2.7.1. Verificação da Profundidade</b> .....	32
2.8. ARQUIVAMENTOS DOS REGISTROS DE PERFILAGEM .....	33
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	34
3.1. PERFILAGEM DOS FUROS .....	34

<b>3.1.1. Execução da Perfilagem Geofísica/Coleta de dados</b> .....	34
<b>3.1.2. Furos de Desmonte</b> .....	36
<b>3.1.3. Furos de Sondagem com Recuperação de Testemunho</b> .....	37
<b>3.2. TRATAMENTO DOS DADOS</b> .....	37
<b>3.2.1. Reconhecimento de estratos nos perfis geofísicos</b> .....	38
<b>4. BANCO DE DADOS E LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO</b> .....	40
4.1. ÁREA DE ESTUDO, DADOS DE SONDAÇÃO E PERFILAGEM GEOFÍSICA...	40
4.2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO B3 .....	40
<b>4.2.1. Geologia Local</b> .....	41
4.3. LOCALIZAÇÃO DE ÁREA DE ESTUDO DE CERRO .....	45
<b>4.3.1. Geologia local</b> .....	45
4.4. LOCALIZAÇÃO DE ÁREA DE ESTUDO DE CALOMBO .....	48
<b>4.4.1. Geologia Local</b> .....	48
4.5. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DE SEIVAL .....	50
<b>4.5.1. Geologia da Bacia Sedimentar de Candiota</b> .....	50
4.6. APRESENTAÇÃO DE DADOS COLETADOS .....	53
<b>5. ANÁLISE DE DADOS</b> .....	55
5.1. ANÁLISE DE IMAGENS OPTV EM Furos de Desmonte.....	55
5.2. ANÁLISE DE IMAGENS DE OPTV EM Furo com água decantada .....	58
5.3. ANÁLISE DE IMAGENS DE OPTV EM Furo com adição de Floculante.....	59
<b>5.3.1. Efeito do Floculante na Medida de Resistividade dos Estratos</b> .....	60
5.4. ANÁLISE DE DADOS DE SONDAÇÃO TESTEMUNHADA.....	62
<b>5.4.1. Área B3</b> .....	62
<b>5.4.2. Área do Cerro</b> .....	75
<b>5.4.3. Área do Calombo</b> .....	83
<b>5.4.4. Área de Seival</b> .....	90
5.5. RESULTADOS .....	97
<b>5.5.1. Resolução vertical de GLOG</b> .....	99
<b>5.5.2. Resolução vertical de SPR</b> .....	100
<b>5.5.3. Resolução vertical de IND</b> .....	101
<b>5.5.4. Imagens de OPTV</b> .....	101

<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	102
6.1. CONCLUSÕES.....	102
6.2. RECOMENDAÇÕES .....	103
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	104

## 1. INTRODUÇÃO

A técnica de perfilagem geofísica é bastante usada na mineração de carvão, em especial por sua capacidade de discriminar estratos carbonosos e pela potencialidade na substituição das análises laboratoriais feitas para determinados parâmetros físicos e químicos, de interesse na elaboração de projetos de lavra e beneficiamento de carvão. Análises laboratoriais são, geralmente, efetivadas a partir de amostras obtidas por sondagem rotativa com recuperação de testemunhos, enquanto que a perfilagem geofísica é executada ao longo de furos não necessariamente feitos com esta finalidade. A perfilagem registra variações de propriedades das rochas interceptadas pelos furos e, eventualmente, mostra registros que se correlacionam com as litologias presentes no depósito. Assim, nas condições adequadas, esta técnica é capaz de identificar contrastes de propriedades físicas e químicas das rochas, podendo ser usada para estimar características, ajudando a delinear corpos de minério.

No caso de depósitos sedimentares de carvão, ela serve primariamente para delinear as interfaces carvão/estéril (HOFFMAN *ET AL.*, 1982; BORSARU E ASFAHANIA, 2007), auxiliando no estabelecimento da correlação estratigráfica, além de gerar estimativas de parâmetros de qualidade e de comportamento geomecânico. No planejamento de produção de mina no curto prazo, em virtude da dificuldade de operacionalização da sondagem testemunhada, pode-se executar a perfilagem geofísica em furos de desmonte de rocha, como alternativa para obtenção de contatos litológicos e as demais estimativas acima citadas.

Diversos perfis geofísicos registram contrastes existentes entre carvão e os materiais estéreis adjacentes, notadamente os perfis de gama natural, resistividade, sônico, *density* e *neutron log* (HOFFMAN *ET AL.*, 1982; HEARST *ET AL.*, 2000). Aspectos negativos quanto ao uso do *density* e *neutron log* relacionam-se à necessidade de emprego de fontes radioativas nestas sondas (Césio-137 para o *density* e Amerício-Berílio para o *neutron log*), o que traz consigo preocupações ambientais (sempre existe a possibilidade de aprisionamento definitivo das sondas e das fontes em furos de sondagem) e operacionais (o manuseio da fonte radioativa requer pessoal credenciado e cuidados especiais de segurança).

O teor de cinzas de uma camada de carvão, o qual representa a percentagem em massa do resíduo de combustão, é um exemplo de parâmetro quantitativo que pode ser previsto por perfilagem geofísica. O teor de cinzas está relacionado à composição mineralógica do carvão e a técnica de perfilagem mais utilizada na sua determinação tem sido o *density log*, desenvolvido industrialmente na década de 70 (BORSARU *ET AL.*, 1985). O perfil *density* é usado

geralmente para delinear as camadas de carvão e medir sua massa específica. O teor de cinzas do carvão é estimado a partir da correlação existente entre massa específica e conteúdo de cinzas.

O perfil de resistividade também é capaz de caracterizar os carvões em termos do teor de cinzas, em certos casos. Segundo KAYAL E DAS (1981), a resistividade do carvão varia com o grau de carbonização (*rank*). Assim, KAYAL E DAS (1981) basearam seu trabalho em carvões indianos sub-betuminosos a betuminosos e investigaram a existência de correlação entre teor de cinzas e os registros de gama natural ou resistividade. Os contrastes de resistividade observados em perfilagem geofísica de carvão podem ser capazes, algumas vezes, de refletir as variações nos teores de cinzas (BOND *ET AL.*, 1971). Para estes autores, a resistividade aumenta com a redução do teor de cinzas presente nas camadas de carvão de um mesmo *rank*.

Nos depósitos de carvão brasileiros, especificamente no Rio Grande do Sul, também se observa boa correlação entre massa específica, cinza e poder calorífico, como se verifica em relatos de aplicação do *density log* (WEBBER, 2008). Entretanto, o uso do *density log*, assim como ocorre com os demais perfis, ainda não se popularizou no RS, em função de diversos fatores, entre eles o pequeno número de mineradores de carvão existentes no estado (o que leva à ausência de equipes de perfilagem que disponibilizam esta sonda) e também à inexistência de uma infra-estrutura adequada para manuseio/armazenamento de fontes radioativas nas empresas interessadas. Desta forma, os trabalhos de perfilagem, quando executados, fazem uso das sondas gama natural e resistividade.

Existem diversas configurações (arranjos) diferentes de sensores de perfilagem para a medida da resistividade de estratos. Conforme AFONSO (2014), a escolha correta do sensor de resistividade pode proporcionar a melhor capacidade de discriminação dos estratos finos de carvão entre as diversas sondas de perfilagem geofísica disponíveis atualmente.

Na presente situação, existe o problema de identificação dos estratos finos nos depósitos de carvão estudados. Nestes depósitos, há estratos variando de aproximadamente 5cm até quase 4 metros de espessura, que precisam ser discriminados pela sondagem, o que nem sempre é possível, em função das perdas de recuperação. A perfilagem geofísica ajuda muito nesse processo, complementando e proporcionando maior confiabilidade aos dados de sondagem. Assim, este trabalho dedica-se à verificação de qual sonda de resistividade, entre três modelos comumente usados para este fim (*guard-log*, SPR e Indução), apresenta a melhor resolução vertical possível para discriminar estratos de carvão fino.

Este trabalho utiliza dados coletados em campo, obtidos a partir de depósitos de carvão situados na região sul do Brasil, para efetuar as comparações entre perfis geofísicos de resistividade.

### 1.1. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação apresenta os seguintes objetivos:

- Analisar a aplicabilidade de diferentes formas de medida de resistividade elétrica em estratos de carvão *in situ*. No caso, serão comparados três diferentes dispositivos de registro da resistividade dos estratos carbonosos: *guard-log*, *single point resistance* e *induction log*. A análise será baseada na capacidade de resolução vertical das sondas, mas também nas questões operacionais relacionadas com seus usos (presença ou não de fluido nos furos e sua resistividade, bitola dos furos, etc.).

- Secundariamente, outro objetivo de interesse aqui é avaliar se as imagens geradas pela sonda OPTV podem auxiliar na detecção dos estratos de carvão e na resolução vertical das sondas de resistividade.

### 1.2. ETAPAS

Neste trabalho, três sondas de perfilagem foram utilizadas: *Focussed Electric Probe* (*Guard-Log*), *Induced Polarisation Probe* (IP) e *Dual Focussed Induction Probe* (IND). Estas sondas permitem obter-se medidas de resistividade elétrica das litologias, e foram produzidas pelo mesmo fabricante (Robertson Geologging LTD). Cada uma destas sondas possui também um sensor de radiação gama natural acoplado.

Além das sondas acima citadas, alguns furos de sondagem permitiram a coleta simultânea de imagens com uma sonda do tipo *Optical Televiewer* (OPTV), o que serviu como forma complementar de identificação dos estratos carbonos e também como teste desta sonda em condições diversas (adição de água nos furos, clarificação do fluido, etc.), uma vez que as camadas de carvão podem eventualmente ser identificadas por contrastes de coloração. A camada de carvão apresenta uma coloração mais escura, que a distingue dos outros estratos presentes no seu ambiente geológico característico.

A metodologia empregada para alcançar os objetivos foi a seguinte:

- Estudar a técnica de perfilagem geofísica e as suas aplicações;
- Acompanhar campanhas de sondagem com recuperação de testemunho, objetivando ter uma visão do processo, suas limitações e fontes de erro;
- Realizar a perfilagem geofísica nos furos de sondagem e furos de desmontes (coleta de dados);
- Estabelecer regras para a definição de espessuras das camadas de carvão, verificando as particularidades e os cuidados envolvidos nessa operação;
- Comparar os registros de resistividade obtidos pelas diferentes sondas, em termos da capacidade de detecção dos estratos carbonosos e respectiva resolução vertical.

### 1.3. ORGANIZAÇÃO DESSA DISSERTAÇÃO

Os capítulos dessa dissertação estão organizados na forma seguinte:

- O capítulo 2 apresenta os conceitos teóricos básicos relacionados à perfilagem geofísica aplicada à detecção de estratos de carvão com uso de sensores de resistividade, gama natural e imagens de OPTV;
- O capítulo 3 trata da metodologia utilizada para aquisição, registro e reconhecimento das camadas de carvão para formação do banco de dados;
- O capítulo 4 mostra a descrição das áreas de estudo (Área B3, Cerro, Calombo e Seival);
- O capítulo 5 trata da análise dos dados coletados nos depósitos de interesse;
- O capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTOS DE PERFILAGEM GEOFÍSICA E SUA APLICAÇÃO A DEPÓSITOS DE CARVÃO

Os primeiros trabalhos de perfilagem geofísica em carvão foram realizados por Conrad Schlumberger, na França, em 1928, usando-se sondas capazes de medir a resistividade das rochas.

Como minério, o carvão contém alto grau de carbono e hidrogênio (seus elementos de principal interesse) e sua densidade é baixa, de acordo com o *rank* (FIRTH, 1999). Em ordem crescente, o *rank* do carvão é: linhito, sub-betuminoso, betuminoso e antracito, dependendo do grau de solidificação da matéria orgânica original. Carvões de baixo *rank* (p.ex. linhito) podem ter uma fração de água (em volume) tão elevada quanto 0,6; o conteúdo de água diminui com o aumento do *rank*. Antracito tem massa específica da ordem de  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , linhito em torno de  $1,1$  ou mesmo tão baixa quanto  $0,7 \text{ g/cm}^3$ ; o tipo betuminoso fica entre estes extremos.

O carvão contém impurezas tais como sílica, alumina, óxido de ferro, entre outras. Essas impurezas tornam-se resíduos quando o carvão é queimado (HEARST ET AL, 2000). As impurezas são conhecidas como “cinzas”. O teor de cinzas aumenta linearmente com o aumento da densidade – diferentes *rank* de carvão exibem diferentes relações de cinza e densidade (FIRTH, 1999). A norma de classificação de litotipos do carvão adotada neste trabalho é a Australian Standard (1993).

Vários perfis geofísicos são usados para identificar carvão, estabelecer o *rank* e determinar o conteúdo de cinzas (HEARST ET AL, 2000; GASPER, 2012). A Tabela 1 mostra algumas respostas geofísicas para diferentes ranks de carvão.

- **Resistividade:** a alta resistividade tem sido frequentemente usada para identificação de carvão. O carvão do tipo betuminoso realmente apresenta altas resistividades, mas linhito e antracito podem mostrar valores muito baixos (REEVES, 1981). De fato, resistividades do linhito podem decrescer várias ordens de grandeza, conforme a presença de água (de 104 a 12 ohm-m, quando a umidade varia de 0,1 a 0,6). Desta forma, resistividade deve ser usada com cuidado em função da ampla faixa de variação.

Tabela 1 - Valores de alguns parâmetros geofísicos para diferentes *ranks* do carvão

<b>Ranks</b>	<b>GN (API)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistividade (ohm-m)</b>
Antracito	10-30	1.5-1.7	2-8
Antracito	-	1.4-1.8	-
Antracito	-	1.51	-
Betuminoso	20-45	1.2-1.4	50-200
Betuminoso	-	1.3-1.5	-
Betuminoso	-	1.24	-
Sub-betuminoso	20	1.4	-
Linhito	0-25	1.05-1.25	2-10000
Linhito	-	0.7-1.5	-
Linhito	-	1.23	-

Fonte: Hearst *et al.* (2000)

- **Gama Natural:** a maior parte dos carvões contém pouco ou nenhum potássio e tório, e seus perfis de GN registram valores muito baixos. Entretanto, alguns carvões apresentam quantidades apreciáveis de urânio, produzindo registros anormalmente elevados de GN. Deste modo, embora uma baixa contagem de GN seja um bom indicador de carvão e uma excelente forma de distinção entre folhelhos posicionados intermediariamente, uma alta leitura de gama natural não indica necessariamente a ausência de carvão.

## 2.1. CONCEITOS BÁSICOS

A técnica de perfilagem geofísica consiste na passagem de sensores dentro de um furo de sondagem, efetuando medições de várias propriedades (físicas e química) de solos e rochas ao redor de furo em questão (Figura 1). A medição dos parâmetros pode ser obtida na descida ou na subida da sonda ao longo da profundidade. Algumas sondas são especificamente fabricadas para medir mais de um parâmetro ao mesmo tempo, como é o caso das sondas usadas no presente estudo. As características físicas das sondas diferem entre si, de acordo com o princípio de funcionamento de cada equipamento. A Tabela 2 apresenta as especificações físicas de cada sonda utilizada neste trabalho.

Figura 1 - Imagem ilustrando a execução de perfilagem geofísica sem escala (Oliveira, 2005).

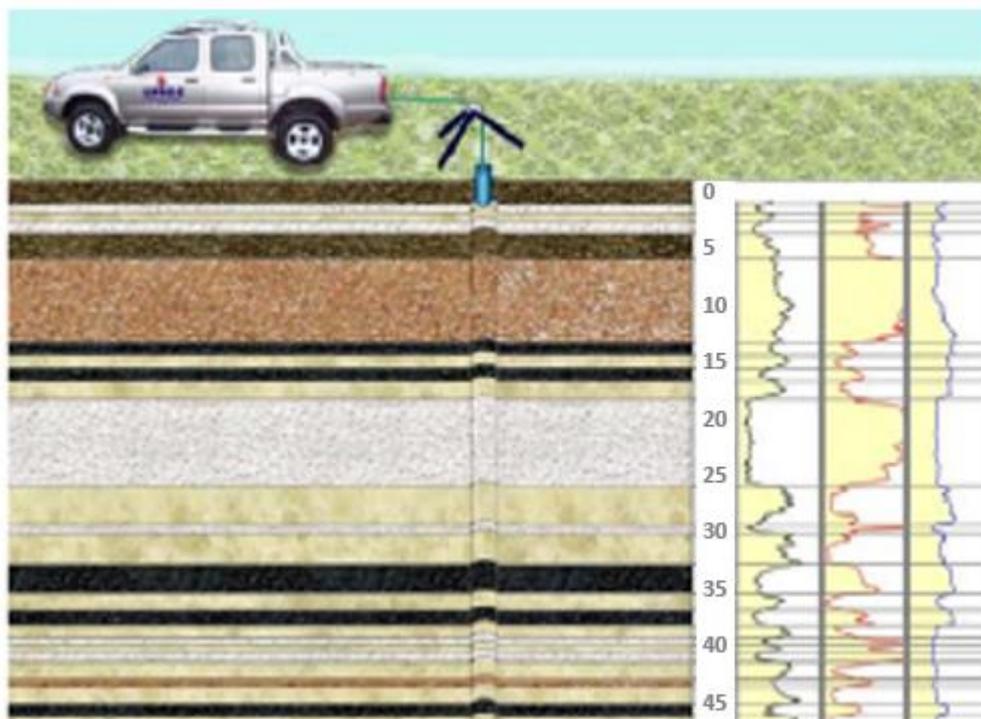
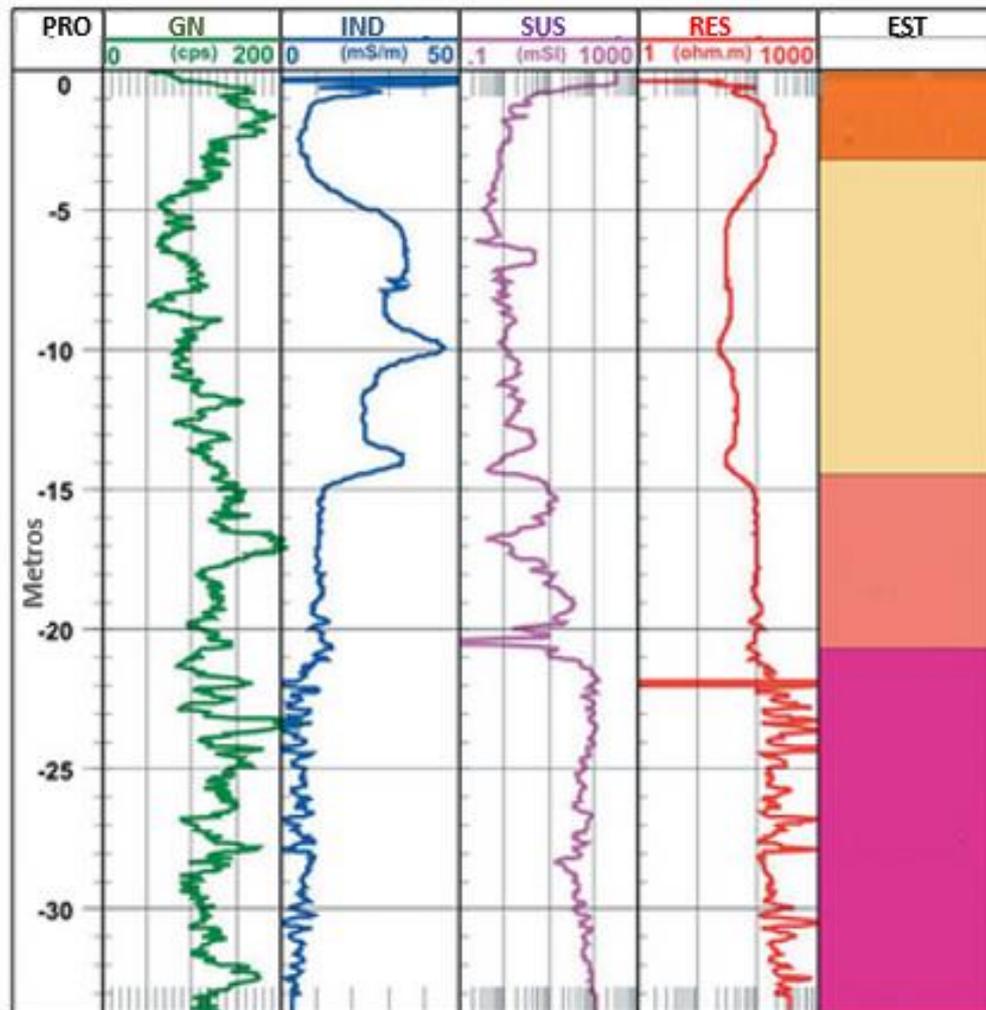


Tabela 2 - Informações de cada sonda utilizada neste trabalho.

Especificações Físicas	Sondas			
	GLOG	SPR	IND	OPTV
Comprimento (m)	2,76	2.,70	2,27	1,63
Diâmetro Máx. (mm)	38	45	38	52
Peso (kg)	8	10	8	7
Pressão (MPa)	20	20	20	20
Temperatura (Celsius)	70	70	70	60
Fonte (VDC, mA)	60-100, 100	60-100, 100	60-100, 100	60-100, 100
Velocidade (m/min)	3	3	3	1

Os registros de perfilagem podem ser apresentados na forma gráfica ou em arquivo de formato LAS (Figuras 2 e 3, respectivamente), onde ficam registrados os valores dos parâmetros correspondentes às profundidades do furo. A Figura 2 mostra a estratigrafia (coluna da extrema direita) de um furo de sondagem e suas típicas respostas correspondentes aos registros de gama natural, indução, susceptibilidade magnética e resistividade.

Figura 2 - Uma representação gráfica de um perfil geofísico.



\* Onde: Pro = profundidade; GN = gama natural; IND = indução; SUS = susceptibilidade magnética; RES = resistividade; EST = estratigráfica.

Figura 3 - Representação em arquivo LAS de um perfil geofísico.

WELL.	N/A	:	WELL NAME		
FLD.	N/A	:	FIELD NAME		
LOC.	N/A	:	LOCATION		
PROV.	RIO GRANDE DE SUL	:	PROVINCE		
SRVC.	N/A	:	SERVICE COMPANY NAME		
DATE.	27 Dec 05	:	DATE		
UWI.	N/A	:	UNIQUE WELL IDENTIFIER		
~PARAMETER INFORMATION					
#MNEMO.	UNIT	VALUE	DESCRIPTION OF MNEMONIC		
#-----					
~OTHER INFORMATION SECTION					
#-----					
~CURVE INFORMATION					
#MNEMO.	UNIT	API CODE	CURVE DESCRIPTION		
#-----					
DEPTH.	M	:	0	Depth	
RES.	Ohm-m	:	1	Formation Resistivity	
NGAM.	API	:	2	Natural Gamma	
#-----					
~A	DEPTH	RES	NGAM		
	4.99	40967.09	93.89		
	4.98	41786.18	92.04		
	4.97	42474.18	95.74		
	4.96	43162.18	96.62		
	4.95	43834.91	99.06		
	4.94	44634.91	97.36		
	4.93	45181.36	99.95		
	4.92	45727.82	102.54		
	4.91	46132.55	100.69		

Para empregar a técnica de perfilagem geofísica, há alguns fatores muito importantes que devem ser definidos e esclarecidos. Para facilitar a compreensão, serão discutidos alguns conceitos e definições básicas referentes à perfilagem geofísica, quais são: volume de investigação, resolução vertical, profundidade de investigação e efeitos de furo de sondagem. É importante saber que esses conceitos estão interligados, sendo que a mudança de um destes fatores afeta os demais.

- Volume de Investigação: é a região do espaço, no entorno do detector de perfilagem (figuras 4 e 5) que contribui com 90% do sinal registrado pelo sensor. O volume de investigação pode tomar formas diferentes tais como: esférico, cônico, elíptico ou disco - dependendo de maneira como a sonda foi construído e seu objetivo de uso. Se uma sonda pretende buscar informações de materiais rochosos perpendicularmente distantes das paredes do furo de sondagem, ela deve ter um volume de investigação grande. E se o caso for apenas de coletar informações referentes às porções das formações mais próximas da sonda ou informações quanto à presença de revestimentos e zonas de infiltração, o volume de investigação deve ser pequeno (WEBBER, 2008). O espaçamento entre os eletrodos, em sondas elétricas, e a distância entre fonte e receptores, nas sondas radioativas, são os fatores que definem o volume de investigação (OLIVEIRA, 2005; GASPER, 2012; GORELIK, 2014).

Figura 4 - Uma imagem mostrando os três conceitos importante de perfilagem geofísica.

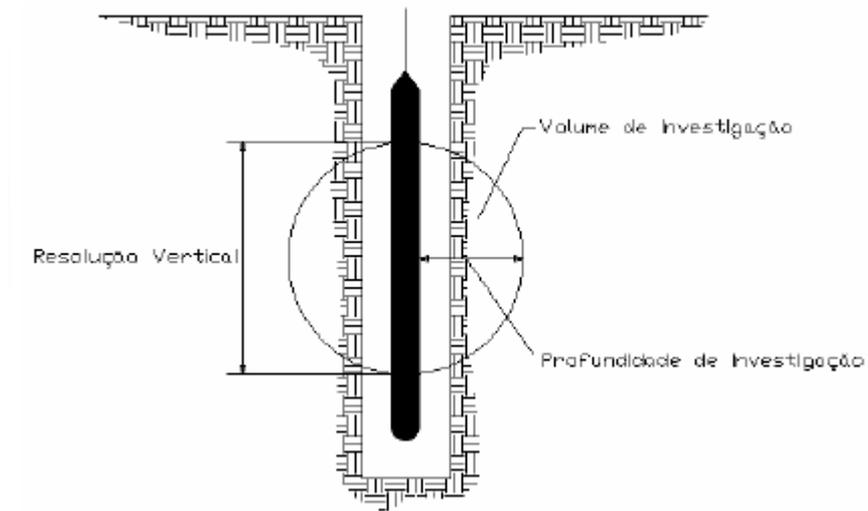


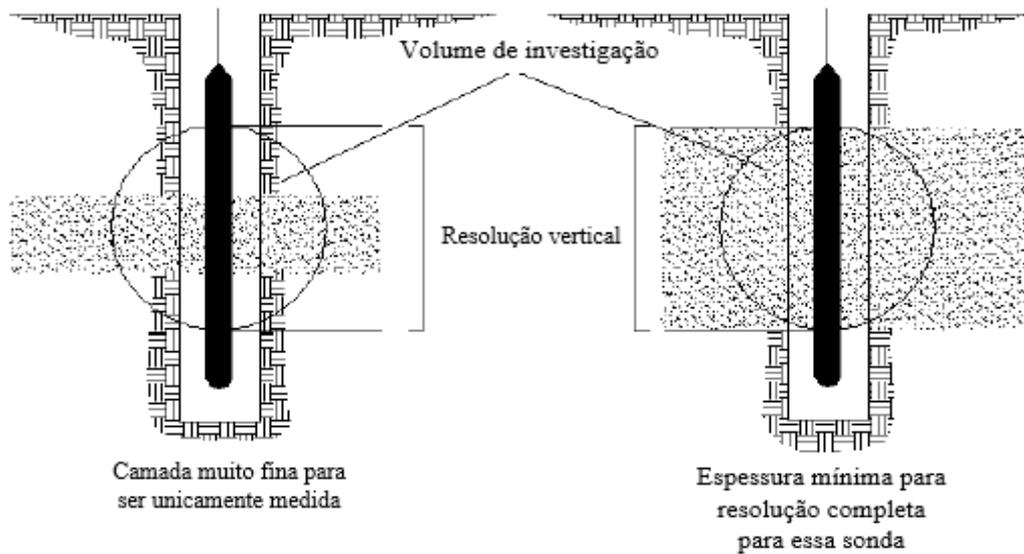
Figura 5 - Imagem ilustrativa de volume de investigação esférico.



- Profundidade de investigação: conforme OLIVEIRA (2005), a profundidade ou raio de investigação é a extensão do volume de investigação em direção perpendicular à sonda. Os mesmos fatores que influenciam o volume de investigação, também influenciam a profundidade de investigação. No caso de um volume de investigação esférico, a profundidade de investigação será igual ao raio do mesmo.

- Resolução Vertical: a resolução vertical é a espessura mínima de uma litologia que a sonda consegue distinguir como uma única camada (Figura 6). Sondas capazes de medir estratos poucos espessos são chamadas de sondas de alta resolução vertical.

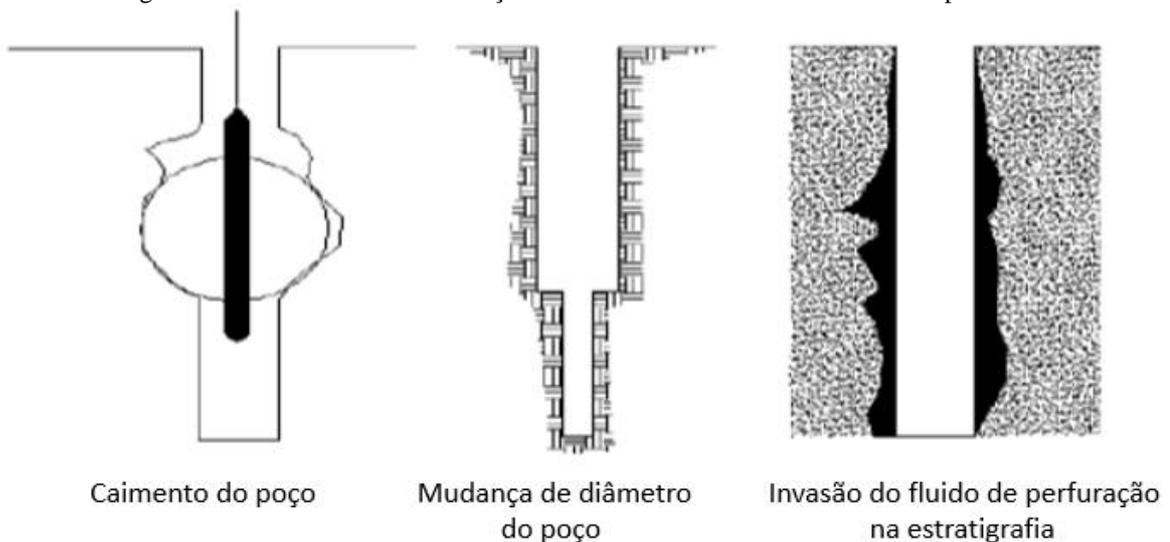
Figura 6 - Resolução vertical em uma sonda com volume de investigação esférico.



Fonte: Oliveira (2005)

• Efeito do furo de sondagem: a obtenção de leituras confiáveis não depende só do bom funcionamento dos equipamentos utilizados no campo (Figura 7). O furo de sondagem também deve estar em condições favoráveis para prática da perfilagem geofísica. Há fatores que influenciam no resultado obtido, como mudanças de diâmetro de furo, a composição do fluido de perfuração, presença de revestimentos e má qualidade das paredes (caimentos), os quais prejudicam a medida dos parâmetros de interesse.

Figura 7 - Efeito do furo com variação em suas dimensões sobre o valor lido pela sonda.



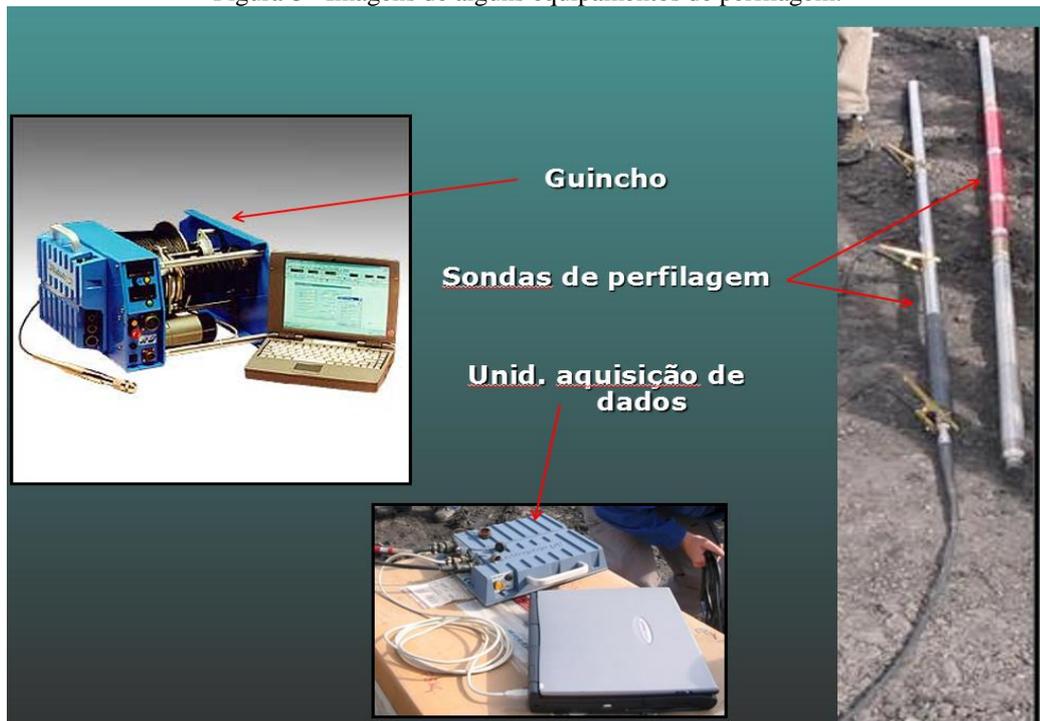
## 2.2. PERFILAGEM GEOFÍSICA EM GERAL

Há diferentes métodos de perfilagem geofísica que exigem tipos de sondas específicos a serem usados para cada estudo. Nesse trabalho, os métodos são limitados aos seguintes tipos: Perfilagem Nuclear (Gama Natural), Perfilagem Elétrica (Resistividade) e a Filmagem de furo (OPTV).

Para quaisquer métodos de perfilagem geofísica empregados, os equipamentos utilizados são geralmente os seguintes (Figura 8).

1. Sonda
2. Guincho
3. Unidade de aquisição de dados
4. Tripé
5. Computador

Figura 8 - Imagens de alguns equipamentos de perfilagem.



## 2.3. PERFILAGEM NUCLEAR

Perfilagem desse tipo é baseada na medida de radiação emitida por átomos, que compõem os minerais constituintes das rochas atravessadas pelo furo (KOPPE, 2005). A perfilagem de gama natural faz parte desses métodos.

### 2.3.1. Aspectos Fundamentais

- Radioatividade: a descoberta da radioatividade foi feita acidentalmente pelo francês Antoine Henri Becquerel em 1896, devido ao esquecimento de uma rocha contendo urânio sobre um filme fotográfico. Esse fato levou a uma descoberta interessante: o filme foi velado por radiação emanada pela rocha.

- Radiação Alfa ou Partícula Alfa: um dos processos de estabilização de um núcleo com excesso de energia é a emissão de um grupo de partículas positivas, constituídas por dois prótons e dois nêutrons (núcleos de hélio - He), e da energia a elas associada. A emissão dessas partículas é chamada de radiação alfa ( $\alpha$ ).

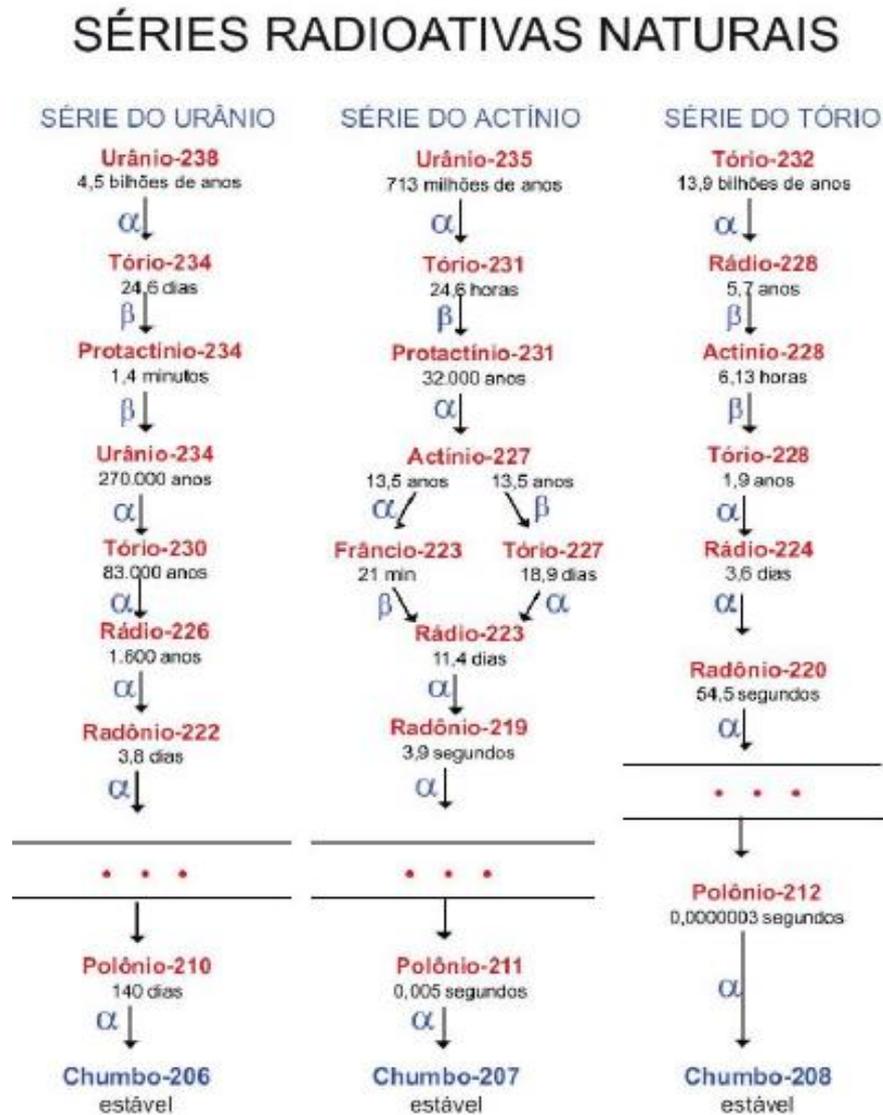
- Radiação Beta ou Partícula Beta: uma outra forma de estabilização acontece, quando existe no núcleo um excesso de nêutrons em relação a prótons, através da emissão de uma partícula negativa, um elétron, resultante da conversão de um nêutron em um próton. É a partícula beta ( $\beta$ ).

No caso de existir excesso de cargas positivas no núcleo (prótons), é emitida uma partícula beta positiva, chamada pósitron, resultante da conversão de um próton em um nêutron. Portanto, a radiação beta é constituída de partículas emitidas por um núcleo, quando da transformação de nêutrons em prótons (partículas betas) ou de prótons em nêutrons (pósitrons)

- Radiação Gama: geralmente, após a emissão de uma partícula alfa e beta ( $\alpha$  e  $\beta$ ), o núcleo resultante desse processo, ainda com excesso de energia, procura estabilizar-se, emitindo esse excesso em forma de onda eletromagnética, da mesma natureza da luz, denominada radiação gama ( $\gamma$ ).

• Radioatividade nas Rochas: desde a formação de planeta terra, existem elementos radioativos que estão em desintegração ainda. Alguns desses elementos desintegrados estão presentes no solo e nas rochas. Figura 9 ilustra o decaimento das séries radioativas naturais e suas respectivas meias vidas.

Figura 9 - Series radioativas naturais.



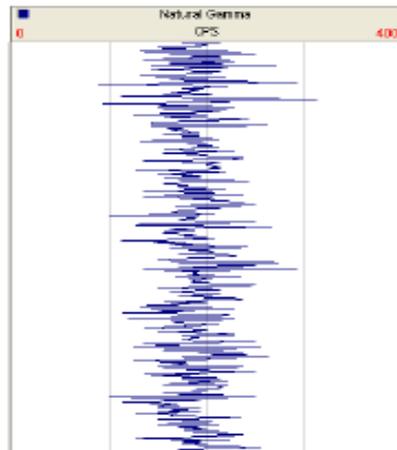
Em perfilagem geofísica, pode ser conveniente pensar em cada raio gama como um fóton ou partícula que pode ser contada por um detector. Esse tipo de sonda mede o decaimento nuclear natural da rocha perfilada. Somente alguns elementos instáveis estão significativamente presentes em uma camada de carvão: potássio 40 ( $K^{40}$ ), urânio 238 ( $U^{238}$ ), urânio 235 ( $U^{235}$ ) e tório 232 ( $Th^{232}$ ) (HOFFMAN *ET AL*, 1982).

A intensidade de radiação gama emitida pelas rochas depende de sua composição química. No caso de carvão, que quase não contém K em sua composição e raramente apresenta urânio e tório, sua emissão de radiação gama natural é baixa.

### 2.3.2. Removendo os Efeitos Estatísticos

A produção de todas as partículas por decaimento de núcleo atômico instável, tais como raios gama, nêutrons entre outros, não é constante no tempo. O ato de decaimento de um núcleo é um evento aleatório. Isso quer dizer que um decaimento num particular momento é diferente de outro. Na Figura 10, observa-se um registro geofísica que indica a aleatoriedade das contagens (decaimentos) de uma fonte de raios gama de atividade conhecida.

Figura 10 - Aleatoriedade das contagens (decaimentos).



A natureza randômica dos decaimentos nucleares afeta os valores medidos pela sonda. Esses efeitos de variação estatísticas devem ser separados dos efeitos referentes às mudanças de litologia.

A contagem média se torna mais representativa quanto mais longo for o período amostrado. Neste caso, o número de contagens aumenta e os efeitos da variação estatística diminuem.

O tempo de coleta de dados relaciona-se com a velocidade de perfilagem, que é determinada pelo técnico responsável no campo. É possível diminuir a variação estatística

usando uma grande base de tempo e baixas velocidades de perfilagem, mas nem sempre isto é muito prático. A Tabela 3 mostra as velocidades apropriadas para diferentes sondas.

Tabela 3 - Velocidades típicas de perfilagem.

Tipo de sonda	Velocidade geral (m/min)	Velocidade para detalhamento (m/min)
Elétrica	6 – 10	6 – 10
Radiação	3 – 10	2 – 5
Compasso de caliper	6 – 10	6 – 10
Sônica	6 – 10	6 – 10

Fonte: Hoffman *et al.*(1982).

### 2.3.3. Sonda para Medição da Emissão Natural de Raios Gama

Esta sonda mede os raios de gama naturais (captados pelos receptores) que são emitidos pela série de elementos químicos formados a partir da desintegração de isótopos de Urânio ( $U^{238}$ ), Tório ( $Th^{232}$ ) e Potássio ( $K^{40}$ ), que são as principais fontes de ocorrência natural de radiação na crosta terrestre (DAVIS *ET AL*, 2009; HARTMAN, 1992). Alguns tipos de rochas, tais como granito, contêm alta quantidade de isótopos radioativos. Assim, na medida que a sonda atravessa estas rochas, altas quantidades de raios gama naturais serão registradas. Inversamente, sondas que atravessam litologias como carvão, que apresentam baixa quantidade desses isótopos, registrarão baixos valores para raios gama naturais (figuras 11 e 12). Contudo, a radiação natural gama é considerada uma das ferramentas muito utilizadas na identificação e localização da camada de carvão (KAYAL E CHRISTOFFEL, 1989). Em contrapartida, a leitura de valores altos de radiação natural gama não significa a ausência de carvão (HEARST *ET AL*, 2000), como no caso raro em que carvão contém altas concentrações de urânio.

Figura 11 - Exemplo de um registro de emissão de radiação gama natural.

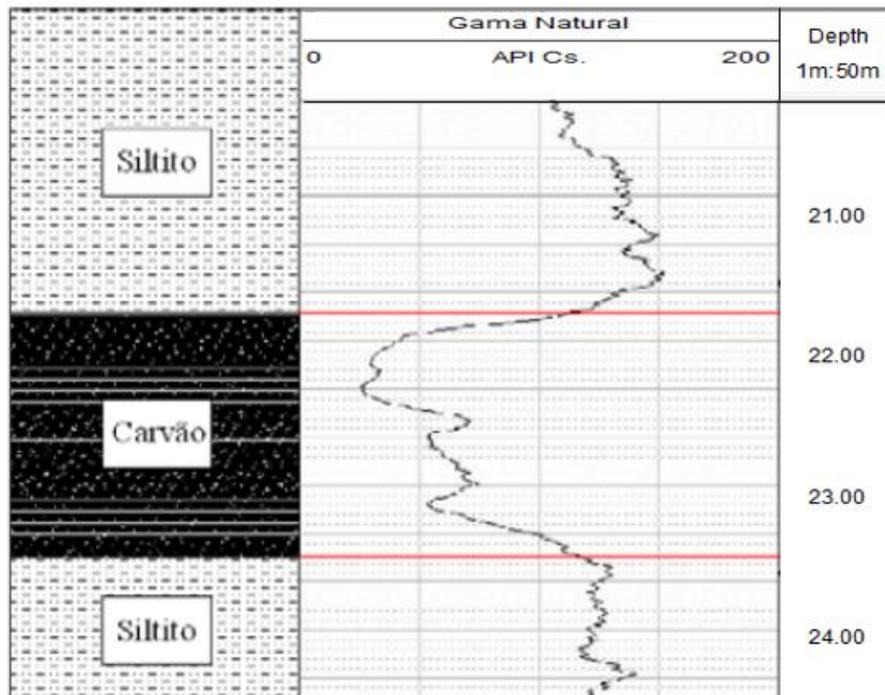


Figura 12 - Valores médios de emissão de radiação gama natural para algumas formações.

Tipo de rocha	Parâmetro	Raios Gama	
		0	150
Folhelho	Marinho	██████████	██████████
	Não marinho	██████████	██████████
Carvão	Betuminoso	██████████	██████████
	Inferior	██████████	██████████
	Linhito	██████████	██████████
	Antracito	██████████	██████████
Arenito	Poroso	██████████	██████████
	Compacto	██████████	██████████
Siltito		██████████	
Calcáreo	Poroso	██████████	██████████
	Compacto	██████████	██████████

#### 2.3.4. Princípio de funcionamento da sonda de Gama Natural

A sonda de perfilagem de detecção de radiação natural gama é a mais simples das sondas nucleares, pois inclui somente um detector e não utiliza fontes radioativas. Ela detecta a

radiação gama emitida naturalmente pela rocha. Cintilômetros são os detectores mais usados atualmente. A profundidade de investigação, em sondas de medição de radiação gama natural, varia depender da densidade do material que está sendo perfilado.

### **2.3.5. Unidades de medida dos detectores**

O sistema de detecção por cintilômetros determina o número de decaimentos por unidade por tempo e sua unidade é expressa em CPS (Contagens por Segundo). Os cintilômetros são cristais de NaI ativados com uma pequena porção de Tálcio, que quando ionizados por fótons de radiação gama, emitem luz visível. A intensidade dessa luz é proporcional à energia da radiação ionizante.

## **2.4. PERFILAGEM ELÉTRICA**

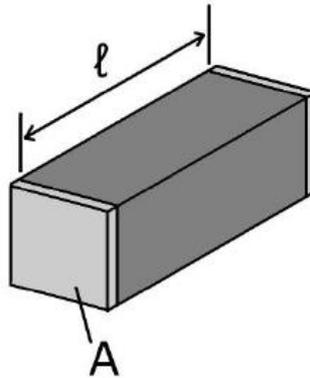
Este tipo de perfilagem é baseada na medida da resistividade elétrica das rochas que são atravessadas pelo furo. A perfilagem elétrica responde ao fluxo de corrente elétrica entre a sonda e a estratigrafia. Os dispositivos mais utilizados nesse método são a perfilagem de resistividade e a perfilagem de indução.

### **2.4.1. Resistência e Resistividade**

Ambas não são a mesma entidade e não podem ser confundidas entre si. A resistência tem sua medida em ohms ( $\Omega$ ) enquanto a resistividade é medida em ohm-metro ( $\Omega\cdot m$ ). Na interpretação de um registro geofísico, as diferenças entre elas devem ser bem compreendidas.

A resistência elétrica de um material varia conforme o volume de material na qual a medida é feita (Figura 13). Assim, quando uma corrente passa através de um fio, a resistência depende somente do comprimento total de fio. A resistência é uma medida absoluta em ohms em quaisquer condições de volume, temperatura e pressão existente no momento da medida.

Figura 13 - Um exemplo de volume (de investigação) para obtenção da resistência.



Fonte: Gasper (2012)

A equação da resistência em função da resistividade e volume do material é dada por:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (1)$$

onde R é a resistência,  $\rho$  é a resistividade, l é o comprimento do material e A é a área da seção.

A resistividade de qualquer material homogêneo medida sob dadas condições, é constante e independente do volume. HOFFMAN ET AL.(1982) define a resistividade como a resistência elétrica de um material quando uma corrente de 1 ampere é aplicada em 1 metro de comprimento de material de seção de 1 metro quadrado, nas condições normais de temperatura e pressão.

A Tabela 4 apresenta valores de resistividades para alguns minerais e rochas (TELFORD ET AL, 1990). Com os valores apresentados nessa tabela, pode-se concluir que não é possível identificar uma litologia com base apenas nos valores de resistividade. Em perfilagem geofísica, uma das características utilizadas na identificação de estratos de carvão betuminoso e sub-betuminoso é a sua resistividade mais elevada, em comparação com as camadas de materiais estéreis de topo e base (siltitos e folhelhos, em especial). Porém, é preciso estar atento ao fato de que arenitos também exibem valores elevados de resistividade. Assim, para uma melhor identificação das camadas, é recomendado utilizar-se mais registros geofísicos, como por exemplo, GN e OPTV.

Tabela 4 - Exemplo de valores de resistividade em alguns minerais e rochas.

Mineral / Rocha	Resistividade (variação ou valor médio em ohm.m)
Bauxita	200 - 6000
Água superficial (doce)	10 - 100
Água do mar	0,2
Grafita	$10^4 - 5 \times 10^3$
Granito porfirítico (saturado)	$4,5 \times 10^3$
Diabasio	$20 - 5 \times 10^7$
Basalto	$10 - 1,3 \times 10^7$
Xisto	$20 \times 10^4$
Gnaisse	$3 \times 10^6$
Quartzito	$10 - 2 \times 10^8$
Argilas consolidadas	$20 - 2 \times 10^3$
Argilas inconsolidadas (úmidas)	20
Conglomerados	$2 \times 10^3 - 10^4$
Arenito	$1 - 6,4 \times 10^8$
Calcário	$50 \times 10^7$

Fonte: Telford *et al.* (1990)

#### 2.4.2. Influência da Litologia

Perfis de resistividade e de resistência envolvem o fluxo de corrente elétrica entre o equipamento e a estratigrafia. Cada litologia apresenta diferentes intervalos de valores de resistividade, variando inclusive horizontalmente e verticalmente (anisotropia). A resistividade medida é resultado de múltiplos fatores, tais como: grau de saturação de água, grau de faturamento, porosidade, fluidos de preenchimento, mineralogia, dentre outros. Em função, também, da forma como a corrente pode fluir pelos estratos (condução eletrolítica, processos de adsorção - troca de íons) os valores de resistividade variam.

O mais importante estudo de resistividades das rochas sedimentares clásticas foi realizado por ARCHIE (1942). Archie estabeleceu que a resistividade de uma amostra (po) completamente saturada com água salgada é proporcional à resistividade da água salgada (pw):

$$p_o = F \times p_w \quad (2)$$

onde  $F$  é denominado “fator de formação”. Além disso, determinando  $F$  e porosidade ( $\phi$ ) a partir de diversas amostras, Archie estabeleceu a seguinte relação:

$$F = \phi^{-m} \quad (3)$$

onde o expoente  $m$  é um fator de ajuste que varia entre 1,8 a 2,0 em arenitos, porém em areias inconsolidadas esse valor pode chegar a 1,3. Devido a essa dependência do estado de consolidação, o expoente  $m$  é chamado de expoente de cimentação (HEARST *ET AL.*, 2000).

Uma modificação realizada na equação de Archie realizada por WINSAUER *ET AL.* (1952), após um estudo com amostras de arenito, introduziu a seguinte fórmula empírica:

$$F = a \times \phi^{-m} \quad (4)$$

sendo  $a$  um segundo fator de ajuste.

### 2.4.3. Princípio de funcionamento das sondas de resistividade

Uma diferença de potencial é gerada entre dois pontos, um na sonda e outro na superfície de terreno ao lado da boca do furo a ser perfilado. Esta diferença de potencial gera um fluxo de corrente (sinal), que percorre as rochas e é medida pelos receptores (KOPPE, 2005).

A corrente elétrica percorre o caminho entre a sonda e a parede do furo e daí para a sonda novamente através de um fluido condutor, presente no furo de sondagem. Dependendo da resistividade da rocha, o fluxo de corrente será alto ou baixo. O carvão não é um bom condutor de eletricidade, então sua resistividade é alta e o fluxo de corrente medido será baixo quando comparado ao fluxo de corrente medido para outros tipos de rochas (HARTMAN, 1992).

A resistência pode ser obtida conforme a equação desenvolvida por George Simon Ohm, em 1827.

$$R=V/I \quad (5)$$

onde  $V$  é a diferença de potencial (em volts),  $I$  é corrente (em amperes) e  $R$  é a resistência (em ohms).

Os valores de resistência/resistividade obtidos pelas sondas são influenciados pela resistividade das rochas adjacentes à sonda e também por outros fatores, tais como: diâmetro do furo de sondagem, temperatura, porosidade e tipo de fluido presente no interior do furo. Quando necessário, os efeitos destes fatores podem ser corrigidos nas leituras, com a aplicação de fatores de correções fornecidos pelos fabricantes das sondas.

Com a evolução da técnica de medida de resistividade, vários modelos de sondas foram desenvolvidos. Entre os tipos importantes de sondas de resistividade, pode-se mencionar: *single-point resistance (SPR)*, *normal-resistivity (short and long)*, *focused resistivity* e *micro-resistivity* (GORELIK, 2014).

- Sonda *Single Point Resistance*:

O equipamento de perfilagem de resistência pontual é o mais antigo método de obter um valor aproximado para a resistividade das litologias (Figuras 14 e 15). Essa sonda é provida de apenas um eletrodo de corrente, executando medidas de resistência elétrica, e não propriamente resistividade das rochas ao redor do furo de sondagem. Uma corrente elétrica vinda da superfície alimenta o eletrodo; a corrente espalha-se para a formação a partir do mesmo, retornando para a superfície e para o gerador de corrente através de um eletrodo de aterramento.

Figura 14 - Um diagrama esquemático de funcionamento de perfilagem resistência pontual.

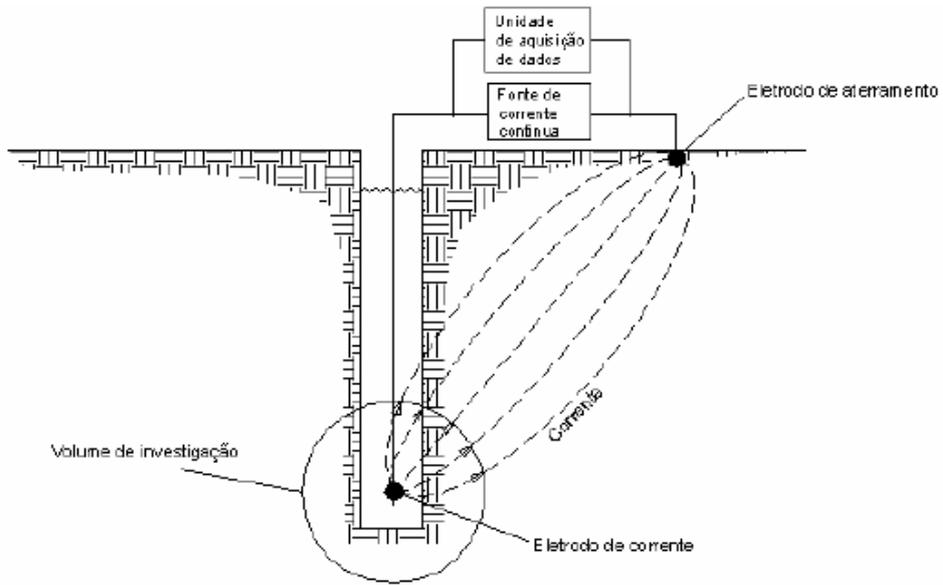
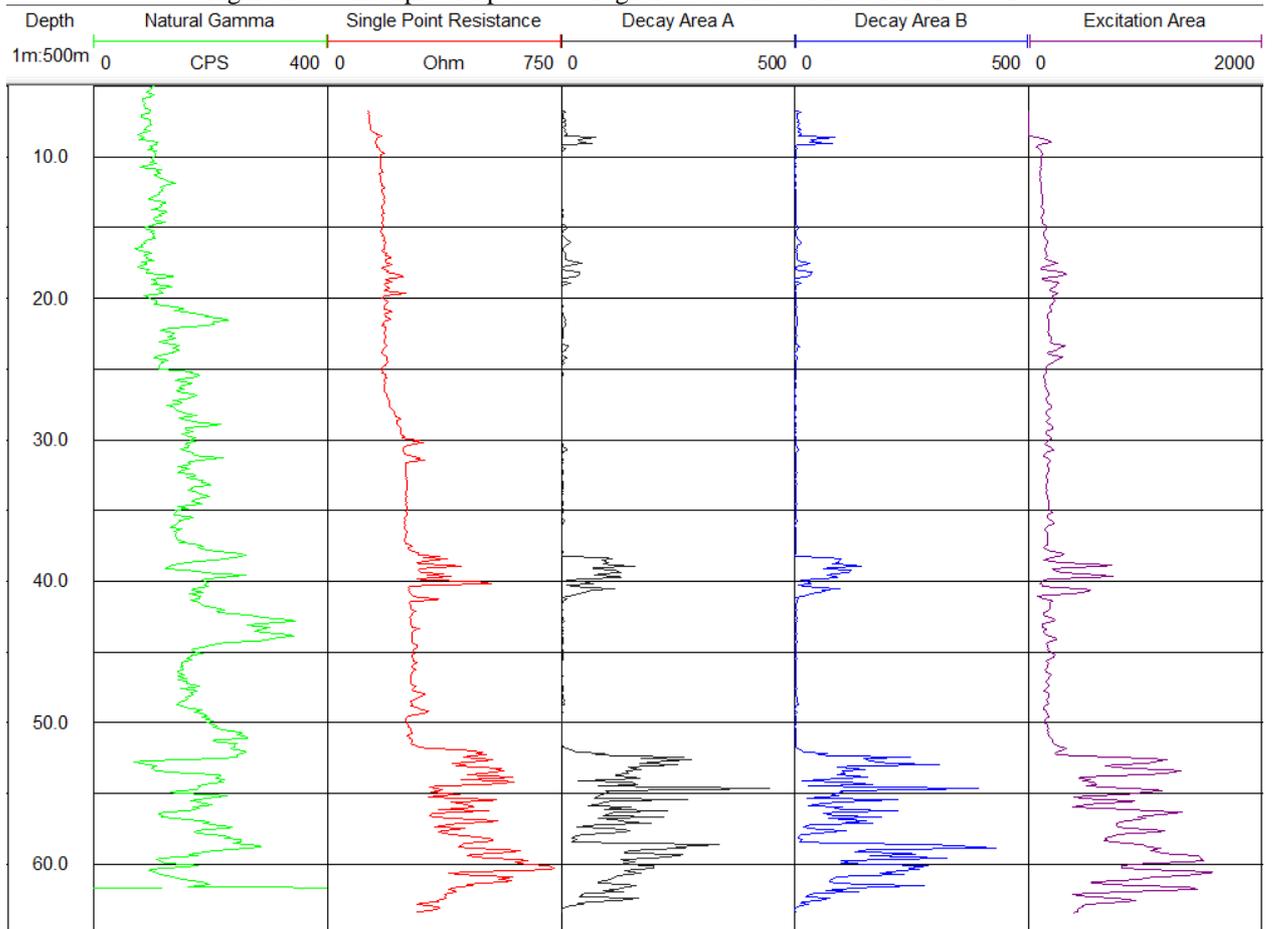


Figura 15 - Uma típica resposta dos registros da sonda SPR de furo B3 – 72.



O tamanho do eletrodo de corrente controla a profundidade de investigação. Se o eletrodo for esférico, o volume efetivo de investigação será aproximadamente cinco vezes o diâmetro do eletrodo (GUYOD, 1944b). Grosseiramente, metade da medida origina-se de uma superfície esférica na qual tem a espessura igual ao raio do eletrodo, de modo que a medida é altamente influenciada pelo fluido contido no furo de sondagem.

A medida da sonda SPR é mais qualitativa, ao contrário do GLOG, que é quantitativo. Se os efeitos do furo puderem ser minimizados ou bem compreendidos, a sonda de SPR pode produzir dados qualitativos que refletem as mudanças na resistência dos estratos de rocha (HOFFMAN *ET AL.*, 1982).

É muito importante notar que a resposta de SPR é “não-linear”. Ela tende a salientar as respostas de estratos finos e de baixa resistência, comprimindo os valores de resistências elevadas. A unidade de resistência é ohm – diferente da resistividade (ohm-m; item 2.4.1).

- Sonda de Resistividade com Focalizadores (*focused-resistivity logging*):

Dispositivos focalizadores foram introduzidos precisamente para definir mais as camadas poucas espessas, particularmente resistivas, e medir sua resistividade. Esse tipo de ferramenta é considerado fundamental para medir a resistividade verdadeira dos estratos, (cálculos para obtenção da resistividade verdadeira em equipamentos de perfilagem na resistividade com focalizadores é discutido em GUYOD (1951).

Esses equipamentos apresentam diversas configurações de eletrodos auxiliares, denominados “eletrodos focalizadores”. Uma configuração bastante conhecida é observada em sondas do tipo *guard-log* (GLOG). Os equipamentos com tal configuração são providos de três eletrodos principais, eletricamente isolados entre si, sendo um localizado no centro da sonda (eletrodo de corrente) e dois eletrodos auxiliares (eletrodos focalizadores) colocados acima e abaixo do eletrodo de corrente (Figura 16-A). Uma corrente contínua é aplicada ao eletrodo central. A corrente é confinada pelos eletrodos focalizadores para que o fluxo de corrente entre o eletrodo central e a estratigrafia tenha forma de disco (Figura 16-B). Os eletrodos focalizadores são alimentados por uma tensão fornecida pelo equipamento que é idêntica ao eletrodo de corrente. Sempre que o potencial elétrico for idêntico nos três eletrodos, as distribuições das linhas de correntes e equipotenciais se apresentam conforme mostra a Figura 17.

Figura 16 - Distribuição dos eletrodos na sonda *guard-log* (A), mostrando o volume de investigação (B).

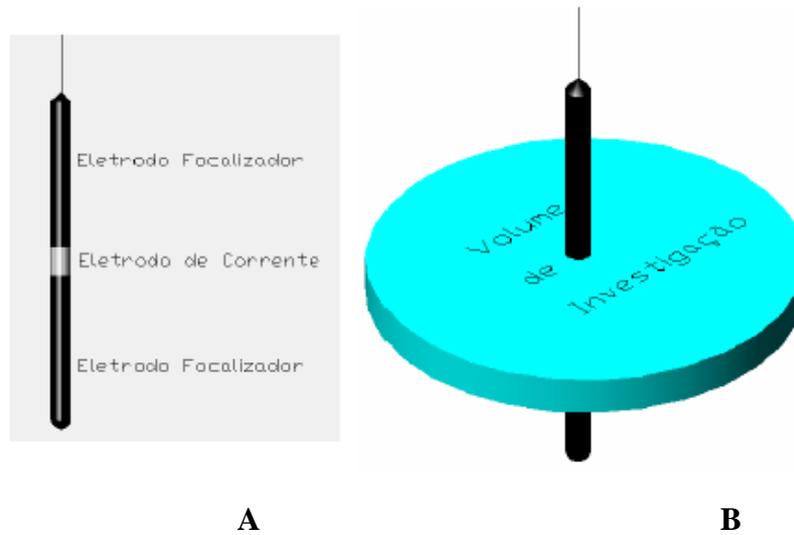
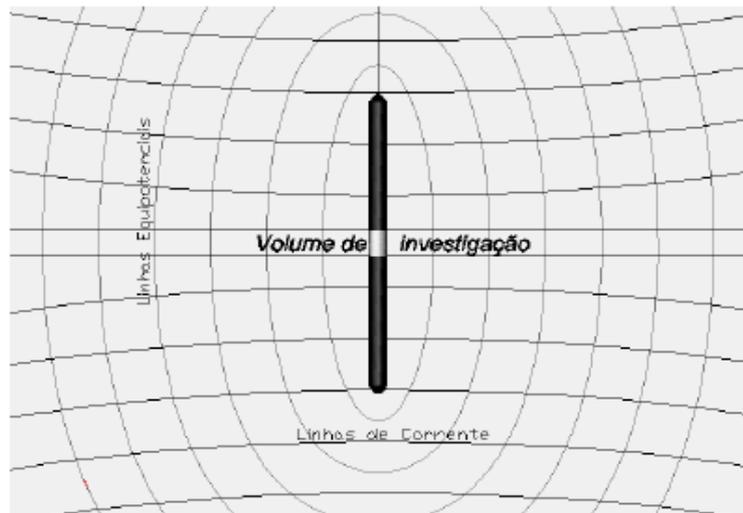


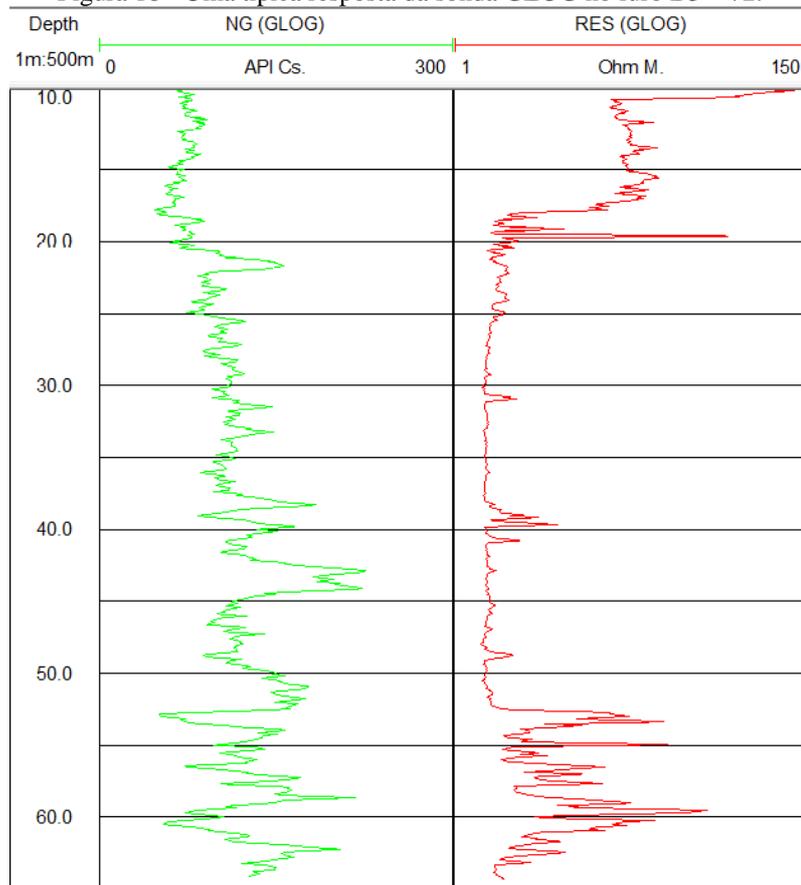
Figura 17 - As linhas equipotenciais e de corrente em sondas para medir resistividade com focalizadores.



Fonte: Gorelik (2014)

A aplicação atual do GLOG é grande em carvão e água subterrânea. Esta configuração permite que a sonda tenha excelente resolução vertical, ao mesmo tempo em que minimiza efeitos do furo de sondagem. A sonda GLOG fornece um raio de investigação de aproximadamente 3 vezes o comprimento de um eletrodo *guard*. Com um eletrodo de corrente de 10cm e um *guard* de 1m, podem ser detectados estratos da ordem de 10cm de espessura, com um raio de investigação de aproximadamente 3m.

Figura 18 - Uma típica resposta da sonda GLOG no furo B3 – 72.



- Perfilagem de Indução:

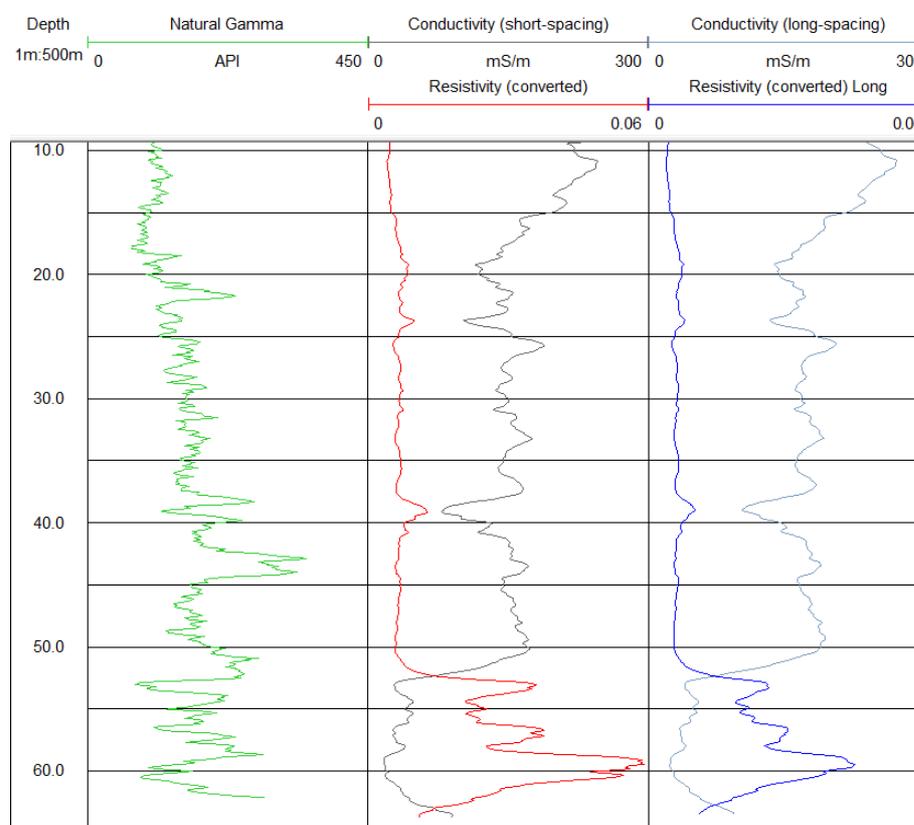
O uso da sonda de indução é um método utilizado para medir a condutividade dos estratos dentro de furo. Como a condutividade é o inverso da resistividade, o perfil de indução também proporciona medidas de resistividade dos estratos.

Originalmente, a sonda de indução foi desenvolvida para resolver os problemas enfrentados na obtenção de medida de resistividade com perfuração de lama, onde não ocorreu nenhuma forma de condutividade entre a ferramenta e a formação (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1997). O funcionamento desta sonda utiliza uma técnica eletromagnética para induzir um fluxo de corrente nas rochas ao redor de furo. Essa ferramenta é capaz de fornecer medidas de condutividade ou resistividade dos estratos, mesmo quando o fluido contido no furo de sondagem é isolante elétrico (p.ex.: ar).

A unidade de medição para condutividade é normalmente milisiemens por metro (mS/m). Obs.: 1 mS/m é igual a 1000  $\Omega$ -m.

Esta sonda de indução proporciona dois registros de condutividades, obtidos por arranjos de bobinas ILM e ILD (SCON e LCON, respectivamente), com diferentes profundidades de investigação. O espaçamento equivalente entre transmissor e receptor (TX - RX) de SCON é 50cm e para o LCON é 81cm. O registro SCON tende a dar respostas litológicas mais detalhadas que o LCON (Figura 19), devido ao menor volume de investigação. Apenas o registro de SCON será utilizado neste trabalho.

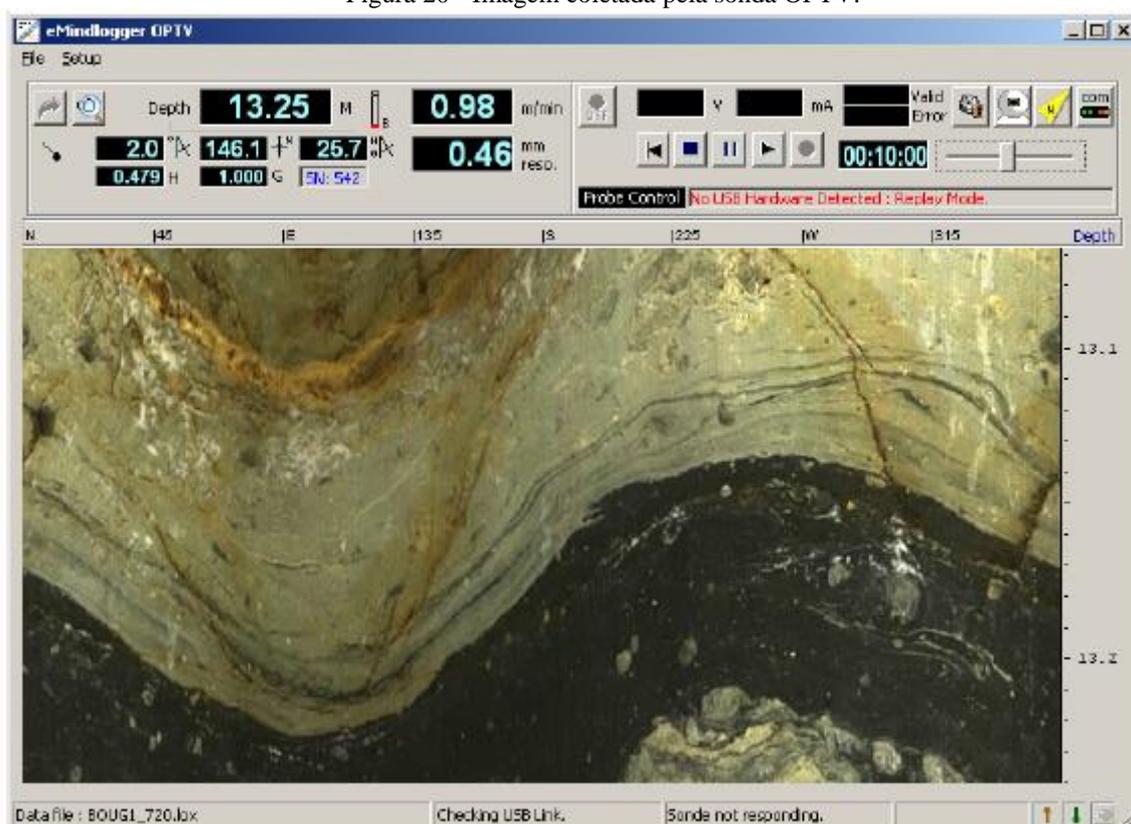
Figura 19 - Uma típica resposta dos registros da sonda IND no furo B3 – 72, mostrando as curvas de condutividade e resistividades dos arranjos *short-spacing* e *long-spacing*.



## 2.5. FILMAGEM DE FUIROS DE SONDAGEM

A filmagem de furos é uma técnica relativamente recente na indústria de mineração. Essa tecnologia proporciona uma imagem orientada contínua de alta resolução das paredes do furo de sondagem, utilizando uma fonte de luz convencional. A Figura 20 mostra uma típica imagem capturada por uma sonda OPTV (*OpticalTeleviwer*).

Figura 20 - Imagem coletada pela sonda OPTV.



### 2.5.1. Princípio de funcionamento da sonda OPTV

O funcionamento dessa sonda é feito através do acoplamento de uma câmera óptica baseada em “*fish-eye lens*” que permite visão em 360° e orientação por norte magnético, simultaneamente. OPTV produz imagens em cores reais. A imagem produzida pode servir como um testemunho visual de amostragem, eventualmente auxiliando na redução de áreas de armazenamento de testemunhos.

O uso de OPTV exige que o furo de sondagem esteja preenchido com fluido transparente (por exemplo, com ar ou água limpa) para capturar boas imagens (MORIN, 2005; NAEIMIPOUR *ET AL*, 2014). A falta desse requisito é presumivelmente um motivo para limitações na aquisição de dados com a sonda OPTV. Para obter-se uma melhor qualidade dos dados de OPTV quando o fluido não tem adequada transparência, é necessário considerar mais tempo e esforço para lavar-se corretamente o furo de sondagem (MORIN, 2005; HEEDEN, 2004). Para economizar-se recursos em termos de volume de água usada para lavar o furo e também de tempo, é comum adicionar-se uma substância floculante como o “sulfato de

alumínio”. A adição do sulfato é feita algumas horas antes da realização de perfilagem geofísica, para decantar-se o particulado, proporcionando água mais limpa ao furo.

### **2.5.2. Tratamento do fluido contido no furo de sondagem**

Investigações de campo conduzidas no trabalho de MORIN (2005) indicam que os furos de sondagem devem apresentar fluido transparente. Para o tratamento de fluido turvo, utiliza-se o coagulante sulfato de alumínio ( $Al_2O_3$ ). Tecnicamente, é possível a substituição do sulfato de alumínio (menor custo) tanto pelo sulfato férrico quanto pelo cloreto férrico, garantindo a mesma eficiência (FERREIRA DA SILVA *ET AL.*, 2006 E LIBÂNIO *ET AL.*, 1997).

## **2.6. PADRONIZAÇÃO DOS PERFIS**

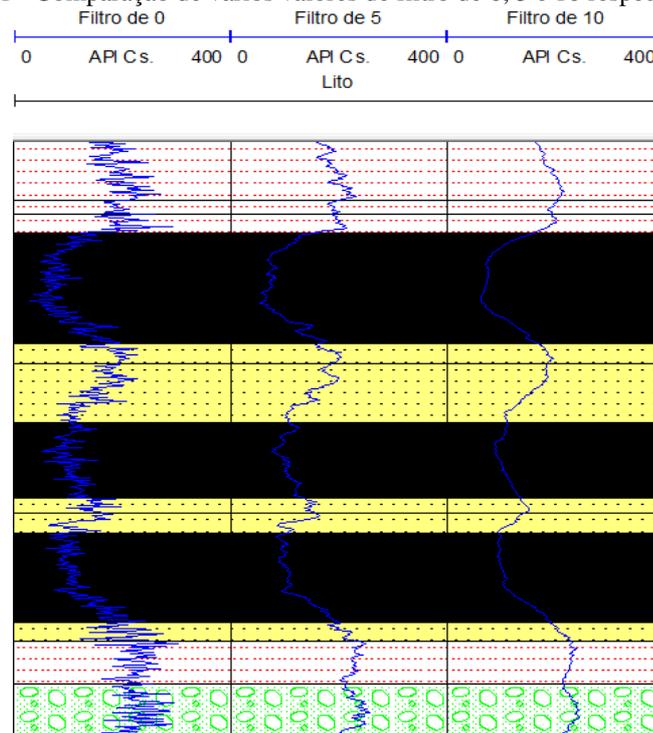
Algumas medidas de padronização foram adaptadas para facilitar a comparação entre os perfis geofísicos. Entre elas estão: o tipo de filtragem de dados, as escalas de registros de perfilagem e aplicação de ajustes verticais nos perfis (*shift*).

### **2.6.1. Filtros**

O motivo do uso de filtros é obter-se uma certa suavização nos registros geofísicos. No caso dos registros de gama natural, adotou-se um filtro do tipo média móvel, com número de pontos igual a 5. Este valor foi escolhido pois apresentou o melhor resultado visual para os registros. A Figura 21 mostra a comparação de três valores de filtro no registro de gama natural, 0, 5 e 10 respectivamente. Conforme a Figura 21, o valor de filtro 0 apresenta muito ruído e dificulta as leituras, enquanto que o valor 10 apresentou-se muito suave, com perda de informação.

Nos registros elétricos, não foi usado nenhum filtro, apenas o dado bruto. Uma vez que estão sendo comparados diferentes arranjos de resistividade, inclusive quanto ao aspecto de resolução vertical, a ideia é apresentar o registro geofísico com máximo nível de detalhe. Isto é obtido quando se usa o dado bruto.

Figura 21 - Comparação de vários valores de filtro de 0, 5 e 10 respectivamente.



### 2.6.2. Shift para Perfis

É normal fazer-se algum ajuste vertical para acertar o valor de diferenças em profundidade entre os registros de perfilagem e amostras de testemunhos de sondagem. Este ajuste é denominado “shift”. No presente caso, o valor dos deslocamentos não é constante, mas maiorias em torno de 0,5m devido ao efeito do revestimento do cabo do guincho.

Foi também observado que há um deslocamento adicional constante de aproximadamente 0,6m na leitura sonda SPR com relação ao registro de gama natural, para a correspondência com profundidades reais – aparentemente trata-se de uma falha na calibração da sonda, devida ao fabricante.

### 2.6.3. Escalas e Unidades

As unidades adotadas para os registros de cada sonda e as escalas são mostradas na Tabela 5 a seguir.

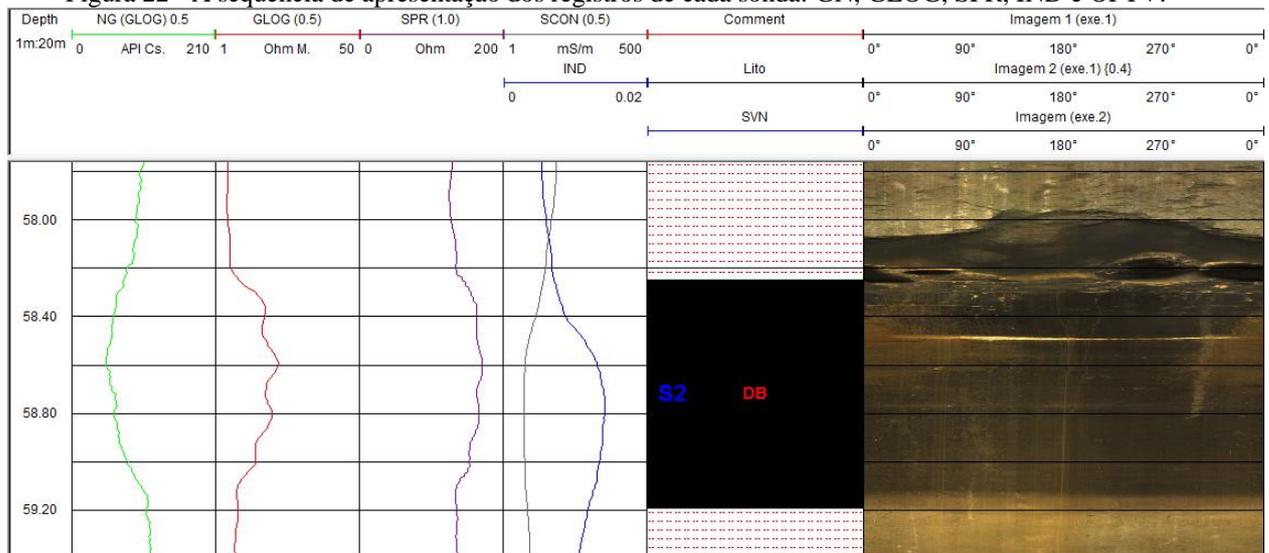
Tabela 5 - A padronização de escalas e unidades de perfis.

	<b>Sondas</b>			
	GLOG	SPR	IND	OPTV
Escala elétrica	0 – 200 ( $\Omega$ m)	0 – 1500 ( $\Omega$ )	0 – 1000 ( $\Omega$ m)	-
Nuclear	0 – 400 (API)	0 – 400 (API)	0 – 400 (API)	0 – 400 (API)

#### 2.6.4. Organização dos Perfis

A sequência de apresentação dos perfis será feita da seguinte forma: GN, GLOG, SPR, IND, OPTV, além da descrição geológica, respectivamente, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - A sequência de apresentação dos registros de cada sonda: GN, GLOG, SPR, IND e OPTV.



#### 2.7. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO E AFERIÇÕES EM CAMPO

Nesse contexto, serão abordados os procedimentos de campo empregados em campanhas de perfilagem geofísica. Para a confiabilidade dos dados medidos e coletados, é importante que a calibração de qualquer sonda seja realizada segundo os procedimentos definidos pelo fabricante.

- GLOG e SPR

Normalmente, as sondas elétricas (GLOG e SPR) são calibradas pelo fabricante e só requerem uma rápida verificação em campo, que consiste em acoplar resistências específicas às sondas.

- INDUÇÃO

O processo de calibração de sonda IND consiste na zeragem da sonda antes da perfilagem e uma verificação da calibração após a execução de perfilagem. Este objetivo é atingido através da suspensão da sonda no ar, onde a umidade é baixa, a fim de obter condutividade zero para o ar. Outro passo crítico no processo de calibração de IND é a aquisição de dados na descida e subida, no mesmo furo, para avaliar a deriva térmica. A combinação e comparação destes duas execuções propociona uma base para a realizações de correções no perfil de IND, se necessário.

- OPTV:

A calibração do OPTV é a chave para o controle de qualidade da imagem e deve ser verificada periódicamente com um gabarito de calibração, para garantir a precisão do sistema de orientação da imagem. Todos os alinhamentos da sonda são definidos pelo fabricante e não podem ser alterados pelo usuário. Portanto, a fim de verificar a correção dos alinhamentos, um jig é fornecido pelo fabricante. O jig é um dispositivo de calibração equipado com LED's; a luz produzida por eles é utilizada para verificar o posicionamento e/ou orientação da imagem de sonda durante a calibração.

### **2.7.1. Verificação da Profundidade**

É importante a verificação da profundidade que está sendo medida pelo equipamento de perfilagem. Sempre existe alguma diferença entre a medida do equipamento e a medida informada pela descrição geológica do furo, o que acarreta em discrepâncias entre estas profundidades. Em virtude desse fato, foram feitos ensaios de medição com o cabo de aço e guincho de movimentação das sondas de perfilagem onde se constatou, depois de diversas análises no sistema de medição de profundidade, que existe uma diferença de aproximadamente 50cm no registro de perfilagem (as litologias mostradas na perfilagem estão 50cm acima das

profundidades observadas nas descrições geológicas). Tal diferença surge no trecho onde o cabo de aço é revestido com borracha (10m iniciais), devido a um aumento virtual de aproximadamente 3mm no diâmetro do cabo. Com o aumento no diâmetro, não há o encaixe adequado entre o cabo e a polia que registra a profundidade.

## 2.8. ARQUIVAMENTOS DOS REGISTROS DE PERFILAGEM

Os dados de campo são registrados em um arquivo de formato binário, o qual exige menor capacidade de armazenamento do que a maioria dos outros formatos. O arquivamento dos registros deve ser realizado de uma maneira que qualquer usuário possa compreendê-los e utilizá-los. Este arquivo é convertido do formato de campo para um formato reconhecido de padrão internacional. O Log ASCII Standard (LAS) é um dos formatos comuns para o qual o arquivo de campo é convertido. O mesmo é utilizado nesse estudo.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia do trabalho, realizado através da interpretação de um conjunto de dados de perfilagem produzidos em anos anteriores. Para constituir o banco de dados, foram escolhidos os furos de sondagem que possuem registros de pelo menos duas das sondas GLOG, SPR e IND, além das respectivas descrições geológicas, para poder fazer as comparações dos perfis obtidos em cada situação. Alguns furos recentes também foram incluídos no banco de dados, furos estes que permitiram a coleta de dados com a sonda de filmagem (OPTV) e também sondas elétricas.

#### 3.1. PERFILAGEM DOS FUROS

##### 3.1.1. Execução da Perfilagem Geofísica/Coleta de dados

Como já citado anteriormente, a perfilagem geofísica foi realizada em diversos furos de sondagem e de desmontes (todos verticais), com profundidades diferentes em várias campanhas ao longo dos últimos anos. A sequência de utilização das sondas para a execução das atividades de perfilagem segue um dos casos a seguir:

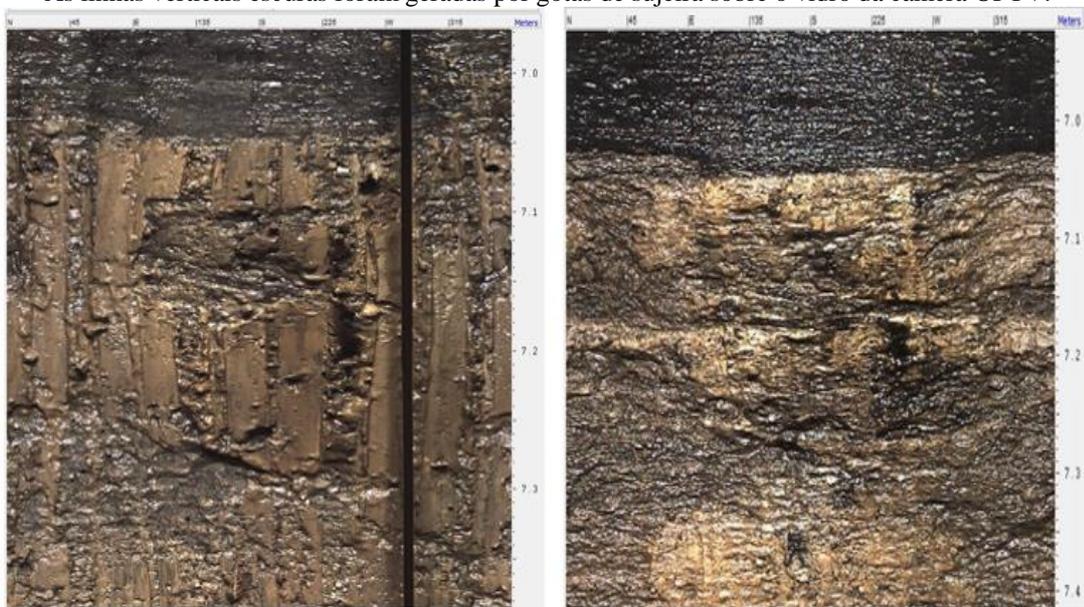
- (1) Furo com água: a sonda OPTV é executada em primeiro lugar, as demais seguem o processo.
- (2) Furo sem água (secos): não há necessidade de uma ordenação específica.

A sonda OPTV é executada em primeiro lugar devido à sua maneira de funcionamento. O furo de sondagem a ser perfilado deve estar em condições favoráveis para a captura da imagem. Isso implica em furos secos ou com fluido transparente. Neste estudo, as condições normais foram de furos com água turva. Assim, foi empregada a adição de uma substância “floculante” (sulfato de alumínio) algumas horas antes da realização de perfilagem no campo. O motivo desta adição de floculante é para decantar o particulado e ter água límpida dentro de furo no momento da perfilagem OPTV. A dosagem do floculante ficou em 20gramas por litro. Foram preparados 200 litros da mistura água/floculante, que foi bombeada para o interior do furo de sondagem.

Por outro lado, se a filmagem com OPTV for executada em furos secos, então é necessário colocar água dentro desses furos para executar a perfilagem com as sondas elétricas GLOG e SPR. A sonda IND permite perfilagem com ou sem fluido.

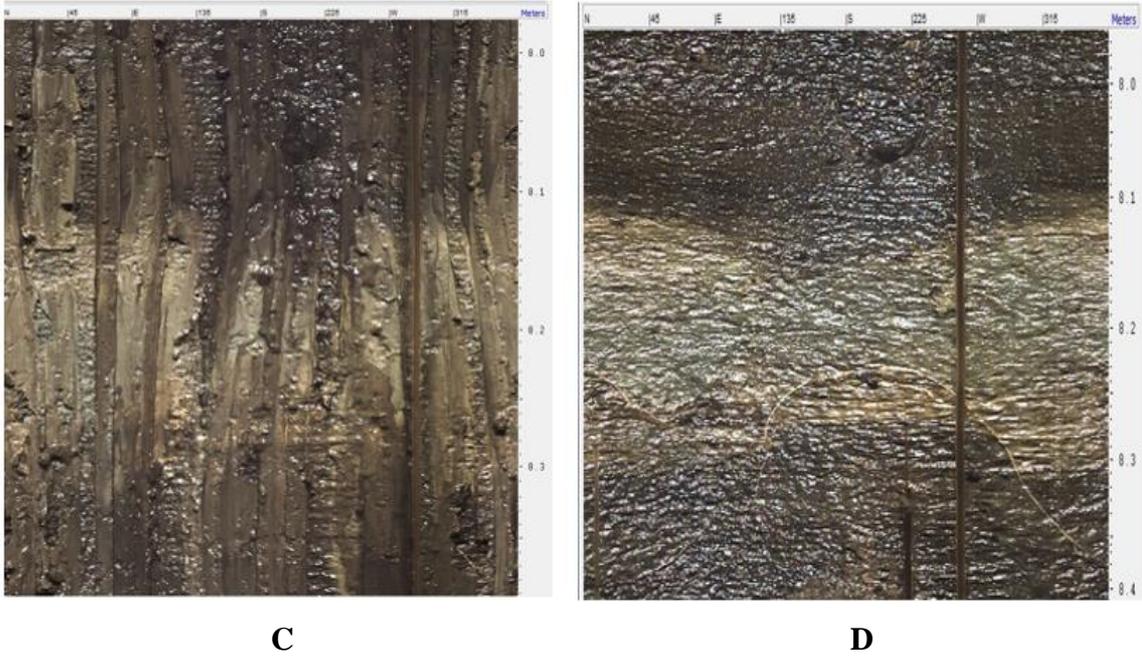
A execução da perfilagem OPTV pode ser feita *uphole* ou *downhole*, enquanto que as sondas elétricas fazem em geral o registro *uphole*. A execução do registro OPTV *uphole* apresentou desvantagens: os centralizadores de sonda OPTV deixam marcas na parede de furo, como é visto nas Figuras 23-A e C, o que prejudica a visualização da parede do furo. Nas figuras 23-B e D, esse efeito não aparece, pois as imagens foram capturadas *downhole* antes que os centralizadores marcassem a parede.

Figura 23 - Imagens ilustrativas de execuções de perfilagem de sonda OPTV *uphole* (A e C) e *downhole* (B e D). As linhas verticais escuras foram geradas por gotas de sujeira sobre o vidro da câmera OPTV.



**A**

**B**



### 3.1.2. Furos de Desmorte

Nas campanhas de furos de desmorte, a perfilagem geofísica foi executada em 2 furos (T1 e T2) de comprimento igual a 13 metros. Estes furos foram executados com perfuratriz percussiva, produzindo perfurações de diâmetro 3 polegadas (75mm), e foram utilizados para os testes de OPTV (Figura 24).

Figura 24 - (A) e (B): Furo de desmorte e perfuratriz de desmorte respectivamente.



**A**

**B**

### 3.1.3. Furos de Sondagem com Recuperação de Testemunho

Neste estudo, foram analisados 12 furos de sondagem com recuperação de testemunhos. Deste total, 06 foram executados na Área B3, 03 no Cerro, 02 no Calombo e apenas um em Seival. Os comprimentos variam de 34 a 78 metros, com diâmetro de 3 polegadas, tendo sido executados com sondas roto-percussivas Sullivan 22 – Joy. Durante cada manobra da sonda, eram extraídos 3m de comprimento de testemunho, dispostos em caixas para descrição das amostras (Figura 25).

Figura 25 - Testemunhos recuperados dentro da caixa.



## 3.2. TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados obtidos por perfilagem foram interpretados visualmente. Não foram feitas correções de diâmetro de furo e presença de fluido nos perfis geofísicos de GN e RES, de modo que se usaram os registros brutos, apenas suavizados por média móvel e reposicionados por deslocamento vertical (*shift*) quando necessário, para melhor concordância com os testemunhos de sondagem.

### 3.2.1. Reconhecimento de estratos nos perfis geofísicos

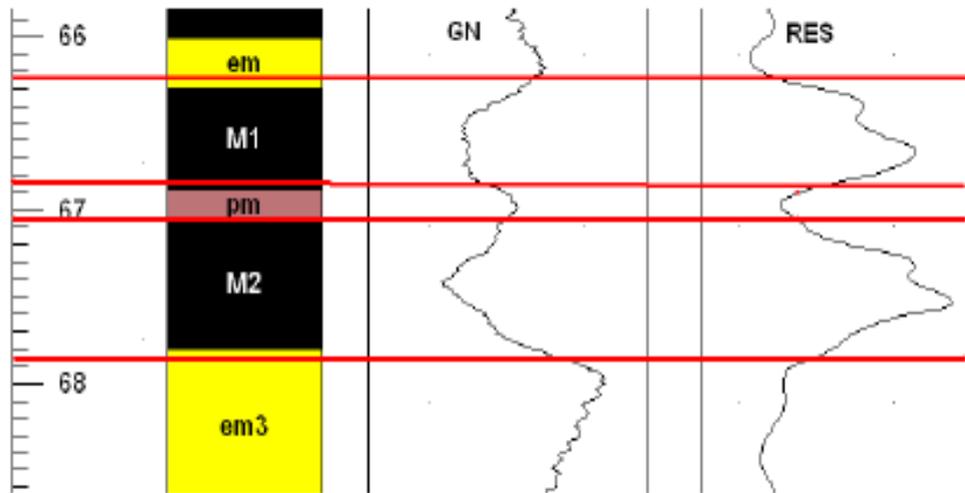
Para o reconhecimento das camadas de carvão em cada depósito mineral, foi feita uma confrontação entre as amostras de sondagem testemunhada contra os intervalos das camadas de carvão supostamente identificados na perfilagem. As imagens da Figura 26 apresentam alguns exemplos de modelos de análise comparativa de perfis coletados de trabalhos de GORELIK (2014) na área B3 e Calombo (A e B) respectivamente.

Para determinar-se, nos perfis geofísicos, o início e fim das camadas de carvão e estéril, usou-se uma das possíveis metodologias descritas em HOFFMAN ET AL.(1982). Trata-se de um método baseado em testes empíricos (*ratio method*) envolvendo os perfis geofísicos e testemunhos de sondagem, no qual se estima a distância (valor da anomalia) entre a resposta do carvão e a da rocha estéril produzida em um determinado contato. Após, se designa uma fração dessa distância como sendo a profundidade daquele contato. No caso presente, a fração designada é 20%, e foi aplicada em todos os perfis de resistividade.

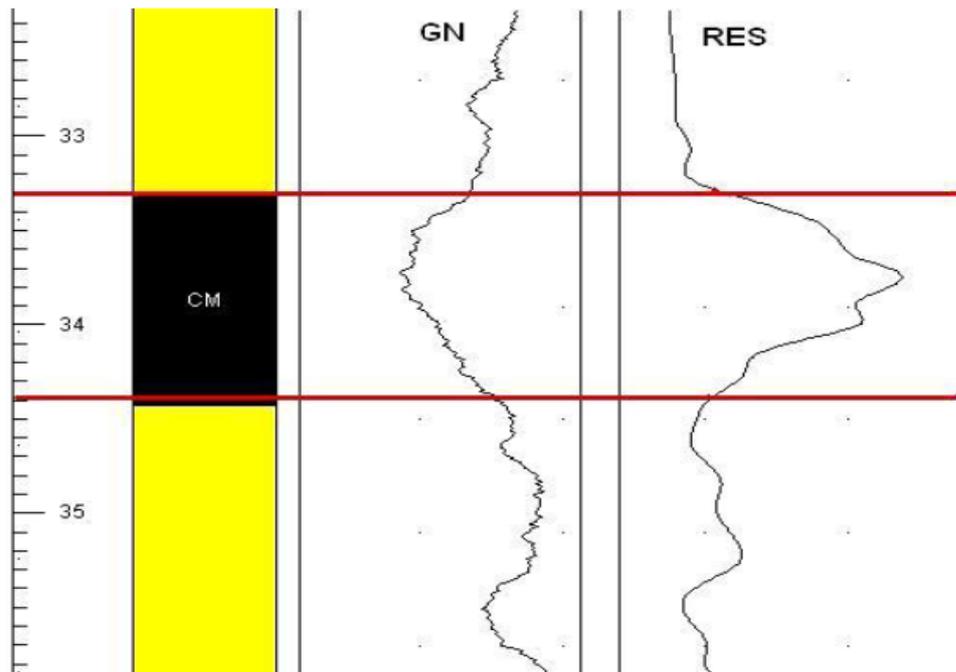
Vale salientar que a identificação de litologia ou camada de interesse é baseada no comportamento de um ou mais parâmetro medidos tais como a resistividade e radiação natural de gama. Para uma definição do pacote estratigráfico, o geofísico deve ter um conhecimento geológico prévio de depósito mineral na área estudada. Porém, o uso da perfilagem geofísica para definição de camada ou de outros parâmetros só pode ser realizado após um número satisfatório de correlações entre os dados geofísicos com os parâmetros obtidos por métodos diretos (p.ex. amostras de sondagem). As imagens (A e B) da Figura 26 ilustram típicos exemplos de como reconhecer o topo e base de camada de carvão.

Com a introdução da sonda OPTV, os problemas enfrentados na determinação de topo e base das camadas ficam mais próximos de serem resolvidos.

Figura 26 - Uma imagem comparativa de perfis obtido da perfilagem com a descrição geológica.



**A**



**B**

Fonte: Gorelik (2014).

## 4. BANCO DE DADOS E LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO, DADOS DE SONDAAGEM E PERFILAGEM GEOFÍSICA

Neste capítulo, serão apresentadas as áreas onde foi aplicada a técnica de perfilagem geofísica. Descreve-se a geologia local e as etapas da coleta de dados por sondagem com recuperação de testemunhos e perfilagem geofísica. Os dados foram coletados em 4 setores diferentes (Área B3, Cerro, Calombo e Seival). Todos estes depósitos de carvão pertencem à empresa Copelmi Mineração Ltda.

### 4.2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO B3

A área do depósito B3 (Figura 27) está localizada no município de Butiá, distante 86 km de Porto Alegre – Rio Grande do Sul, Brasil.

Figura 27 - Localização da área de estudo B3.



#### 4.2.1. Geologia Local

A bacia carbonífera de Butiá está inserida no contexto da Bacia Sedimentar do Paraná. Na região, afloram rochas sedimentares gondwânicas depositadas, principalmente, durante as eras Paleozóica e Mesozóica, com cobertura de sedimentos quaternários associados.

Na área B3, distinguem-se as seguintes unidades litoestratigráficas: Granito Butiá, Embasamento Metamórfico Indiferenciado, Formação Rio Bonito, Formação Palermo, Formação Irati, Formação Serra Geral e Sedimentos Recentes.

As unidades geológicas que ocorrem na área são caracterizadas de forma sucinta a seguir:

**Granito Butiá:** o denominado Granito Butiá tangencia a porção sul da Área B3. Caracteriza-se por sua textura granular grosseira, cores avermelhadas com mineralogia composta por acentuada proporção de feldspato alcalino e quartzo, com escassa biotita.

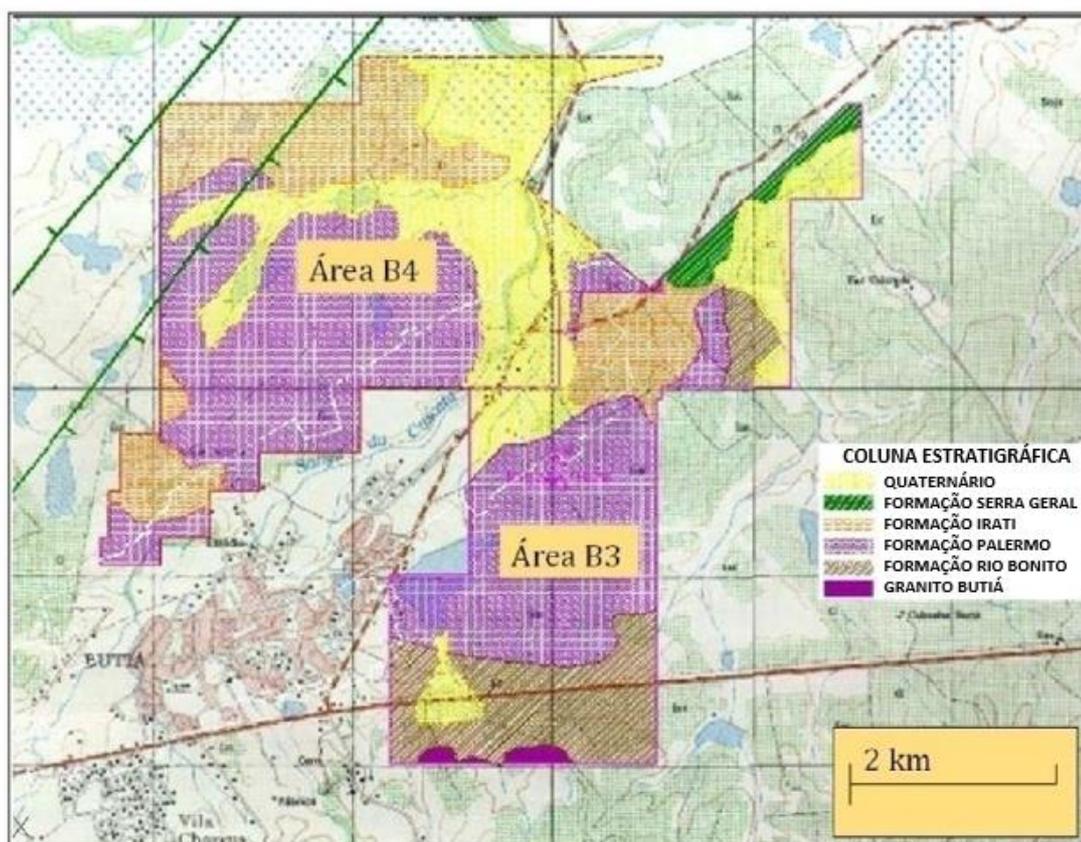
À medida que tais rochas estão inseridas num contexto de tectônica de *horste grabensas* mesmas estão fortemente influenciadas por fenômenos cataclásticos, tendo por consequência hidrotermalização, formação de milonitos e uma forte foliação cataclástica, impedindo, localmente, a própria identificação da rocha original. O hidrotermalismo se manifesta pela extensiva formação de epidotização e silicificação.

A Formação Rio Bonito é a principal unidade estratigráfica da área, sendo que, nesta formação, está inserido o pacote carbonoso de interesse econômico. Trata-se de uma unidade litoestratigráfica de idade Permo-carbonífera, depositada sobre um substrato topograficamente irregular do embasamento granítico. O pacote carbonoso foi gerado em um ambiente lacustre não oxidante, sempre associado a intercalações pelíticas de coloração normalmente escura. A deposição dos pelitos efetuou-se num ambiente aquático calmo, relacionado à subsidência lenta e gradual da Bacia do Paraná, como evento amplo e regional. Escorregamentos subaquáticos de material mais grosseiro, denotando períodos de maior instabilidade da bacia, também, ocorreram.

Litologicamente, a Formação Rio Bonito é constituída por siltitos, argilitos, folhelhos com intercalações de camadas de carvão, pertencentes à fácies de topo da formação. Na base desse pacote, predominam paraconglomerados e arenitos grosseiros. Pequenas variações faciológicas decorrentes de microambientes sedimentares, também, ficaram registradas nas rochas da área.

A área B3 apresenta um zoneamento em função da profundidade das camadas de carvão e o aumento da espessura do pacote carbonoso. No extremo sul da área, a camada A na Figura 28 encontra-se erodida e coberta por sedimentos quaternário, os quais, nessa zona, pela proximidade do embasamento granítico, são formados por areias médias a grosseiras. Nessa região, a Camada M se apresenta errática, e a Camada L1 não é registrada. Em direção ao Norte, a Camada M já apresenta boa continuidade, com início de registro da Camada A.

Figura 28 - Mapa geológico de área B3.



Fonte: Webber (2008)

Na porção norte da área, o pacote encontra-se completo com a Camada L1, atingindo espessuras em torno de 2 metros. Essa condição permanece até o extremo norte da área em que a Camada A adquire espessuras em torno de 1m.

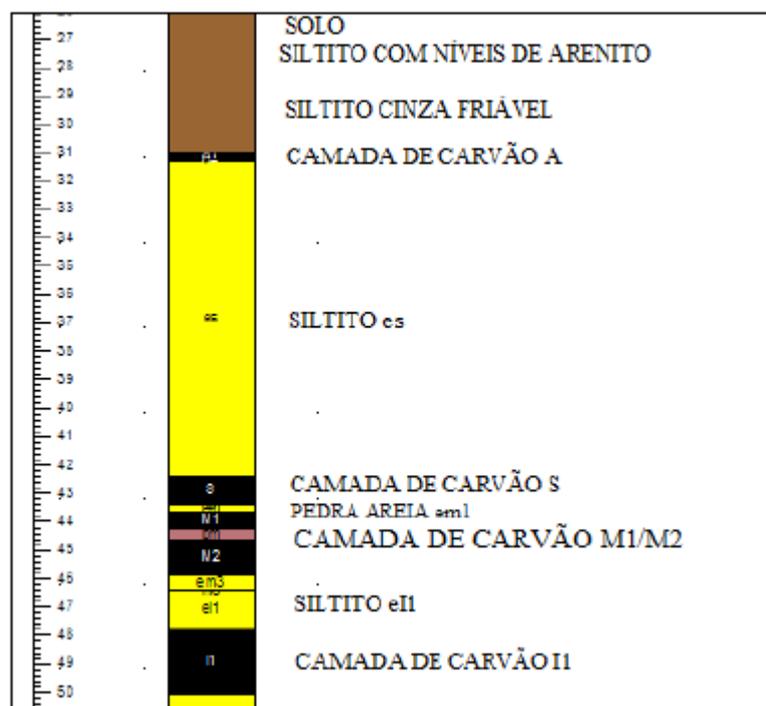
Em toda essa zona, a formação Palermo ocorre sobre o pacote carbonoso, registrando-se a ocorrência de uma camada de carvão adicional denominada Camada L2 juntamente com sedimentos quaternário de espessuras em torno de 4 m.

A cobertura da jazida é composta, em média, por 1 m de solo argiloso que se sobrepõe a 10 m de siltitos com níveis de arenito fino pertencentes à Formação Palermo e uma espessura variável de 15 a 20 m de folhelhos de coloração cinza médio a escura pertencente à sequência deposicional pelítica da Formação Rio Bonito.

Sotoposta a essa litologia, ocorre a primeira camada de carvão, denominada Camada A. A espessura média da cobertura da área sobre a Camada A varia de 25 a 35 metros. A cobertura apresenta-se muito alterada pela ação intempérica conferindo características friáveis ao pacote e favorecendo a descobertura para a lavra a céu aberto sem a necessidade de desmonte por explosivos em sua maior parte.

O pacote carbonoso da Área B3 é composto por quatro camadas de carvão principais, denominadas A, S, M1/M2 e II, alcançando uma espessura média de pacote carbonoso de 21,4m. O perfil geológico médio da área B3 é apresentado na Figura 29 (COPELMI MINERAÇÃO LTDA, 1984).

Figura 29 -Perfil geológico típico observado na área B3.



A Camada A ocorre, na área, apenas como registro estratigráfico, com espessura total de até 0,9 m, sendo composta por alternância de leitos de vitrênio com leitos de silito carbonoso, de aspecto friável, evidenciando baixo grau de diagênese. São características dessa camada a grande quantidade de nódulos de pirita e vênulas de carbonato. Essa camada

apresenta-se contínua, principalmente, na porção norte da área com aumento de espessura e melhoria de qualidade. O estéril intermediário entre as Camadas A e S é constituído por siltitos cinza, friável a fragmentado, com algumas gradações carbonosas, apresentando espessura média de 10,4 m.

A Camada S apresenta espessura média de 0,98 m, normalmente sem presença de estéril intermediário, exceto em alguns furos com pequenos níveis de silito (0,11 m), devendo ser minerada sem seletividade. Nessa camada, predomina o carvão brilhante resultado da grande quantidade de vitrinita, com raros *partings* de silito carbonoso. É comum a presença de leitos de vitrênio e grandes nódulos de pirita. O estéril intermediário entre as Camadas S e M1/M2 é constituído por paraconglomerados, denominado de pedra-areia (petrograficamente, são paraconglomerados cujos clastos de quartzo e feldspato estão imersos em uma matriz pelítico-carbonosa), com espessura média de 0,84 m. Essa rocha foi formada por fluxos de detritos para o interior da bacia durante a deposição do pacote carbonoso.

A Camada M1/M2 possui espessura média de 1,58 m, com intercalação de *parting* de silito carbonoso. Quando a espessura desse *parting* for menor que 0,25 m entre as Camadas M1 e M2 esse será incorporado ao carvão. Quando maior este será removido por seletividade. Com relação à qualidade do carvão, a Camada M1 é composta pela alternância de leitos de carvão brilhante, fosco e silito carbonoso. A Camada M2 caracteriza-se pela alta razão CC/CT (camada de carvão/camada total), próxima de 100%, com predomínio de carvão do tipo brilhante. Essa camada apresenta-se mais homogênea na porção norte da área, com pequenas variações de espessura. Na porção sul, são comuns variações de espessura dessa camada, e/ou erosão sindeposicional, fenômenos comuns na borda da bacia.

Por sua vez, o estéril intermediário entre as Camadas M1/M2 e I1 é constituído por siltitos cinza, por vezes paraconglomerático, com espessura média de 4,03 m, passível de desmonte por explosivos.

A Camada I1 possui espessura média de 1,20 m, ocorrendo em quase toda a jazida exceto na parção sul da área, onde, pela condição de borda de bacia. Nessa camada, predomina os carvões foscos com média a baixa concentração de vitrinita.

A sequência basal ao pacote carbonoso é constituída por intercalações de siltitos e paraconglomerados depositados em ambiente de alta energia. Nesse pacote, eventualmente, ocorre uma camada de carvão de interesse econômico denominado Camada I2, cuja continuidade e aproveitamento estão em investigação.

A geologia não é complexa e o entendimento do comportamento das camadas que compõem o depósito de carvão é conhecido. Dessa forma, o modelo geológico é de domínio da equipe técnica facilitando a interpretação dos furos de sondagem, emprestando confiabilidade ao modelo estabelecido. A lavra de carvão em áreas próximas, na Mina do Recreio e do Butiá 42 Leste, permite assumir as premissas do modelo geológico para avaliação dos recursos de carvão (WEBBER, 2008).

#### 4.3. LOCALIZAÇÃO DE ÁREA DE ESTUDO DE CERRO

##### 4.3.1. Geologia local

A área de interesse localiza-se na borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná, sendo que a deposição dos sedimentos nessa região ocorreu em uma fossa tectônica denominada “Fossa do Camaquã”. Sob essa condição tectônica houve constante reativação dos falhamentos durante o período deposicional.

Ao sul da região onde se encontram as rochas sedimentares da Bacia do Paraná afloram rochas do Grupo Porongos representadas por quartzitos e xistos. Associadas a essas litologias aparecem rochas eopaleozóicas da Formação Santa Bárbara representadas por arenitos e conglomerados avermelhados. Em direção ao norte ocorrem as formações médias e superiores da Bacia do Paraná, destacando-se a Formações Palermo.

A tectônica que atuou na área gerou falhamentos predominantemente N30°E e N50°W. Essas falhas governam a ocorrência de blocos com carvão, cuja preservação deu-se pelos mesmos estarem abatidos. Nos blocos soerguidos, as camadas de carvão de interesse econômico foram parciais ou totalmente erodidas, bem como ao longo das falhas que são representadas por vales encaixados que governam a rede de drenagens. O mergulho regional do pacote sedimentar é em torno de 1° para Norte, ou seja, à medida que nos deslocamos para o norte vamos atingindo formações geológicas mais jovens.

As formações que afloram na área são descritas de forma sucinta a seguir:

i) Grupo Itararé: as rochas pertencentes ao Grupo Itararé afloram nas zonas de cotas mais baixas onde os processos erosivos foram mais intensos, principalmente nos leitos das drenagens, como os arroios Capanezinho e Pedro Paulo, e ao sul da zona de interesse. Está representado por arenitos e siltitos formando ritmitos. São frequentes intercalações de paraconglomerados com seixos e boulders típicos de ambientes glaciais.

ii) Formação Rio Bonito: é a formação predominante na área de interesse, sendo representada por três sequências sedimentares denominadas inferior, intermediária e superior. Na sequência inferior predominam arenitos finos bem classificados, localmente conglomeráticos, com lentes de siltito, camadas e leitos de carvão descontínuos. Já na sequência intermediária, além de siltitos e arenitos, ocorrem camadas de carvão contínuas denominadas I1 (Jeribá), I2 (Jeribá Inferior), M1 (Triângulo Superior), M2 (Triângulo) e M3 (Triângulo Inferior). A sequência superior apresenta um pacote de arenitos claros, finos, bem classificados, com grãos arredondados, às vezes conglomeráticos, com a principal camada de carvão sob o ponto de vista econômico da jazida denominada Camada S (Capanezinho).

iii) Formação Palermo: Recobre a Formação Rio Bonito em contato transicional. É constituída por siltitos argilosos cinza escuros com intercalações de lâminas ou camadas de arenitos finos depositados em ambiente marinho. Para o topo da sequência predominam siltitos e siltitos arenosos laminados.

iv) Sedimentos quaternários: Constituídos por depósitos aluvionares estreitos depositados ao longo das drenagens encaixadas na Formação Rio Bonito, bem como depósitos de encostas (ABOARRAGE E LOPES, 1984).

#### ● Síntese Geológica da Área:

A Formação geológica predominante na área de interesse é a Rio Bonito, com afloramentos de rochas do Grupo Itararé restrita ao leito das drenagens mais profundas onde a erosão foi mais intensa.

Os sedimentos aluvionares formam depósitos argilo-arenosos estreitos, já que a maioria das drenagens é encaixada em falhamentos de direção preferencial NE.

A Formação Rio Bonito é a de principal interesse na área, pois contém as camadas de carvão que estão em processo de lavra. Essas camadas situam-se nas litofácies intermediária e superior conforme já descrito na geologia regional.

As camadas de carvão presentes na área foram denominadas pela Sociedade Mineradora do CERRO como Superior (S), Média (dividida em três bancos M1, M2 e M3) e inferior (dividida em dois bancos I1 e I2).

O perfil geológico típico é apresentado a seguir na Figura 30.

Figura 30 - Perfil geológica típico observado na Área Cerro.



- Faciologia do Pacote Carbonoso:

Apresenta-se a seguir a descrição do pacote carbonoso do topo para a base da sequência nos blocos de lavra:

Camada Carvão S: possui espessura média de 1,69 m, e sua cobertura é representada por um banco de arenito e siltito no contato superior com a camada, com espessura média de 21,10 m. A característica principal dessa camada é a pequena quantidade de material estéril intercalado (*partings*), com um percentual de carvão na camada em torno de 70%.

Intervalo Estéril S – M1: possui espessura média de 9,02 m, com litologias representadas por arenito fino a médio passando para siltito em direção à base.

Camada Carvão M1: possui espessura média de 0,22 m e caracteriza-se por leitos de vitrênio intercalados por leitos de siltito.

Intervalo Estéril M1 – M2: possui espessura média de 2,78 m, sendo composto por siltitos maciços e laminados, na maioria dos casos com leito de carvão com espessura de 0,1 a 0,2 m intercalados.

Camada Carvão M2: possui espessura que varia de 1,01m, sendo caracterizada por leitos de carvão com intercalações de siltitos cinza escuros.

Intervalo Estéril M2 – M3: possui espessura média de 3,06 m, sendo constituído por siltitos escuros.

Camada Carvão M3: possui espessura média de 0,39 m, sendo constituída por carvão com intercalações de siltitos escuros.

Intervalo Estéril M3 – I1: possui espessura média de 13,09 m, sendo as litologias representadas por arenitos e siltitos com grandes variações de espessuras e difícil correlação.

Camada Carvão I1 – I2: apresenta grandes variações de espessura com média de 0,88 m, resultado de um ambiente deposicional instável, sendo negativa em muitas porções da jazida, podendo excepcionalmente atingir 1,50 metros. Caracteriza-se por leitos de carvão com intercalações de silito cinza escuro (COPELMI MINERAÇÃO LTDA, 2005).

#### 4.4. LOCALIZAÇÃO DE ÁREA DE ESTUDO DE CALOMBO

A área objeto situa-se a uma distância de 56 km de Porto Alegre, em direção a oeste. O percurso, a partir da capital do Estado, é feito seguindo-se a BR-116 em direção à cidade de Guaíba. Após percorrer-se 16 km, toma-se a BR-290 à direção oeste, por cerca de 50 km até próximo ao acesso à Barão do Triunfo onde existe um acesso à área a partir da BR290 para norte. A pesquisa se estendeu por uma área de aproximadamente 113 hectares (COPELMI MINERAÇÃO LTDA, 2008).

##### 4.4.1. Geologia Local

A geologia da área de interesse é representada por sedimentos aluvionares quaternários compostos predominantemente por areias médias a grosseiras. Subordinadamente ocorrem níveis argilosos e de cascalho configurando um ciclotema fluvial. Esses sedimentos possuem, na maioria dos casos, matriz argilosa. No topo do depósito ocorre solo argiloso com espessura média da ordem de 1 metro. Esse depósito recobre a formação Rio Bonito que contém o pacote carbonoso de interesse.

A Formação Rio Bonito é representada por sedimentos pelíticos (siltitos, lamitos) e camadas de carvão. Em direção à base ocorrem paraconglomerados e arenitos com estratificações plano-paralela e cruzada acanalada. No topo desta unidade ocorrem as camadas

de carvão, em um pacote carbonoso principal, com espessura média de 20 m na área do empreendimento. A cobertura estéril é composta por sedimentos aluvionares e siltitos cinza em grande parte. Nesse pacote estão presentes as camadas de carvão denominadas, do topo para a base, de A, S1, S2, S3 e M, distribuídas de acordo com o perfil geológico típico apresentado e descritas a seguir:

Camada de Carvão A - Com espessura de 1,15 m com *parting* de silito na base de 0,40 m, caracterizada por leitos de vitrênio com cleats preenchidos por carbonato com intercalações de silito. Essa camada encontra-se muitas vezes erodida pelos sedimentos aluvionares. A cinza bruta da camada é da ordem de 55% e o enxofre em torno de 4%;

Estéril Intermediário E1 (Camada A - Camada S1) - Espessura da ordem de 9,0 m, constituído por siltitos cinza homogênea;

Camada de Carvão S1 - Apresenta espessura da ordem de 0,40 m, caracterizada por carvão brilhante. A cinza bruta da camada é da ordem 40% a 45% e o enxofre de 2% a 4%;

Camada de Carvão S2 - É a camada principal da área por sua espessura, que varia entre 2,5 m e 3,0 m. Composta predominantemente por carvão brilhante, tendo sido parcialmente minerada em subsolo. A cinza bruta da camada é da ordem de 40% e o enxofre é de 2% a 3%;

Estéril Intermediário E2 (S2-S3) - Possui espessura da ordem de 1,60 m, sendo composto por siltitos cinza, eventualmente paraconglomerado;

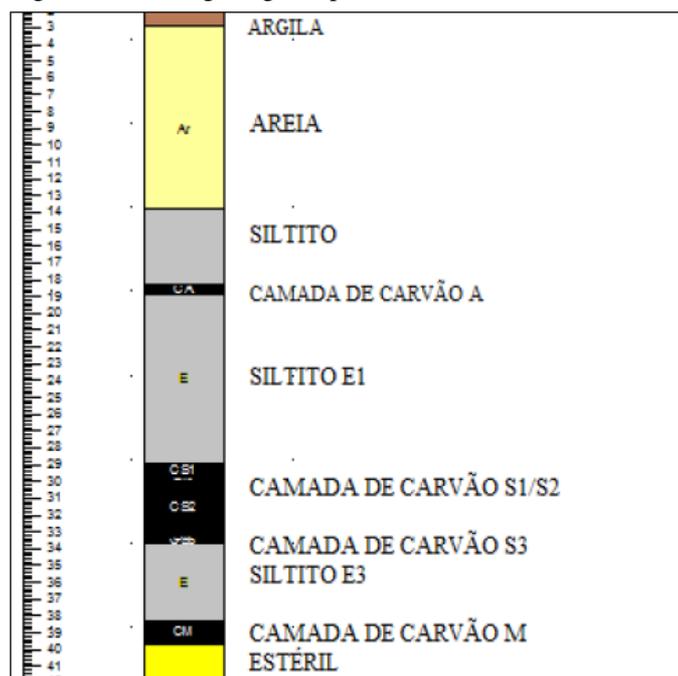
Camada de Carvão S3 - Caracterizada por carvão brilhante e fosco, possui espessura da ordem de 0,60 m. A cinza bruta da camada é da ordem de 40% e o enxofre é de 2% a 4%;

Estéril Intermediário E3 (S3-M) - Possui espessura da ordem de 4,0 m, sendo composto por siltitos cinza e intercalado por uma camada de paraconglomerado;

Camada de Carvão M: Essa camada tem espessura da ordem de 1,0 m, sendo composta por carvão predominantemente fosco. A cinza bruta da camada é da ordem de 50% e o enxofre é de 1% a 2% (COPELMI MINERAÇÃO LTDA, 1984).

Apresenta-se, a seguir (Figura 31), o perfil geológico típico da jazida da ÁREA CALOMBO.

Figura 31 - Perfil geológico típico observado na Área Calombo.



#### 4.5. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DE SEIVAL

A área de estudo de Seival é localizada no município de Candiota, distante de 300 km de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. O local, cuja extensão é de aproximadamente 1.890 hectares.

##### 4.5.1. Geologia da Bacia Sedimentar de Candiota

A geologia das áreas de Seival e Candiota, onde estão localizadas as explorações de carvão, é composta pelas rochas do complexo Cambaí, grupo Itararé, formação Rio Bonito, formação Palermo e sedimentos aluvionares.

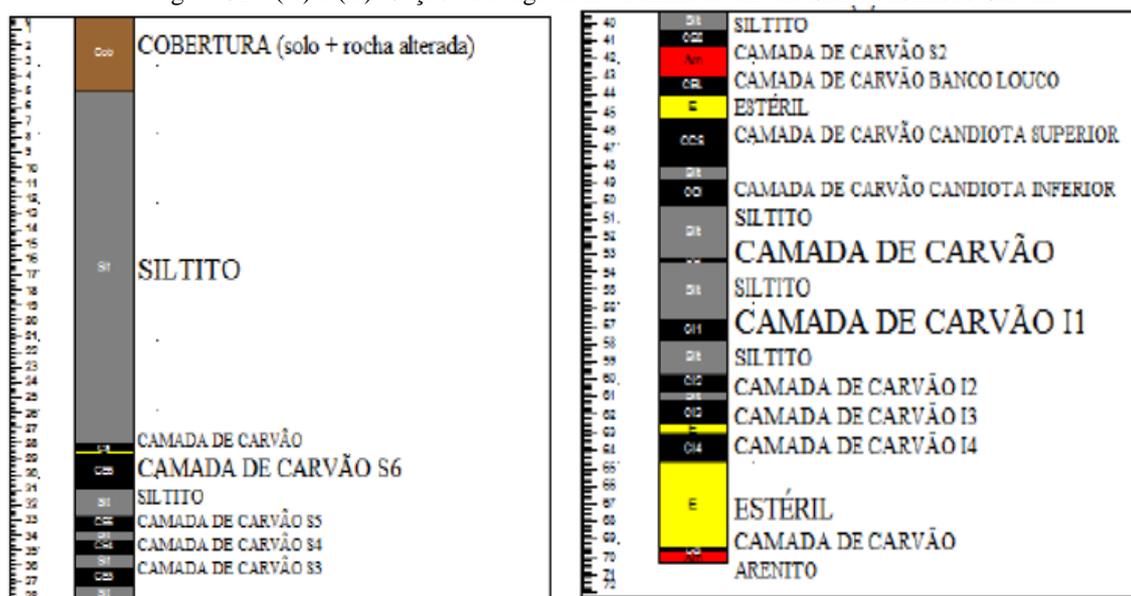
O embasamento é representado pela suíte metamórfica Cambaí, composta por gnaisses, muitas vezes recortados por granitóides mais jovens, localmente com lentes de mármore encaixadas. Em algumas zonas da bacia, o embasamento das formações sedimentares é formado por arenitos arcoseanos e conglomerados do grupo Guaritas. Essa situação só é identificada em sondagens profundas.

O grupo Itararé é formado por paraconglomerados e arenitos, evoluindo para diamictitio e ritmitos, que preenchem vales do embasamento cristalino. As rochas do grupo Itararé são encontradas em sondagens, aflorando a leste da região de estudo.

A formação Rio Bonito, de idade Permocarbonífera, é a unidade de maior importância na região, seja pela presença das camadas de carvão, seja por sua ampla distribuição. Compõe-se, basicamente, pela alternância de arenitos finos, localmente médios a grosseiros conglomeráticos e horizontes pelíticos com camadas de carvão. A espessura dessa formação, considerando-se as regiões onde se desenvolve todo o pacote, é da ordem de 60 m, sendo uma sua característica importante a homogeneidade com raras e localizadas variações faciológicas.

A rigor, a formação Rio Bonito é composta por três horizontes pelíticos com camadas de carvão, separados entre si por arenitos finos e leitos carbonosos, decorrentes das mudanças do ambiente deposicional, conforme demonstrado na Figura 32 (a) e (b) e descrito a seguir.

Figura 32 - (A) e (B): Seção estratigráfica – Jazida de carvão Candiota/Bloco Seival.



(A)(B)

A base da sequência é formada por sedimentos clásticos de médios a grosseiros de cor cinza clara e origem flúvio deltaica, com espessuras da ordem de 10 a 30 m. Raramente nesse intervalo são identificados leitos carbonosos. Característica importante dessas litologias é sua grande porosidade, decorrente da granulometria e baixo grau de cimentação da rocha.

Imediatamente acima dessa sequência basal, encontra-se o primeiro horizonte pelítico – carbonos, composto por 4 camadas de carvão (I4, I3, I2, I1) separadas entre si por siltitos

cinza. A espessura total desse horizonte é da ordem de 5 a 7 m, sendo característica dos carvões desse horizonte o alto teor de pirita, principalmente da camada I4.

Acima do pacote pelítico-carbonoso inferior, são encontrados siltitos que gradam para arenitos médios a grosseiros de origem deltaica e intensa cimentação carbonática, com consequente baixa permeabilidade e espessura da ordem de 5 a 7 metros. Sempre em direção ao topo da formação Rio Bonito, ocorre, acima dessas litologias, o horizonte “Candiota” que é o mais importante sob o ponto de vista de exploração de carvão mineral esse horizonte contém a camada Candiota, que é minerada atualmente pela Companhia Riograndense de Mineração e já foi minerada na Mina Seival.

A camada Candiota compõe-se de dois bancos de carvão, a saber: Candiota Superior (CS), com espessura de 2 a 3,2 m e Candiota Inferior (CI), com espessura de 1,30 a 2,30 m, separados entre si por argilito cinza claro com espessura da ordem de 0,60 metros. No topo desse pacote, ocorre um leito de carvão com espessura em torno de 0,60 m denominado de Banco Louco (BL), constituído de carvão com alto teor de cinza e siltitos intercalados.

Acima do Banco Louco, aparecem arenitos de finos a muito finos, alminados, de cor amarela, em afloramento e com origem a partir de ilhas de barreira, e a camada de carvão S2, que, face à sua deposição em ambiente de alta energia, tem como característica grande variação de espessura e de nível de ocorrência. A espessura desses arenitos varia de 2 a 4 m, seguidos por siltitos cinza com leitos de carvão (C1 e C2) com um nível de arenito com matéria carbonosa no topo. O pacote de arenitos, considerando-se a camada S2 e os leitos de carvão intercaladas e os pelitos do topo, atingem entre 8 a 10 m de espessura.

O terceiro pacote pelítico ou pacote superior é composto por 4 camadas de carvão (S3, S4, S5 e S6), localmente ocorrendo uma quinta camada (S7) nas áreas onde foi preservada da erosão pela formação Palermo. Essas camadas possuem espessuras individuais de 1 a 2 m, separadas por siltitos, perfazendo 7 a 8 metros de espessura.

A ocorrência da formação Rio Bonito integral é típica do Bloco Seival. Já no Bloco Candiota, ocorrem às camadas I4 a S2, raramente S3. Essa diferença deve-se ao processo de falhamento que soergueu o Bloco Candiota, acelerando os processos erosivos na sua zona de ocorrência e suprimindo as camadas superiores.

A formação Palermo faz contato brusco com a formação Rio Bonito, muitas vezes erodindo a camada de carvão S7 e até S6. Essa informação é representada por siltitos laminados com *Wavy* intensa bioturbação, com níveis milimétricos de arenitos finos intercalados. Localmente, sobre essas litologias ocorrem arenitos finos estratificados, denominados de

“tempestitos” e também pertencentes à formação Palermo. Essa formação tem ocorrência mais comum no Bloco Seival, principalmente junto ao falhamento do Passo da Conceição. A espessura total dessa formação no Bloco Seival atinge 40 metros.

As formações Estrada Nova e Irati ocorrem a oeste e sudoeste da área do projeto, sendo compostas por pelitos e folhelhos, localmente com níveis calcários de origem marinha.

Os sedimentos quaternários são compostos por areias e seixos localizados ao longo das planícies aluvionares, destacando-se as do arroio Candiota e a do Rio Jaguarão como as de maior expressão (COPELMI MINERAÇÃO LTDA, 2005).

#### 4.6. APRESENTAÇÃO DE DADOS COLETADOS

Neste tópico, é apresentado o conjunto de furos usados e os perfis geofísicos disponíveis para cada furo (Tabela 6).

Tabela 6 - A tabela de coleta de dados indicando os nomes de furos, perfis coletados e data coletados.

Nome de Furo	Perfis Coletados				Data Coleta
	GLOG	SPR	IND	OPTV	
B3 – 60	Sim	Sim	Não	Não	01-03-2011
B3 – 61	Sim	Sim	Não	Não	11-03-2011
B3 – 62	Sim	Sim	Não	Não	21-03-2011
B3 – 63	Sim	Sim	Não	Não	06-05-2011
B3 – 66	Sim	Sim	Não	Não	02-06-2011
B3 – 72	Sim	Sim	Sim	Não	08-10-2013
CRN – 72	Sim	Não	Sim	Não	04-05-2010
CRN – 81	Sim	Sim	Não	Não	24-03-2011
CRN – 82	Sim	Sim	Não	Não	29-03-2011
B3 - T1	Sim	Não	Não	Sim	02-04-2015
B3 - T2	Sim	Não	Não	Sim	02-04-2015
CAL – 57	Não	Sim	Não	Sim	22-06-2015
CAL – 58B	Não	Não	Sim	Sim	24-07-2015
RA – 48	Não	Sim	Não	Sim	29-06-2015
SVN – 37	Sim	Sim	Sim	Sim	30-07-2015

Foram utilizados 15 furos no total. T1 e T2 são furos de desmonte (não testemunhados), enquanto o restante (13) são furos de sondagem com recuperação de testemunhos. Apenas seis furos apresentam imagens de OPTV. O furo RA-48 pertence ao depósito situado em Arroio dos Ratos e trata-se de um furo usado apenas para testes de imagem com o OPTV.

## 5. ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo, são apresentados e analisados os furos de sondagem definidos na Tabela 6, com vistas à detecção e determinação de espessuras dos estratos de carvão baseando-se no contraste de resistividade proporcionada por estes estratos. Comparações entre espessuras de carvão obtidas pela análise de testemunhos e por perfilagem de resistividade são feitas ao longo do texto.

Além disso, nos tópicos 5.1 a 5.3 a seguir são analisados alguns testes feitos para viabilizar o aproveitamento efetivo da sonda OPTV, variando-se condições como presença ou não de água, adição de floculante (para redução do particulado em suspensão) e nível de iluminação proporcionado pela OPTV. Conforme será mencionado mais adiante no texto, a OPTV pode representar um apoio importante às demais sondas de perfilagem, podendo proporcionar uma visualização direta dos estratos de carvão, com resolução vertical superior aos outros dispositivos.

### 5.1. ANÁLISE DE IMAGENS OPTV EM FUROS DE DESMONTE

Estes testes foram feitos em dois furos usados para desmonte do carvão situados em banca de lavra de mina a céu aberto (furos T1 e T2), executados com perfuratriz percussiva (fluido de perfuração: ar), com diâmetro nominal 3,5” e aproximadamente 13m de profundidade, ambos localizados na área B3.

- Teste de Furo Seco: primeiramente, a sonda OPTV foi corrida no furo seco T1, com registros sendo gravados *downhole* (da superfície para o fundo do furo). A Figura 33 apresenta o resultado do teste.

- Teste de Furo Lavado: após a perfilagem em furo seco, o mesmo foi lavado com pequeno volume de água, apenas para remoção da poeira superficial, e a perfilagem foi executada novamente. A imagem produzida neste segundo teste à primeira vista pareceu possuir qualidade adequada (Figura 33 - imagem de furo lavado). Entretanto, um exame mais cuidadoso mostra que a parede molhada se apresenta muito escura, não permitindo a discriminação entre estratos de carvão e litologias estéreis. As Figuras 34 e 35 demonstram que o furo lavado não apresenta todos os detalhes observáveis em furo seco.

Figura 33 - Teste no furo T1 (Área B-3) – Imagem comparativas de furo lavado (esquerda) e não lavado (direita).

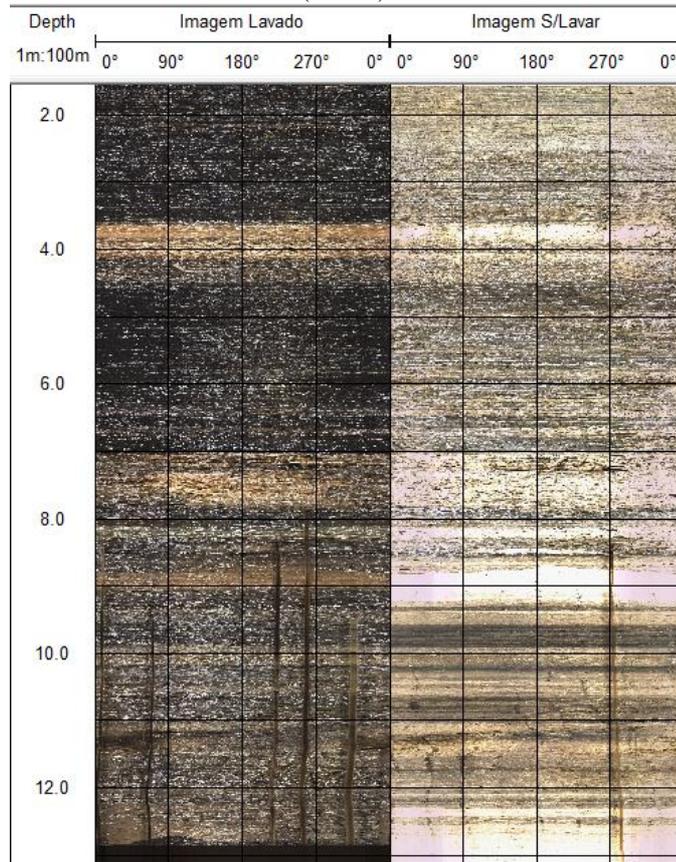
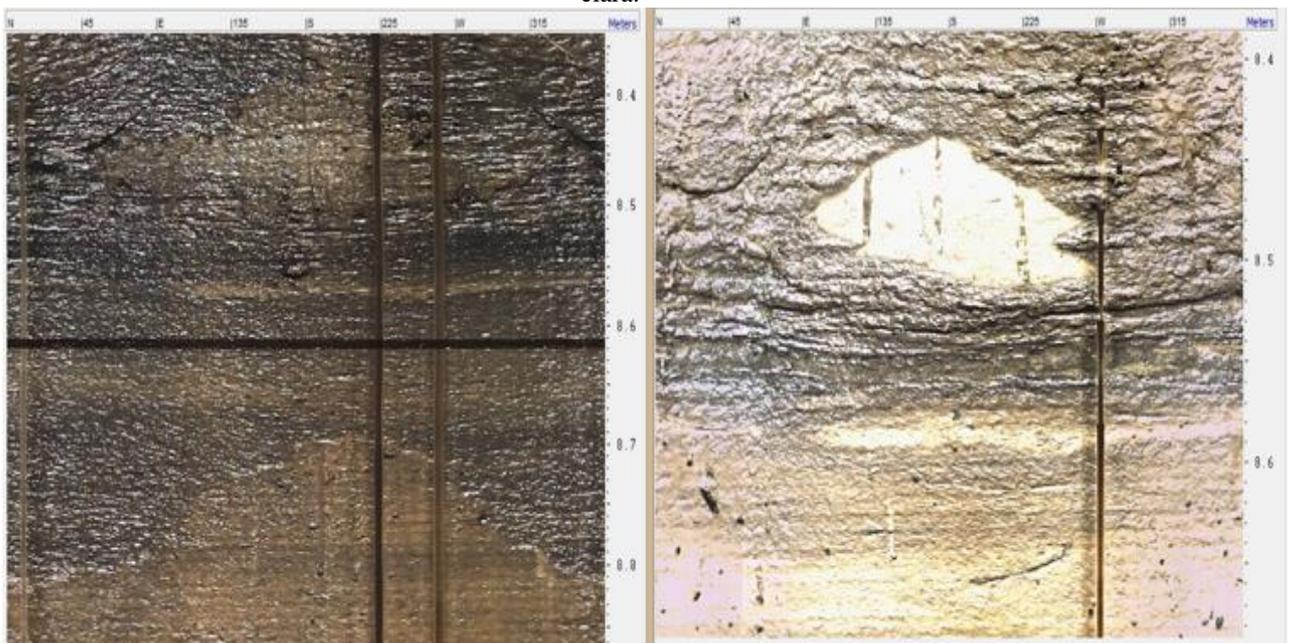


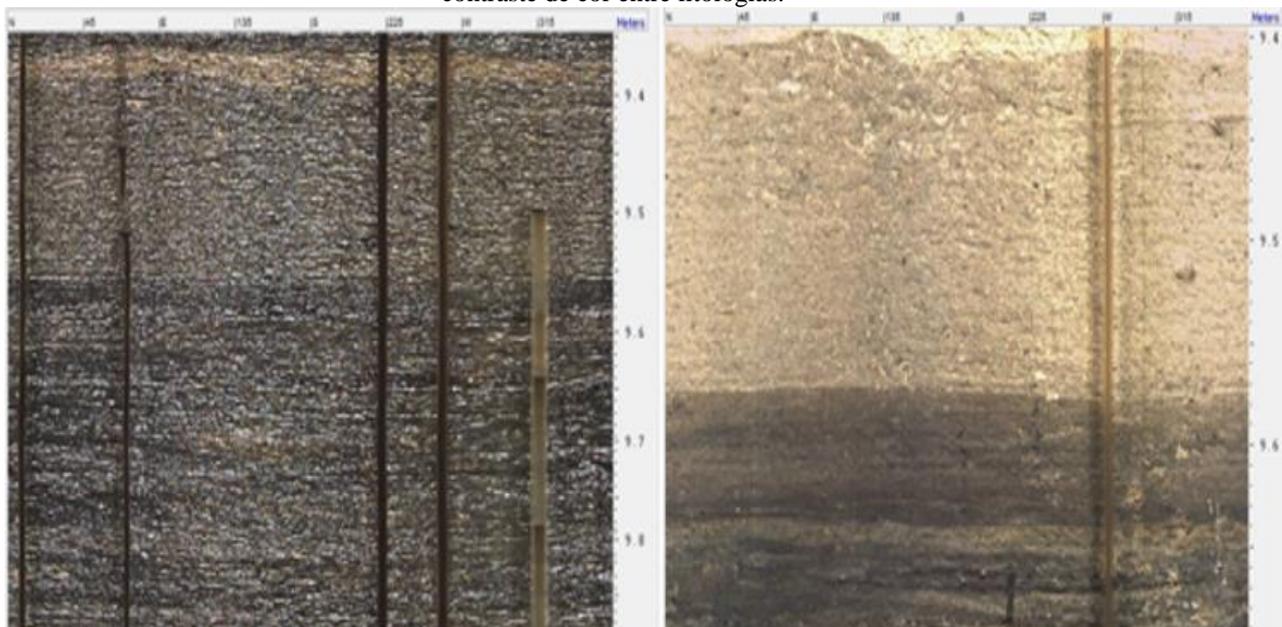
Figura 34 - Imagens do furo T1 - (A) furo lavado e (B) furo seco mostrando aparecimento de material de cor clara.



A

B

Figura 35 - Imagens de T1 - (A) furo lavado sem indicação de contraste entre litologias e (B) furo seco, com contraste de cor entre litologias.



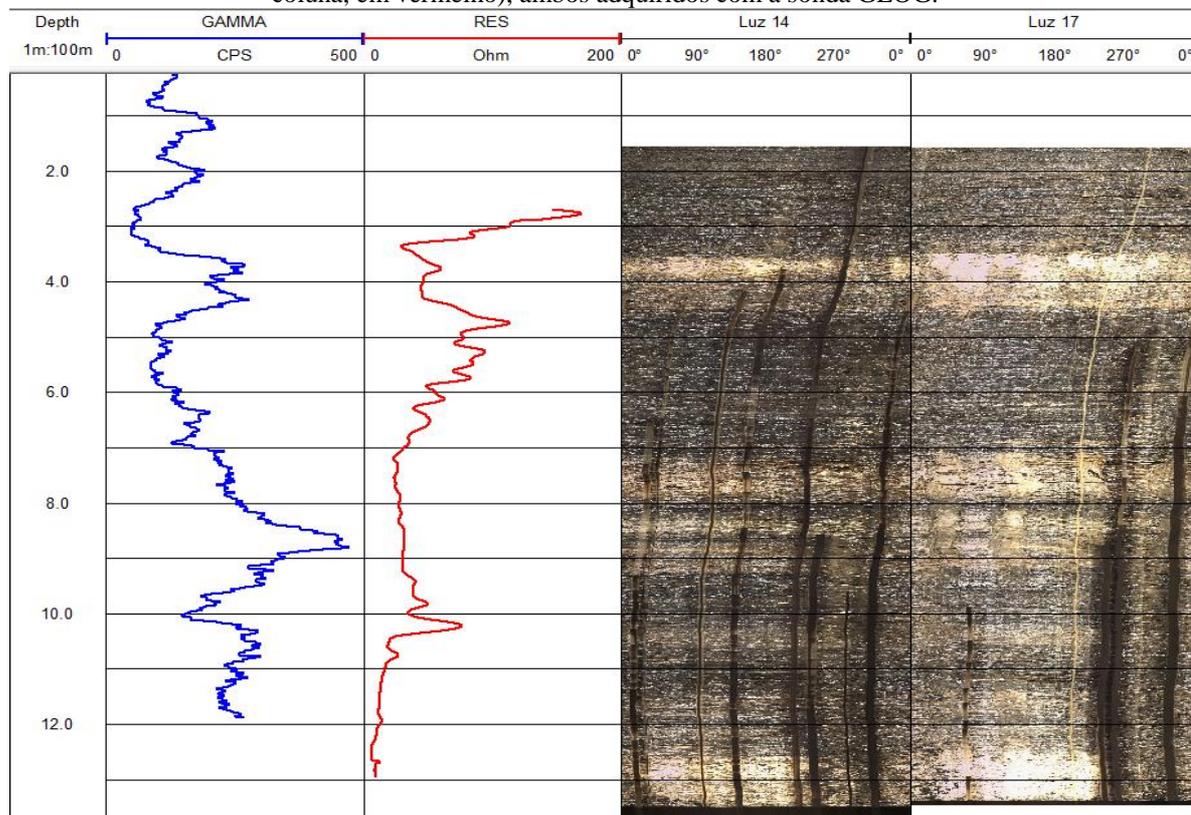
A

B

- Teste de Iluminação: com o objetivo de escolher o nível de iluminação correto a ser utilizado durante a perfilagem, testes de definição do nível ideal são feitos no início da perfilagem. O furo T2 foi perfilado a seco e a Figura 36 mostra as imagens produzidas pela OPTV para dois níveis diferentes de iluminação (14 e 17). A título de ilustração, são apresentados também os perfis de NG e RES (*guard-log*), junto às imagens. Observa-se que ambos os níveis de iluminação permitem um reconhecimento satisfatório das litologias. Outros testes com iluminação fora dessa faixa mostraram dificuldades para o reconhecimento litológico. Nota-se que excessiva iluminação provoca problemas de cor e saturação, como no caso de formações geológicas coloridas ou formações muito claras. Desta forma, iluminação na faixa de 14 a 17 pode ser ótima para depósitos de carvão, mas não indicado para outros depósitos.

Com os resultados acima, recomenda-se não lavar os furos de desmonte e usar iluminação entre 14 e 17 constantes ao longo de todo o furo.

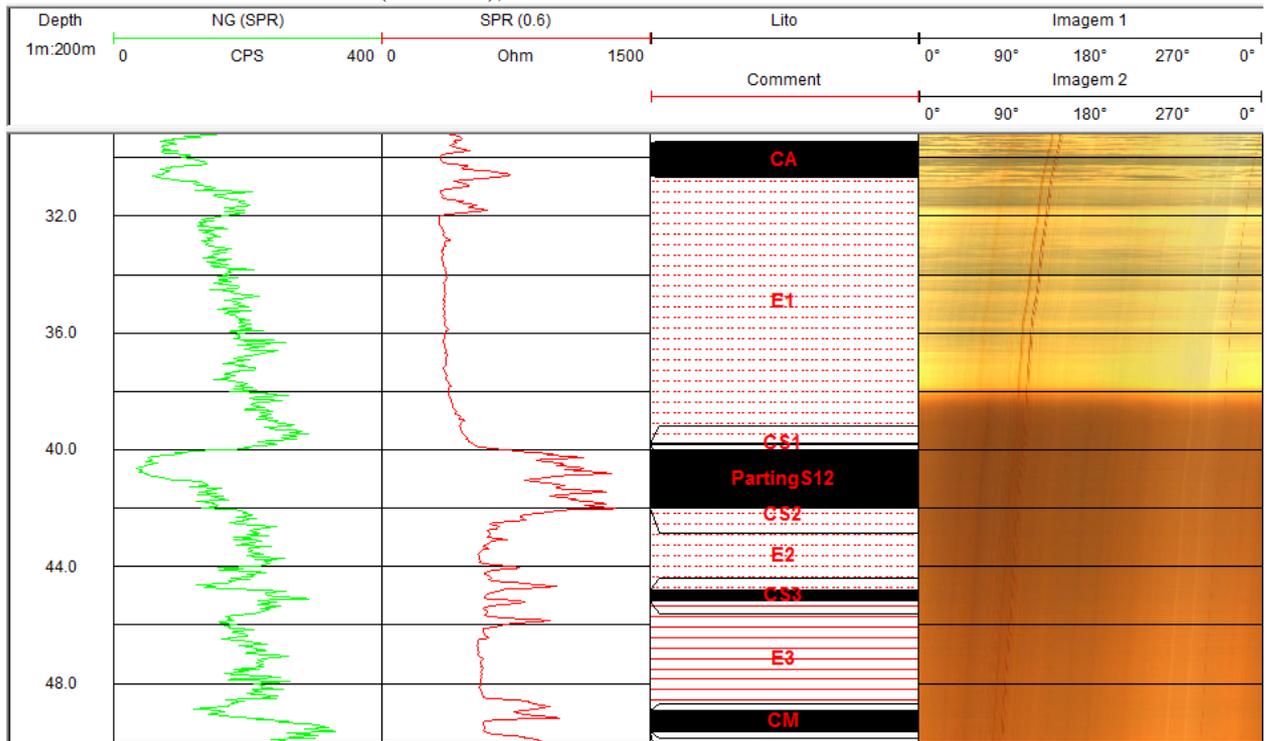
Figura 36 - Teste no furo T2 (Área B-3) – Imagem comparativa com a iluminação nos níveis 14 e 17. Adicionalmente, a primeira coluna (esquerda) mostra o perfil gama natural (em azul) e resistividade (segunda coluna, em vermelho), ambos adquiridos com a sonda GLOG.



## 5.2. ANÁLISE DE IMAGENS DE OPTV EM FURO COM ÁGUA DECANTADA

O problema de capturar boas imagens de OPTV em furos de sondagem preenchido com fluido de perfuração consistindo de “água doce” (água obtida em cursos d’água próximos ao local de sondagem) foi avaliado por meio de um teste na área de Calombo (furo CAL-57). A água doce foi adicionada no furo de sondagem, após o término da perfuração, deixando-se um período de 48 horas para a eventual decantação de todo o particulado em suspensão antes da perfilagem. A Figura 37 mostra o resultado de teste, onde registros de SPR e NG também foram feitos. A identificação via OPTV da primeira camada de carvão (29 m) não foi possível, pois a mesma não apresentou a coloração escura esperada, provavelmente pela turbidez do fluido. A partir de 38 metros de profundidade, a imagem torna-se muito escura, não permitindo qualquer visualização de estratos. Os perfis SPR e NG, no entanto, marcam os estratos de carvão ao longo do perfil. Com este teste, concluiu-se que a simples lavagem com água e posterior decantação não basta para capturar-se boas imagens de OPTV. Outro teste, com a adição de um floculante (sulfato de alumínio), é descrito no tópico a seguir.

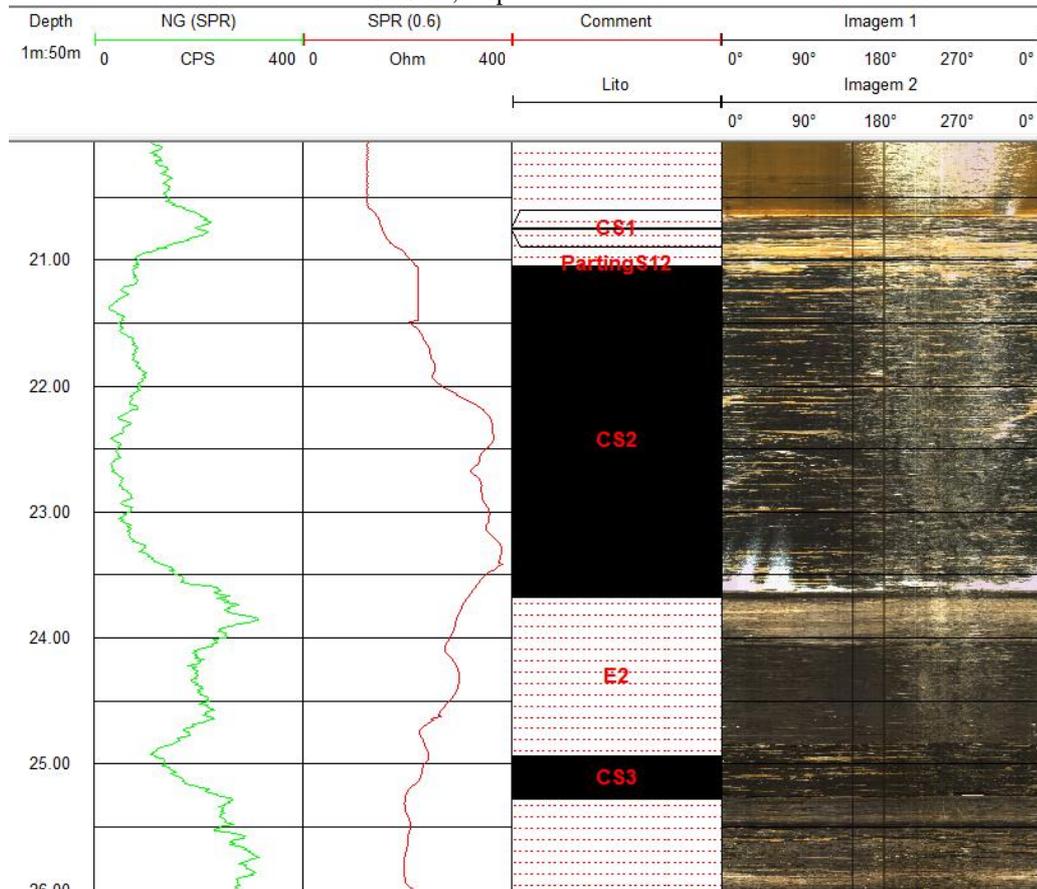
Figura 37 - Teste de água decantada de furo (Cal – 57) em Calombo. Notar os perfis gama natural (verde) e SPR (vermelho), marcando os estratos de carvão.



### 5.3. ANÁLISE DE IMAGENS DE OPTV EM FURO COM ADIÇÃO DE FLOCULANTE

Este teste foi feito no município de Arroio dos Ratos, em furo de sondagem (RA-48) próximo à mina do Calombo. O furo foi lavado com água doce, com adição de sulfato de alumínio na água de lavagem, para dispersar o floculante ao longo de todo o furo. A perfilagem foi realizada após 48 horas de espera. O resultado é apresentado na Figura 38. A imagem é bastante clara, tanto para a detecção das camadas de carvão e estéril, quanto para a identificação de fraturas nas rochas.

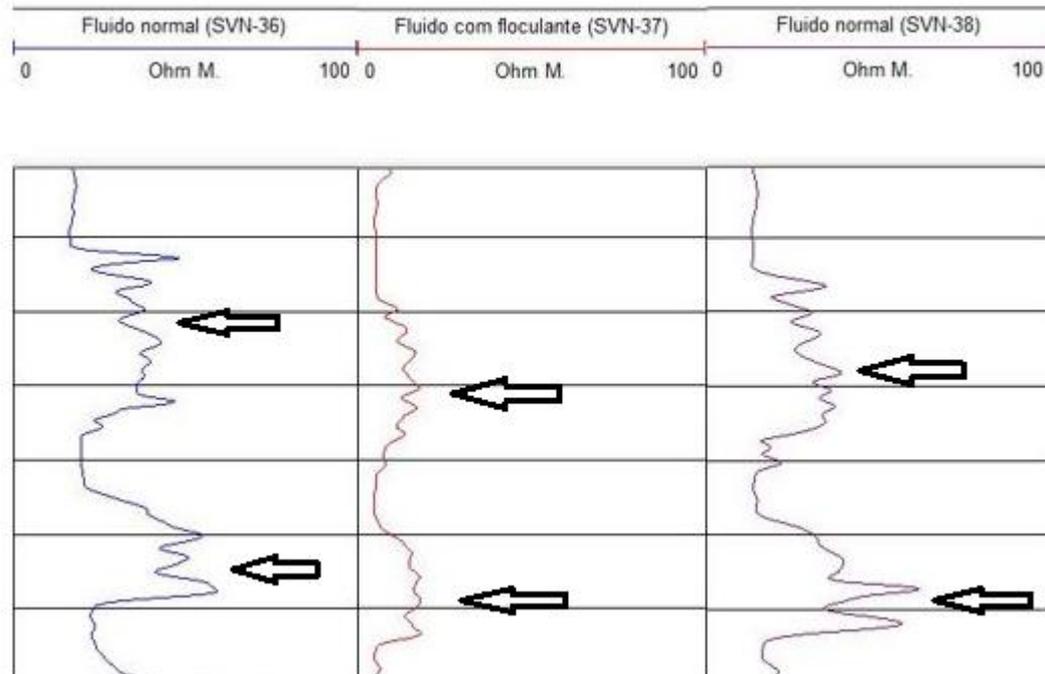
Figura 38 - Teste em RA-48 com adição de floculante. Os registros em verde e vermelho são de gama natural e SPR, respectivamente.



### 5.3.1. Efeito do Floculante na Medida de Resistividade dos Estratos

É importante observar a resposta do floculante “sulfato de alumínio” em relação à resistividade registrada pelos perfis elétricos. O fluido floculante adicionado tem grande efeito na medida de resistividade feita pelas sondas, sendo que houve significativa queda no valor de resistividade aparente das litologias. A Figura 39 mostra uma comparação de 3 furos próximos (SVN 36, 37 e 38) onde SVN-37 foi perfilado com floculante. Como o registro de resistividade dos estratos apresenta-se muito baixo quando usa-se fluido com floculante, isto prejudica a perfilagem, pois diminui a capacidade de identificação das litologias.

Figura 39 - Imagem indicando o efeito do floculante nas resistividades lidas no furo SVN-37, para comparação com outros furos próximos (SVN-36 e 38). As camadas de carvão são indicadas pelas setas pretas.



O efeito da mudança de resistividade do fluido com floculante foi medido em laboratório, com o uso de um condutivímetro (Figura 40). Foram comparadas as resistividades de amostras de (1) água potável, fornecida pela rede de distribuição municipal, e (2) água potável misturada com floculante, em concentração de 20 gramas/litro (esta foi a concentração usada nos furos de sondagem com OPTV). As medidas com condutivímetro mostraram resistividades de 97  $\Omega\text{m}$  para a amostra (1) e 1,7  $\Omega\text{m}$  para a amostra (2) com floculante.

Figura 40 - Análise de condutividade do fluido com floculante. Ao esquerda, jarra com floculante e à direita, jarra sem floculante.



#### 5.4. ANÁLISE DE DADOS DE SONDADEM TESTEMUNHADA

O texto que segue apresenta cada um dos furos de sondagem utilizados neste trabalho, detalhando os aspectos relevantes quando ao comportamento dos perfis geofísicos, e comparando cada perfil geofísico com a descrição geológica. Tabelas comparativas contendo as espessuras de camadas de carvão, determinadas a partir de cada perfil e por inspeção de testemunhos de sondagem, são também apresentadas.

##### 5.4.1. Área B3

A seguir serão analisados 6 furos referentes à Área B3. Estes furos foram perfilados com duas ou três das sondas (GLOG, SPR e IND) de interesse neste trabalho. A Tabela 7 apresenta os estratos de carvão e as respectivas sondas utilizadas em cada furo. Todos estes furos têm seus diâmetros de 75mm e a presença de fluido (água doce). Ainda na Tabela 7, aparecem comparações entre espessuras de camadas de carvão via perfilagem e a partir do exame dos testemunhos de sondagens.

Tabela 7 - Estratos de carvão dos furos de sondagem na Área B3 e espessuras estimadas de carvão definidos por descrição geológica e perfis de resistividade. Esp. = Espessura; ND = Registro Não Disponível; NV = Contato Litológico Não Visível.

Furo	Sondagem				Perfilagem								
	Camada	Testemunho			GLOG			SPR			IND		
		De	Para	Esp	De	Para	Esp	De	Para	Esp	De	Para	Esp
B3 - 60	S	30.17	30.74	0.57	30.5	31	0.5	30.53	30.98	0.45	ND	ND	ND
B3 - 60	Leito	32.18	32.56	0.38	32.26	32.59	0.33	32.28	32.59	0.31	ND	ND	ND
B3 - 60	M1	33.07	33.73	0.66	33	33.73	0.73	32.86	33.76	0.9	ND	ND	ND
B3 - 60	M2	34.03	35.43	1.4	33.96	35.25	1.29	NV	NV	NV	ND	ND	ND
B3 - 61	S	63.23	64.36	1.13	63.08	64.28	1.2	NV	NV	NV	ND	ND	ND
B3 - 61	M2	66.28	67.45	1.17	66.38	67.38	1	NV	NV	NV	ND	ND	ND
B3 - 62	A	28.88	29.1	0.22	29.32	29.49	0.17	29.4	29.5	0.1	ND	ND	ND
B3 - 62	S	41.51	42.38	0.87	41.49	42.15	0.66	41.56	42.18	0.62	ND	ND	ND
B3 - 62	M1	43	43.59	0.59	42.79	43.53	0.74	42.76	43.51	0.75	ND	ND	ND
B3 - 62	M2	43.86	44.66	0.8	43.75	44.63	0.88	43.8	44.73	0.93	ND	ND	ND
B3 - 63	A1	30.24	30.6	0.36	29.14	29.95	0.81	29.17	30	0.83	ND	ND	ND
B3 - 63	A2	30.79	31.05	0.26	30.07	30.47	0.4	30.08	30.46	0.38	ND	ND	ND
B3 - 63	B	32	32.21	0.21	31.27	31.58	0.31	NV	NV	NV	ND	ND	ND
B3 - 63	S	42.22	43.78	1.56	41.9	43.55	1.65	41.93	43.06	1.13	ND	ND	ND
B3 - 63	M1	44.14	44.71	0.57	43.92	45.04	1.12	43.2	45.02	1.82	ND	ND	ND
B3 - 63	M2	45.99	46.74	0.75	45.46	46.55	1.09	45.08	46.26	1.18	ND	ND	ND
B3 - 63	M3	47.43	48.06	0.63	47.03	47.72	0.69	NV	NV	NV	ND	ND	ND
B3 - 63	L1	49.71	51.96	2.25	49.75	52.2	2.45	49.74	52.5	2.76	ND	ND	ND
B3 - 66	A1	43.4	43.71	0.31	42.99	43.28	0.29	43	43.28	0.28	ND	ND	ND
B3 - 66	A2	43.89	44.19	0.3	43.47	43.77	0.3	43.47	43.78	0.31	ND	ND	ND
B3 - 66	B	45.09	45.24	0.15	44.6	44.82	0.22	NV	NV	NV	ND	ND	ND
B3 - 66	S	56.02	56.88	0.86	55.97	56.9	0.93	55.96	56.9	0.94	ND	ND	ND
B3 - 66	L	57.39	57.86	0.47	57.26	57.83	0.57	57.12	58.05	0.93	ND	ND	ND
B3 - 66	M1	58.48	59.2	0.72	58.25	59.08	0.83	58.3	59.07	0.77	ND	ND	ND
B3 - 66	M2	59.43	60.62	1.19	59.23	60.47	1.24	59.25	60.42	1.17	ND	ND	ND
B3 - 66	I1	61.72	64.02	2.3	61.51	63.83	2.32	NV	NV	NV	ND	ND	ND
B3 - 72	A1	39.48	39.97	0.49	39.4	39.8	0.4	39.37	39.81	0.44	38.6	39.9	1.3
B3 - 72	A2	40.13	40.31	0.18	39.98	40.32	0.34	40.01	40.29	0.28	NV	NV	NV
B3 - 72	B	41.21	41.42	0.21	41.16	41.42	0.26	NV	NV	NV	NV	NV	NV
B3 - 72	S	53	54.25	1.25	53.03	54.34	1.31	NV	NV	NV	52.69	54.53	1.84
B3 - 72	Leito	55.21	55.53	0.32	55.26	55.65	0.39	NV	NV	NV	55	55.79	0.79
B3 - 72	M1	55.83	56.23	0.4	55.9	56.4	0.5	NV	NV	NV	NV	NV	NV
B3 - 72	M2	56.63	57.43	0.8	56.73	57.64	0.91	NV	NV	NV	56.63	58.49	1.86
B3 - 72	I1	59.6	61.25	1.65	59.21	61.52	2.31	NV	NV	NV	59	61.92	2.92
B3 - 72	I2	61.65	62.05	0.4	61.65	62.01	0.36	NV	NV	NV	NV	NV	NV

• Furo B3-60: Comparação entre GLOG e Descrição Geológica

No furo B3-60, 4 estratos de carvão foram identificados na descrição geológica e nos perfis de GLOG. Um deslocamento vertical (shift) entre o registro geofísico e a descrição geológica (Figuras 41 e 42) é necessário para a conciliação perfeita em profundidade.

Figura 41 - Imagem detalhando a camada S no furo B3-60.

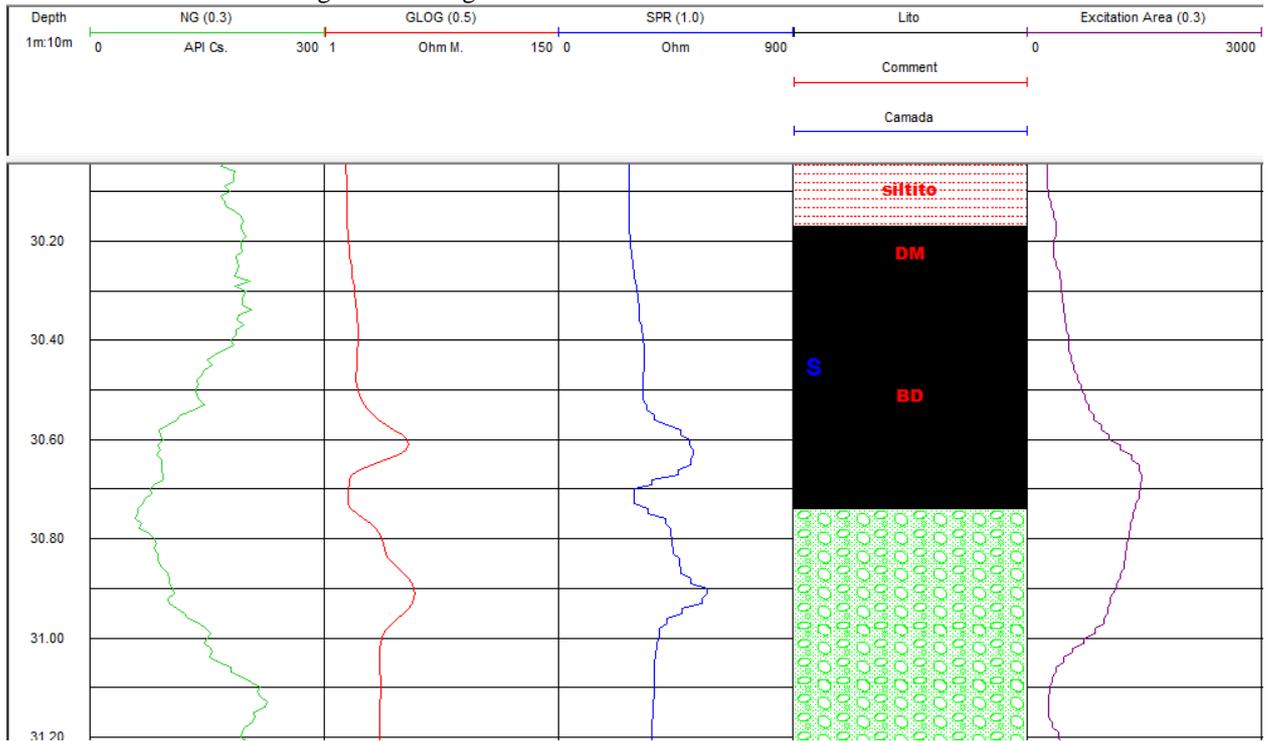
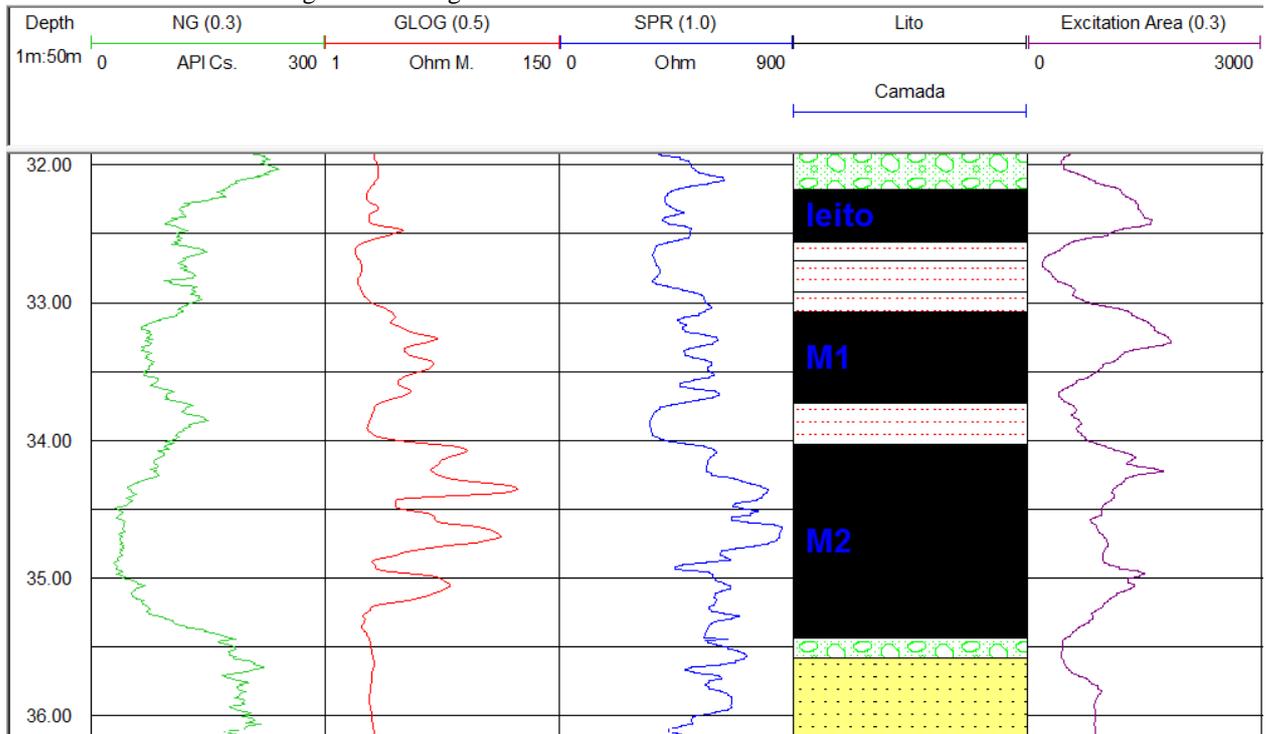


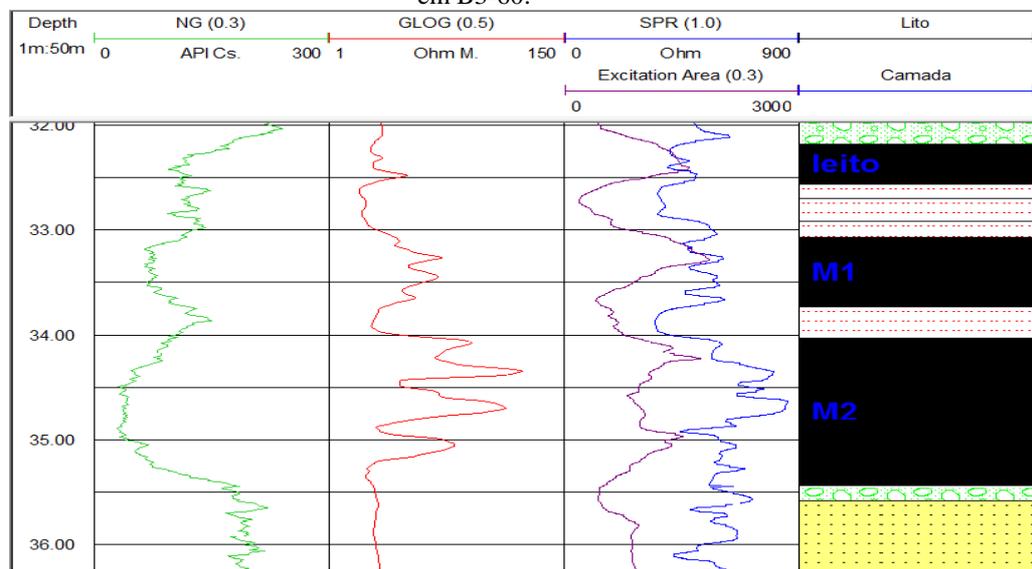
Figura 42 - Imagem detalhando as demais camadas em B3-60.



- Furo B3-60: Comparação entre SPR e Descrição Geológica

O registro de SPR apresentou algumas dificuldades em termos da demarcação dos limites para os estratos de carvão. Em geral, ele provocou exageros nas estimativas de espessuras das camadas, quando comparado à descrição geológica. As Figuras 42 e 43 mostram este aspecto. Ainda, observa-se que ele apresentou dificuldade para marcar a base da camada M2, mesmo que o início da camada esteja bem registrado. Obs.: o perfil de Área de Excitação (AE) pode ser usado, neste furo, para comprovar a identificação do carvão (Figura 43) e esclarecer as dúvidas com respeito às anomalias nos registros de SPR.

Figura 43 - Imagem de comparação entre SPR e AE, comprovando sua utilidade como registro auxiliar para SPR em B3-60.

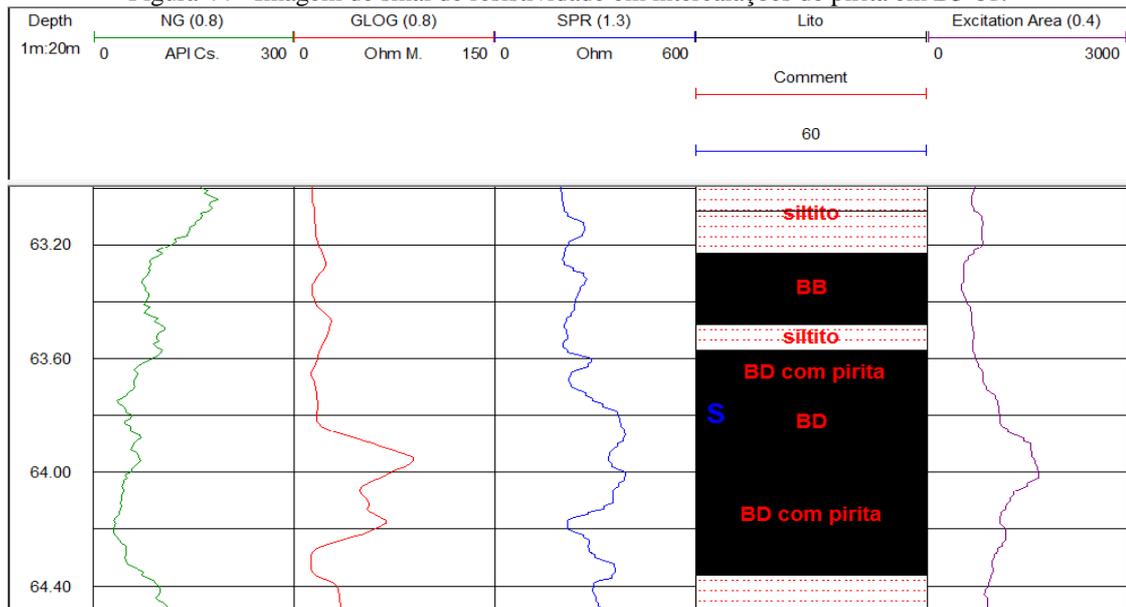


No cômputo geral do furo B3-60, o SPR identificou 3 estratos de carvão, tendo dificuldade para registrar a base da camada M2.

- Furo B3-61: Comparação entre GLOG e Descrição Geológica

No furo B3-61, há 2 estratos de carvão de interesse marcados na descrição geológica e ambos são identificáveis no GLOG. O carvão da camada S apresenta intercalações de pirita. É bem conhecido que a pirita apresenta baixa resistividade, então o perfil deve ter sido afetado pela presença dos nódulos de pirita. A Figura 44 ilustra a situação.

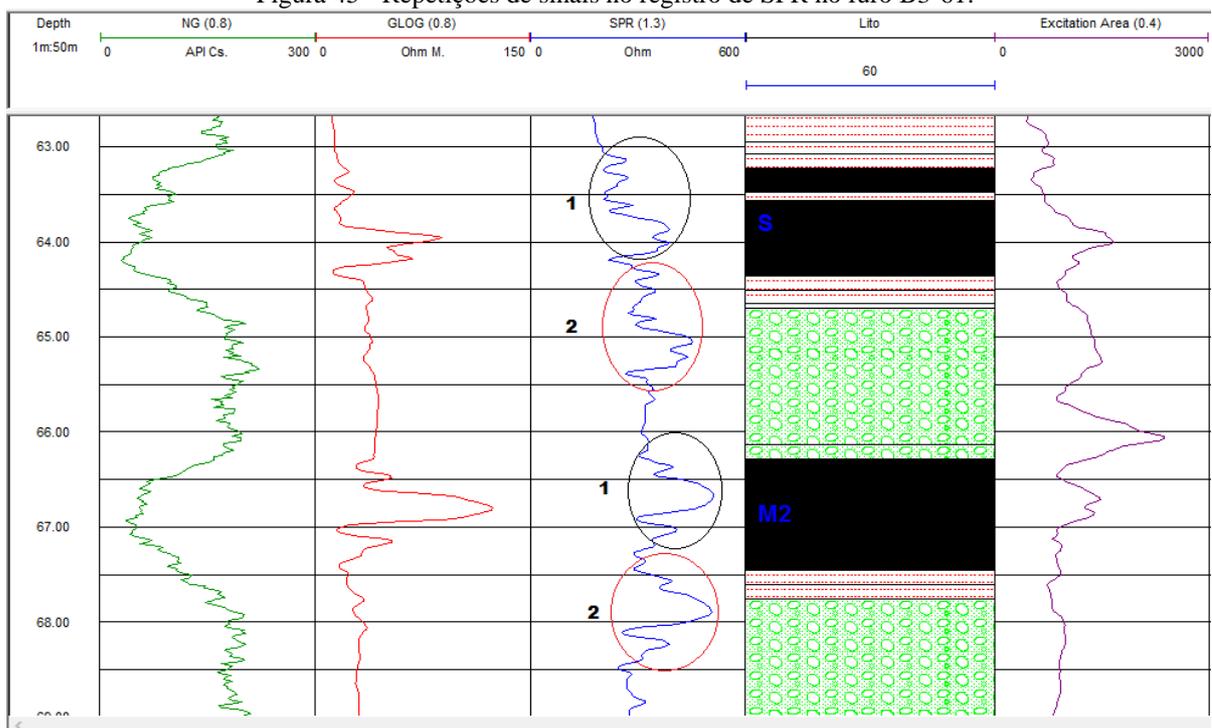
Figura 44 - Imagem de sinal de resistividade em intercalações de pirita em B3-61.



• Furo B3-61: Comparação entre SPR e Descrição Geológica

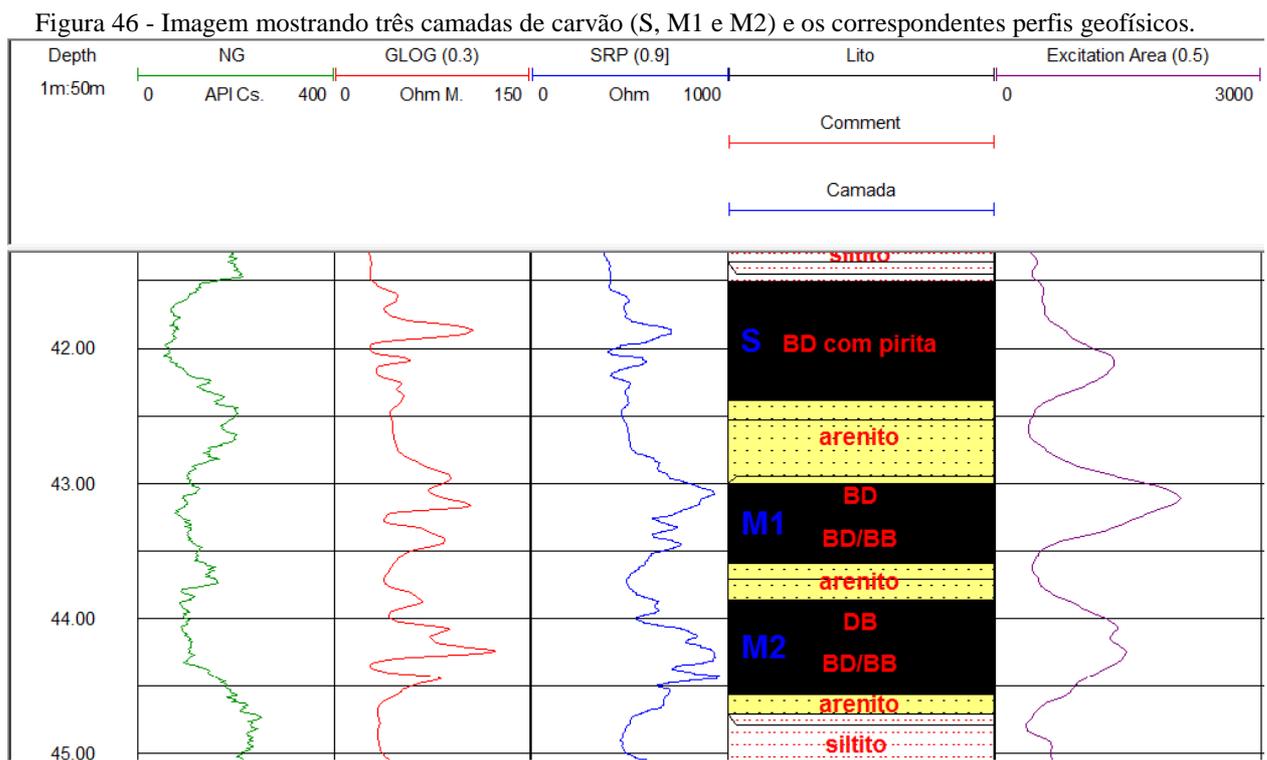
Na análise de furo B3-61 (Figura 45), o SPR não consegue identificar os 2 estratos de carvão de maneira clara. Uma espécie de repetição no sinal de SPR causa confusão na identificação do carvão. Estas repetições são assinaladas pelos números 1 e 2, para as duas camadas encontradas neste perfil. O perfil AE não consegue ajudar nesse caso.

Figura 45 - Repetições de sinais no registro de SPR no furo B3-61.



- Furo B3-62: Comparação entre GLOG e Descrição Geológica

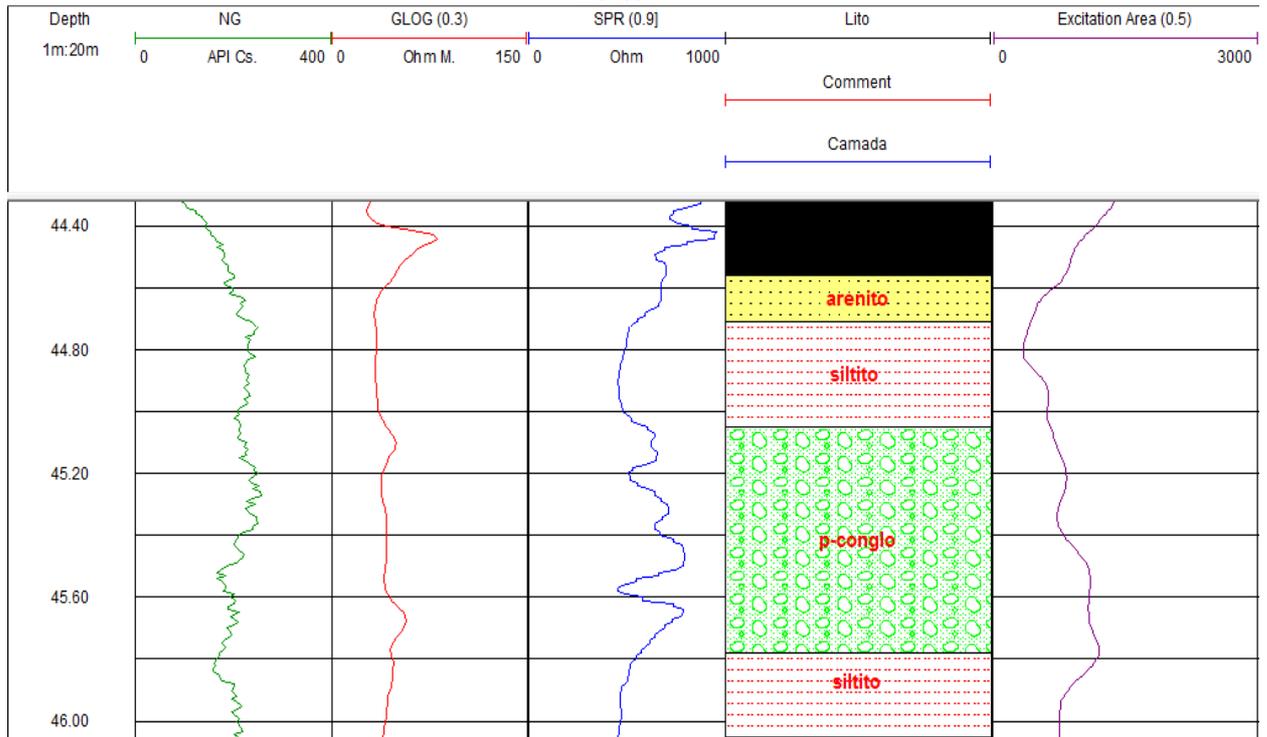
No furo B3-62, há 4 estratos de carvão e todos foram identificados pelo GLOG (Figura 46). Assim, é possível estimar as espessuras dos mesmos e fazer uma comparação com as descrições geológicas.



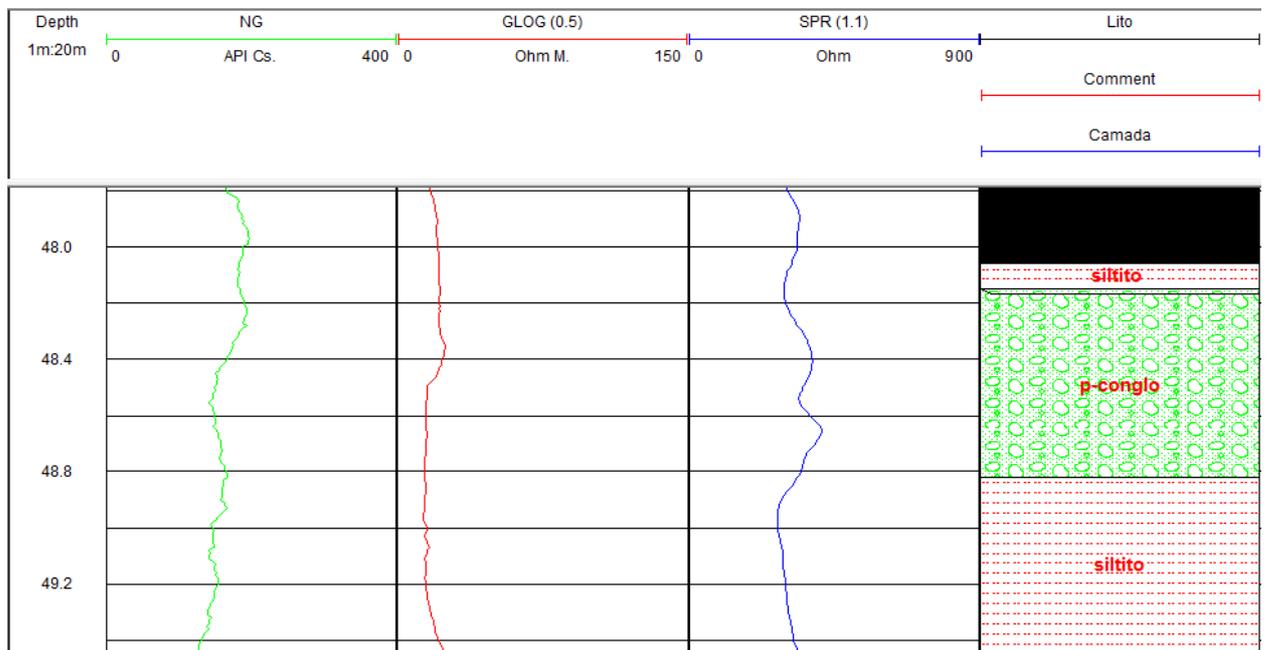
- Furo B3-62: Comparação entre SPR e Descrição Geológica

O perfil de SPR do furo B3-62 consegue identificar todos os 4 estratos de carvão. Neste perfil, o SPR apresentou registros que permitem as estimativas das espessuras dos estratos e sua comparação com as espessuras de testemunhos. Outro aspecto interessante do registro de SPR aqui é sua capacidade para identificar o estrato de paraconglomerado entre siltitos (Figura 47-A e 47-B).

Figura 47 - Imagens de comportamento do registro SPR em paraconglomerado (A) no furo B3-62 e (B) no furo B3-63.



A



B

• Furo B3-63, 66 e 72: Comparação entre GLOG e Descrição Geológica

Os furos B3-63, 66 e 72 serão analisados juntos, em função da similaridade estratigráfica entre eles. De acordo com a descrição geológica, o total de estratos de carvão nestes furos é 8, 8 e 9 respectivamente (para B3-63, 66 e 72). No furo B3-63, houve deslocamento vertical de aproximadamente 0,8m no perfil (Figura 48) e alguns estratos não correspondem à descrição geológica em termos de profundidade. Neste perfil, o GLOG não apresentou boa correlação com testemunhos de sondagem (Figura 49), mas identificou todas as camadas de carvão no furo.

Figura 48 - Imagem deslocada nos registros elétricos do furo B3-63 (com repetição de sinal para SPR).

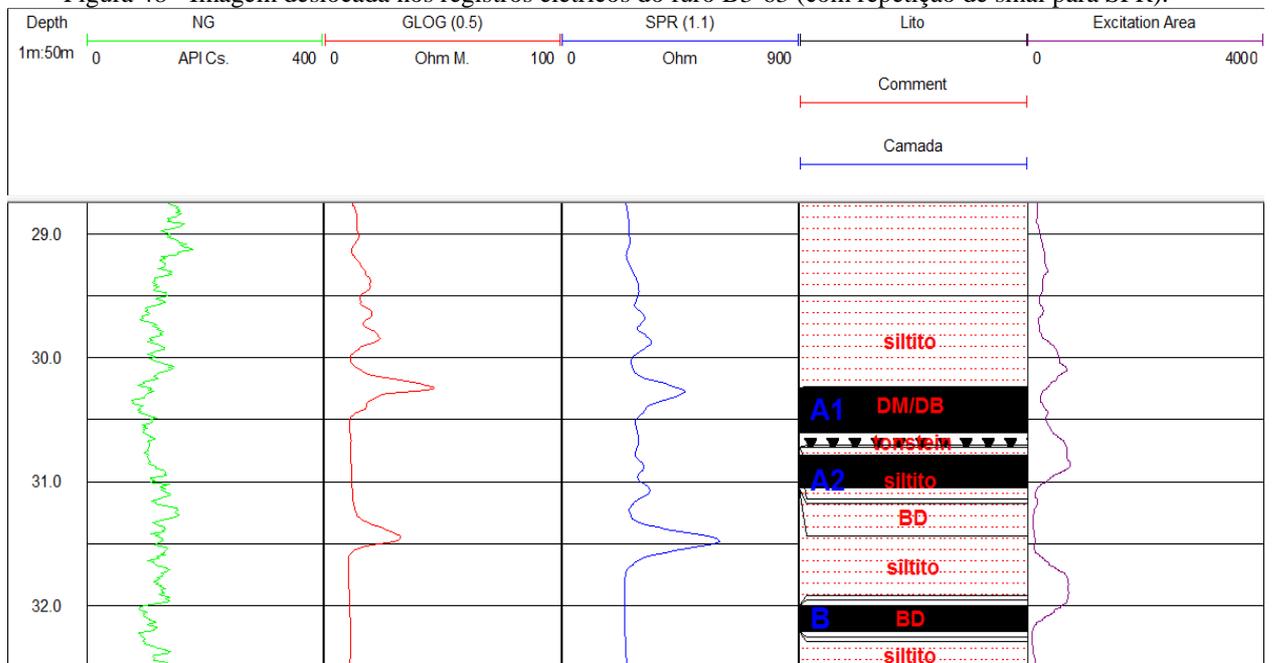
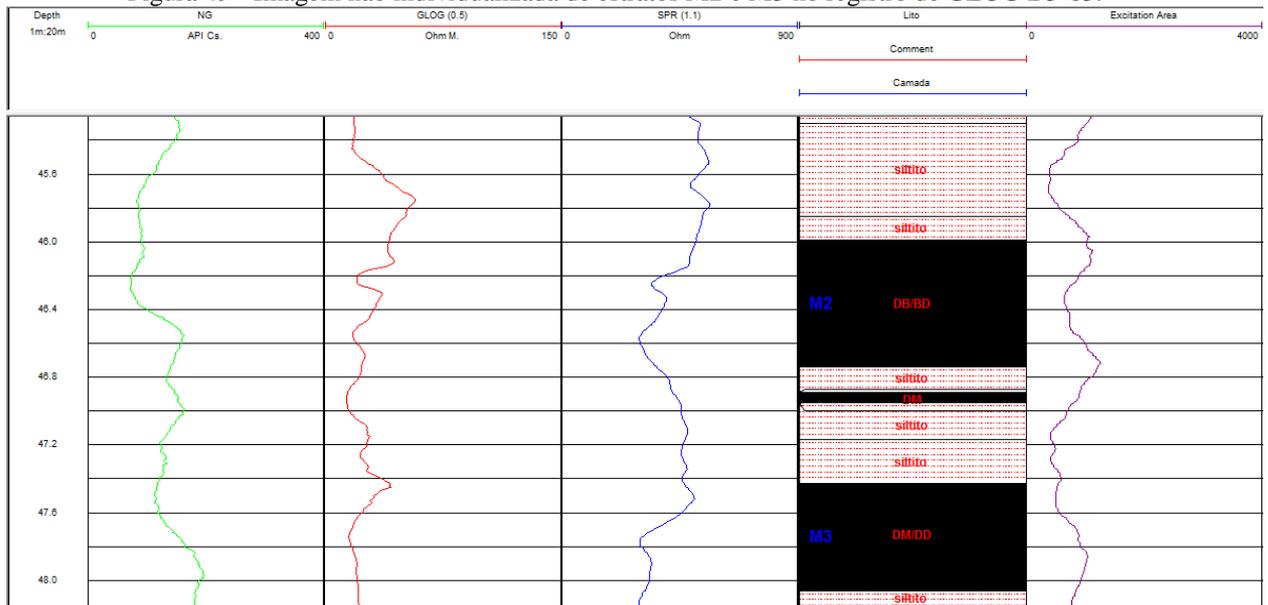


Figura 49 - Imagem não individualizada de estratos M2 e M3 no registro de GLOG B3-63.



Na Figura 50, observa-se também o deslocamento vertical do registro de GLOG com relação à descrição geológica, como em B3-63, porém menor. Esse deslocamento só aparece nos primeiros 3 estratos de carvão (A1, A2 e B) e fica em correspondência nas demais camadas. As espessuras estimadas são próximas às verificadas nas descrições geológicas (Figura 51).

Figura 50 - Imagem de deslocamento vertical menor nos registros elétricos no furo B3-66 (réplicas para SPR).

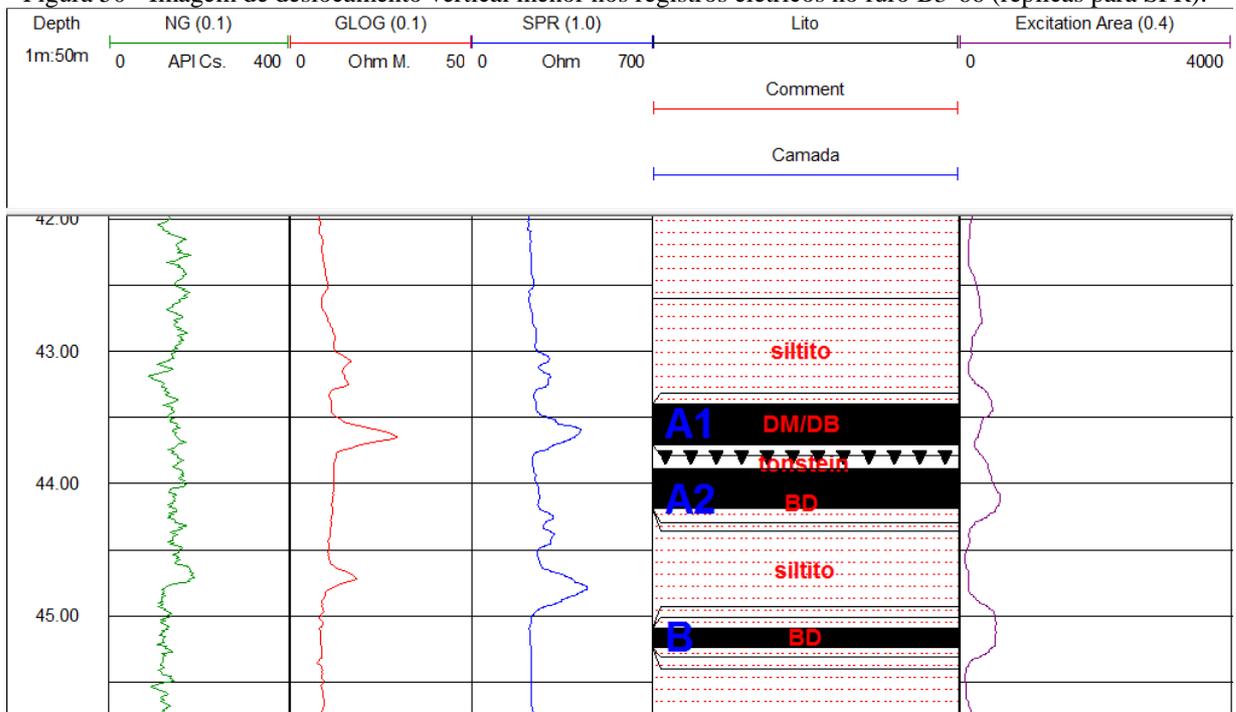
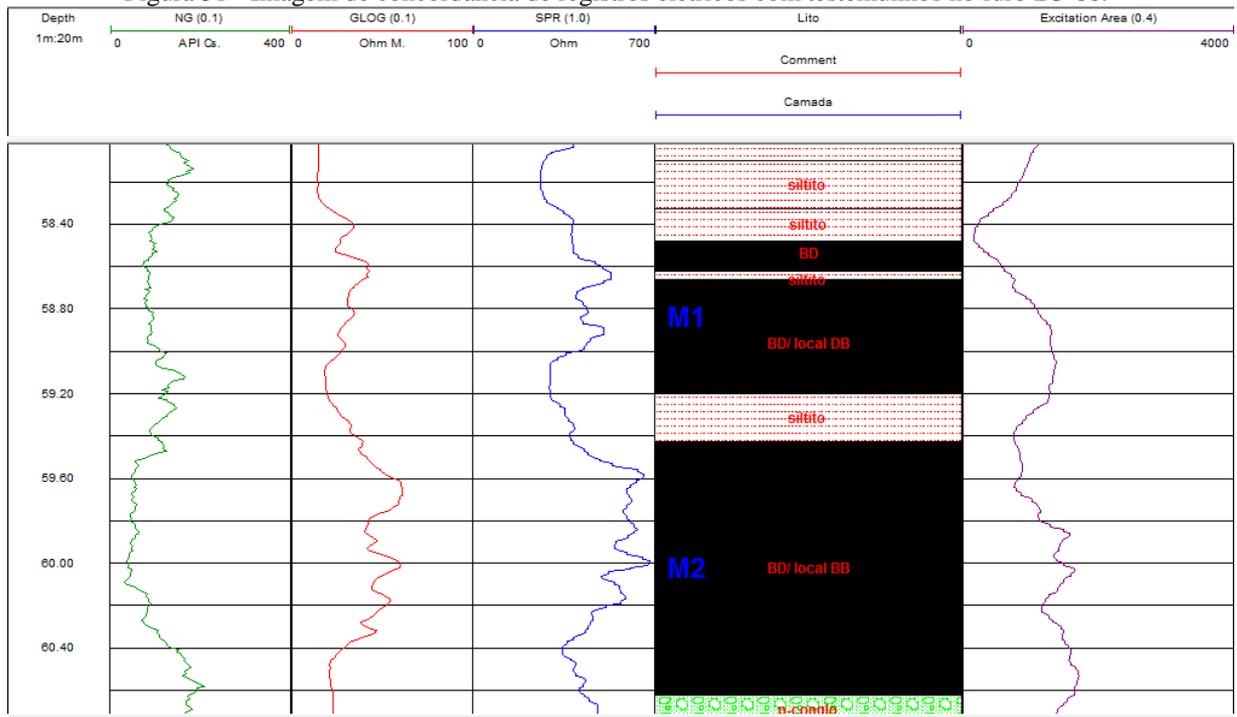


Figura 51 - Imagem de concordância de registros elétricos com testemunhos no furo B3-66.



A situação de deslocamentos verticais praticamente não acontece no perfil de B3-72 (Figura 52). Assim, é possível estimar as espessuras de todos os estratos de carvão, e correlacioná-los facilmente com as descrições geológicas (Figura 53). Aqui, o registro do GLOG não apenas demonstra sua eficácia para diferenciar contatos entre as litologias, como também diferencia bem os estratos próximos, seja de carvão ou estéril. A Figura 52 mostra como os registros identificam os litotipos DM/DB (juntos), tonstein + siltito e BD, os quais pertencem às camadas A1 e A2, respectivamente.

Figura 52 - Imagem sem deslocamento no registro de GLOG no furo B3-72 (imagem com réplica para SPR).

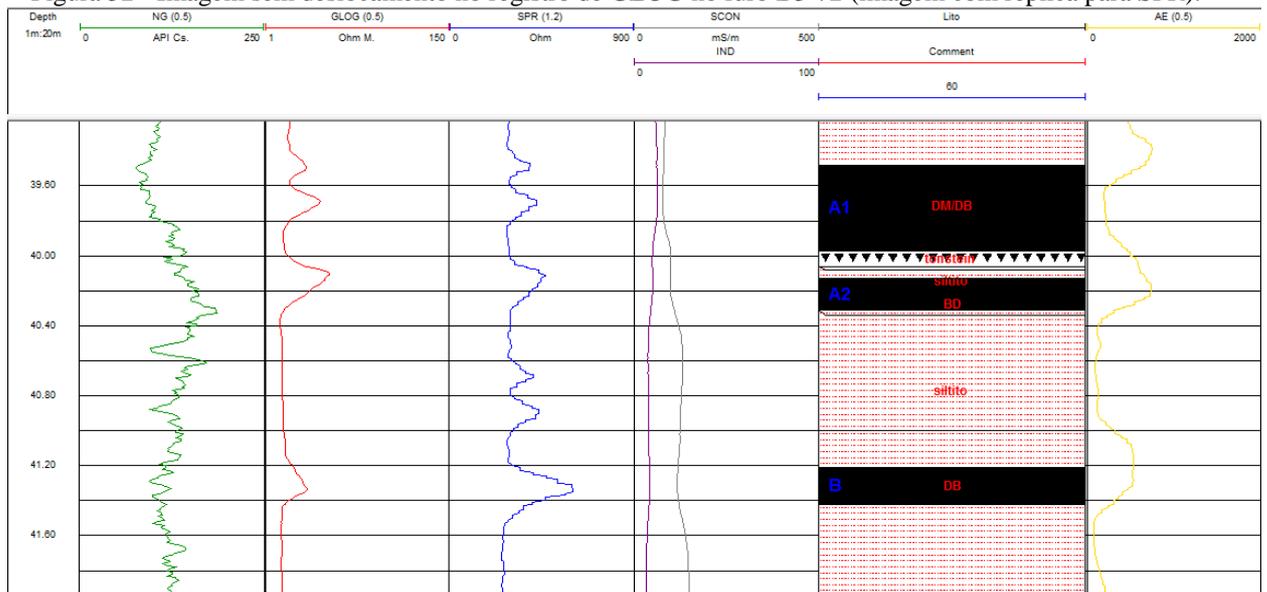
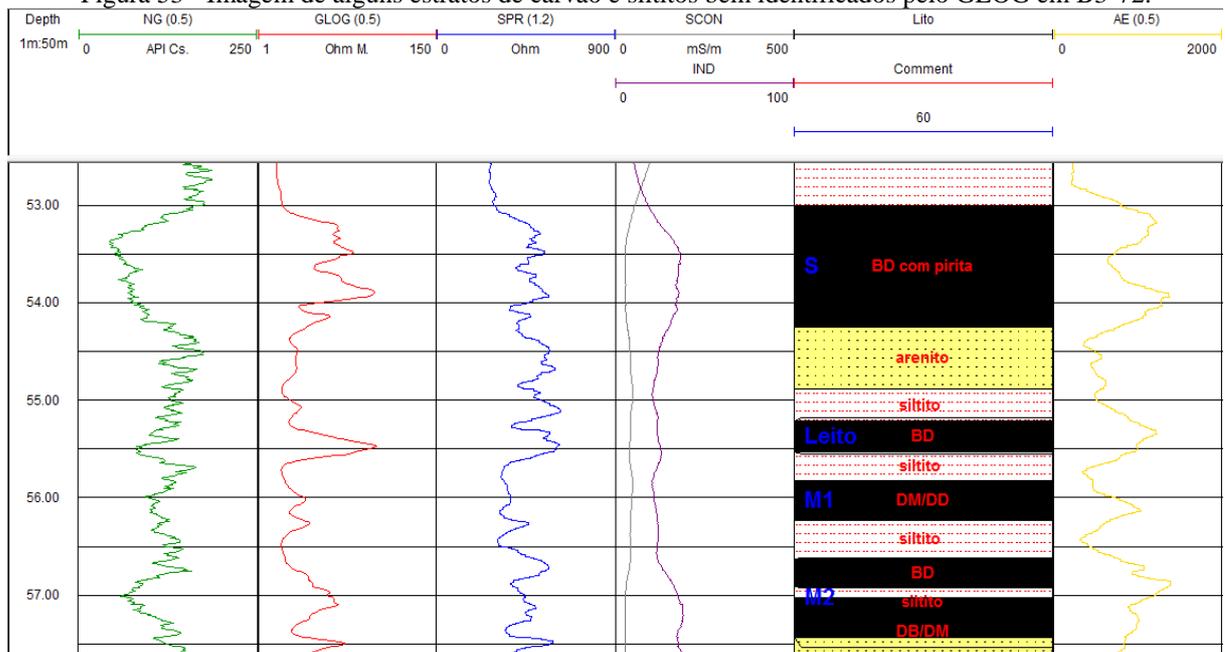


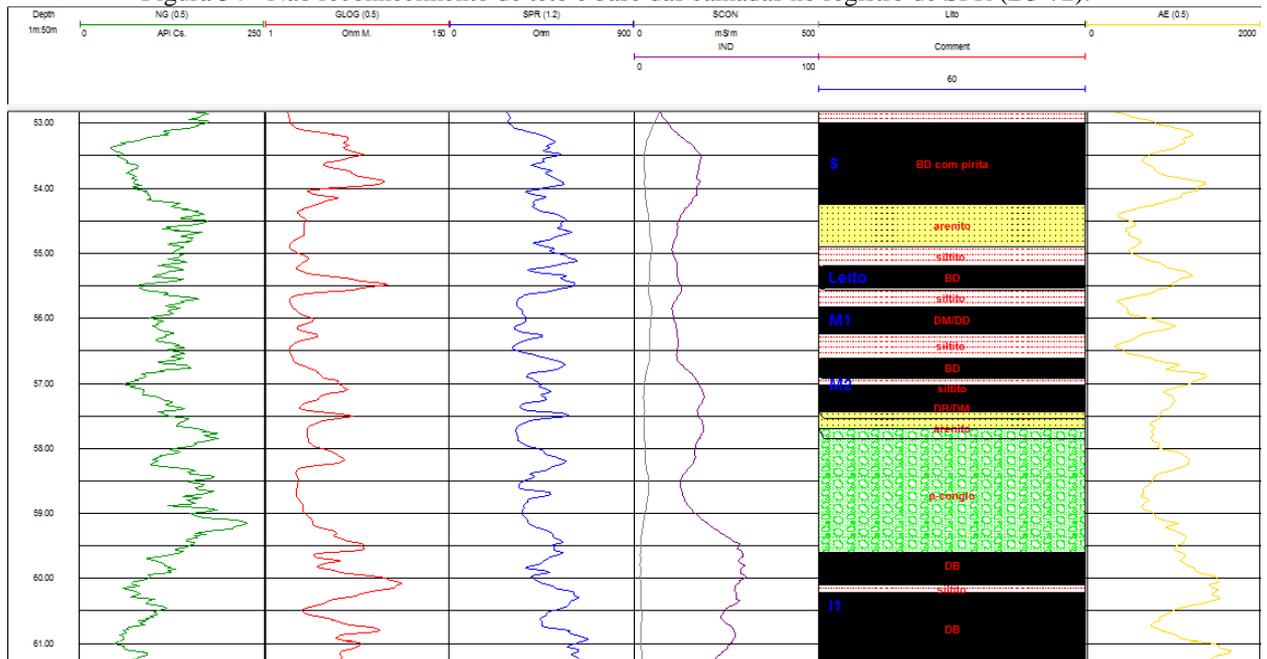
Figura 53 - Imagem de alguns estratos de carvão e siltitos bem identificados pelo GLOG em B3-72.



● Furo B3-63, 66 e 72: Comparação entre SPR e Descrição Geológica

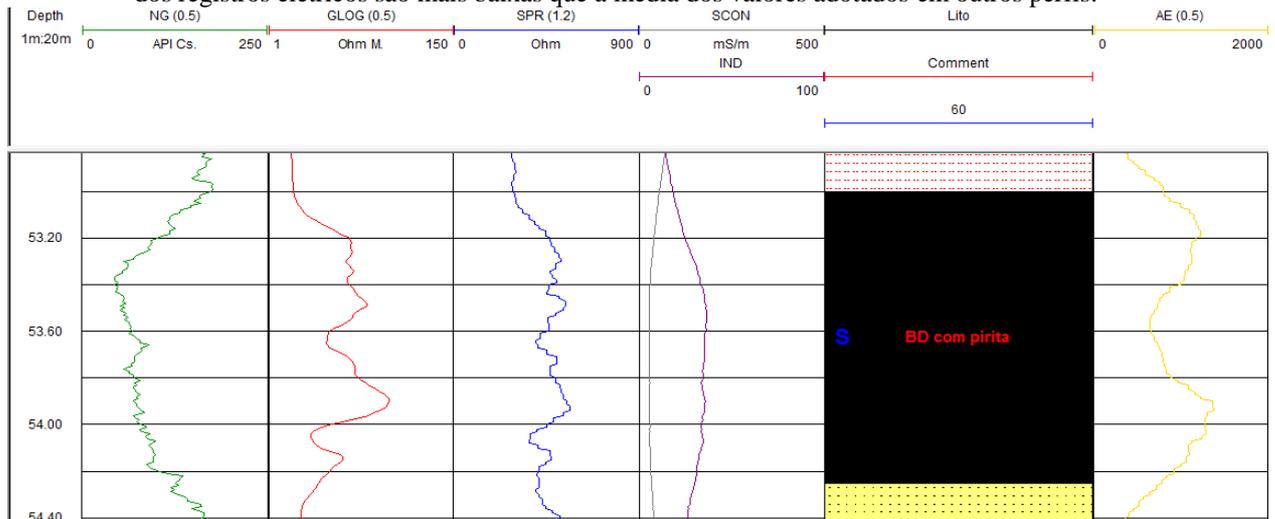
No furo B3-63, 66 e 72, também houve deslocamentos no registro SPR em relação à descrição geológica e ocorreram sinais espúrios em todos os registros destes perfis (Figura 48, 50 e 52 acima). Na Figura 54, a identificação das camadas a partir de 53 metros, fica muito difícil reconhecer o início e final da camada.

Figura 54 - Não reconhecimento de teto e base das camadas no registro de SPR (B3-72).



A intercalação de pirita, no estrato de carvão, não está bem discriminada no registro de SPR. Observa-se, na Figura 55, que existem baixos valores de resistividade dentro da camada S, apesar de tratar-se de um único litotipo de qualidade BD. Essa flutuação é o sinal da presença de piritas intercaladas com carvão.

Figura 55 - Identificação de nódulo de pirita no registro de SPR no furo B3-72. Nota: as escalas de apresentação dos registros elétricos são mais baixas que a média dos valores adotados em outros perfis.



● Furo B3-63, 66 e 72: Comparação entre IND e Descrição Geológica

No depósito B3, a sonda IND foi utilizada apenas no furo B3-72. A comparação entre seu registro e descrição geológica não é boa e exagera na espessura estimada de estratos. Entretanto, foram identificados 4 estratos de carvão dentre 9 existentes neste furo. Observa-se que o registro de IND não tem capacidade de individualizar os estratos de carvão ou estéril com espessuras inferiores a 0,5m. Geralmente, ele aglutina pequenos estratos próximos numa única anomalia. A Figura 56 mostra a capacidade de resolução vertical do registro IND, apresentando 3 estratos (A1, PA1-A2 e A2) como uma única camada, devido às suas pequenas espessuras. Por outro lado, na Figura 57 a camada S é grande e de qualidade BD (aprox. 1,20 m), sendo possível identificá-la.

Figura 56 - Imagem mostrando a dificuldade do registro IND para individualizar estratos menores que 0,5m no furo B3-72.

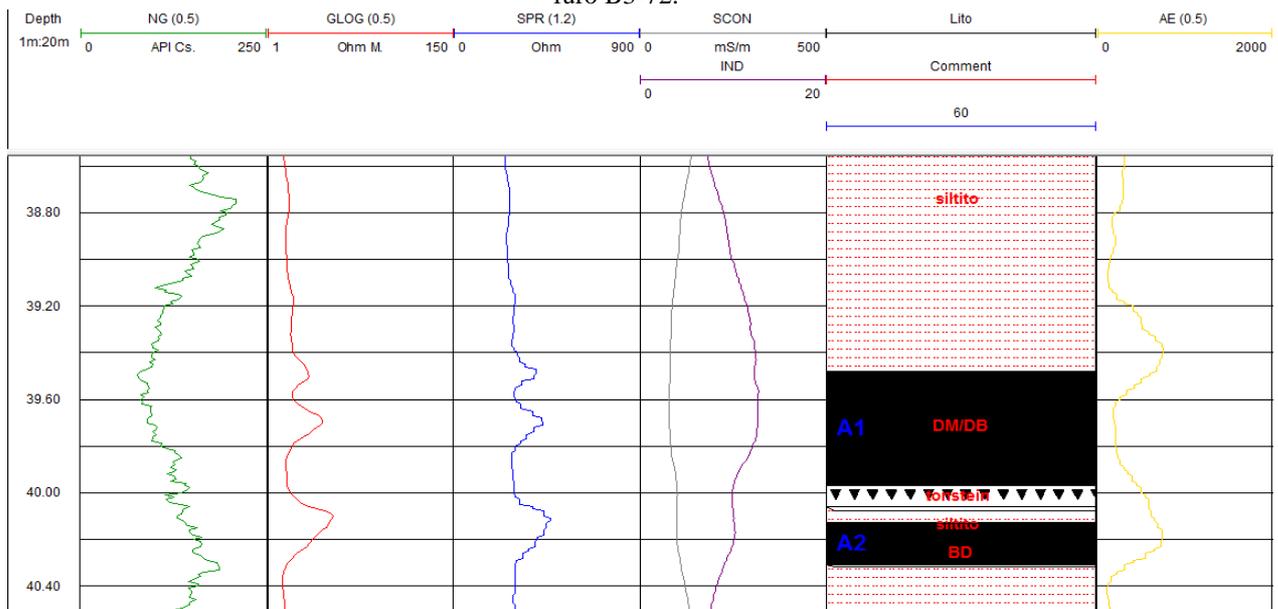
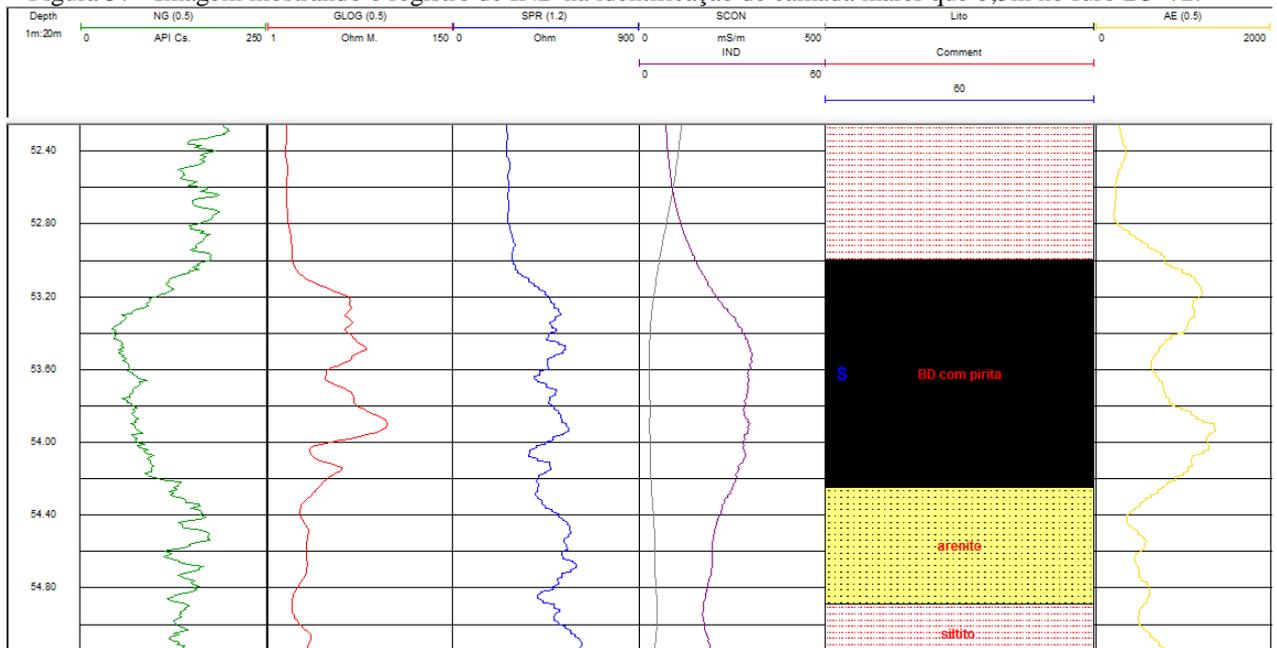


Figura 57 - Imagem mostrando o registro de IND na identificação de camada maior que 0,5m no furo B3-72.



#### 5.4.2. Área do Cerro

Na campanha do Cerro, foram analisados 3 furos: CRN-72, 81 e 82. O furo de 72 foi perfilado com as sondas GLOG e IND enquanto os demais com GLOG e SPR. Este depósito contém estratos de arenito que têm seus tetos em aprox. 16, 14 e 13 metros para CRN-72, 81 e 82 respectivamente. A situação sugere continuidade de estratos entre os três furos. O arenito é bem conhecido como uma litologia com registros de resistividade e gama natural similares ao carvão. Geralmente, a sua presença no furo mostra alta resistividade e valor baixo de gama natural, por isso, confunde-se com estratos de carvão. A Tabela 8 apresenta todos os estratos de carvão e as sondas utilizadas em cada furo deste depósito.

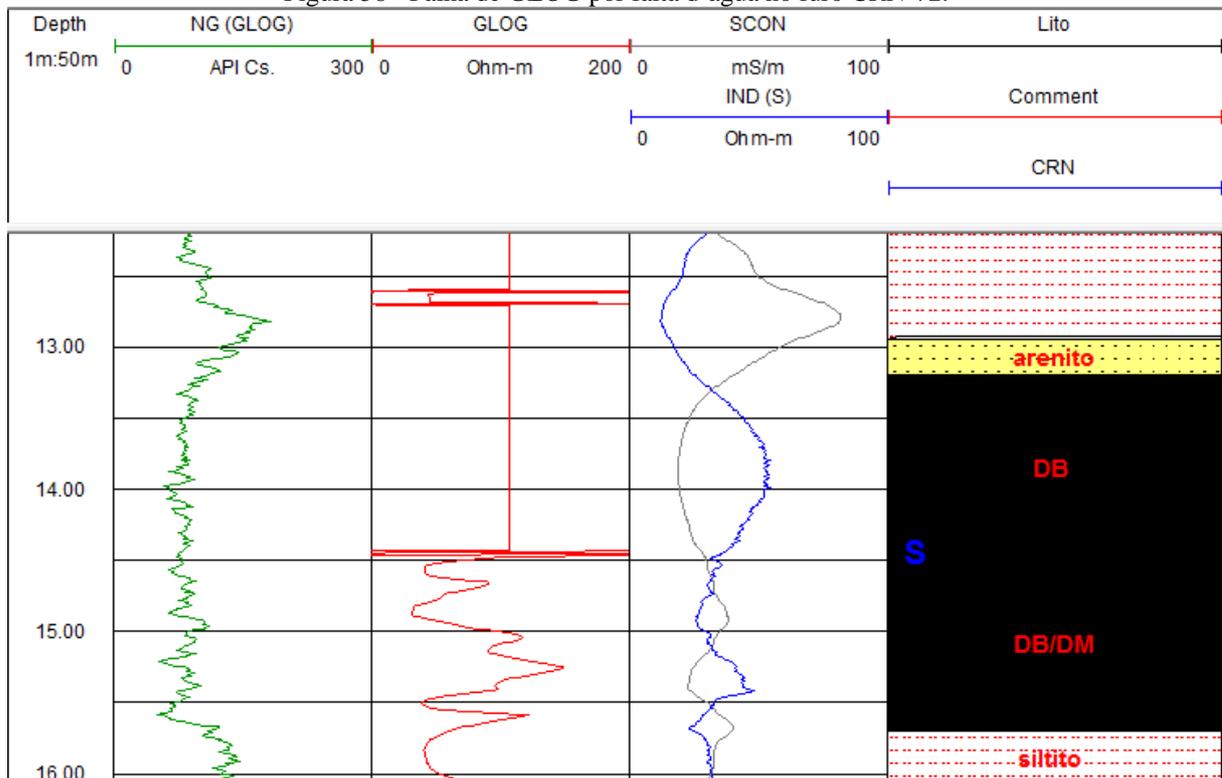
Tabela 8 - Estratos de carvão para os furos de sondagens na Cerro e espessuras definidas na descrição geológica e perfilagem geofísica. ND = Perfil geofísico não disponível; NV = estrato não visível na perfilagem.

Furo	Sondagem			Perfilagem									
	Camada	Testemunho		GLOG			SPR			IND			
		De	Para	Espessura	De	Para	Espessura	De	Para	Espessura	De	Para	Espessura
CRN-72	S	13.2	15.7	2.5	NV	NV	NV	ND	ND	ND	13	15.69	2.69
CRN-72	M2	28.9	30.1	1.2	28.74	29.97	1.23	ND	ND	ND	28.91	29.95	1.04
CRN-72	M3	33.12	33.23	0.11	NV	NV	NV	ND	ND	ND	NV	NV	NV
CRN-81	S	11.75	13.85	2.1	11.75	14	2.25	11.73	14.05	2.32	ND	ND	ND
CRN-81	M1	22.8	23.25	0.45	22.72	23.16	0.44	22.7	23.14	0.44	ND	ND	ND
CRN-81	M2	24.25	25.65	1.4	24.17	25.62	1.45	23.89	25.78	1.89	ND	ND	ND
CRN-82	S	10.55	12.75	2.2	11.51	13.89	2.38	10.66	12.42	1.76	ND	ND	ND
CRN-82	M1	23.8	24.4	0.6	23.36	24.05	0.69	23.34	24.09	0.75	ND	ND	ND
CRN-82	M2	25.2	26.6	1.4	NV	NV	NV	NV	NV	NV	ND	ND	ND

• Furo CRN-72: Comparação entre GLOG e Descrição Geológica

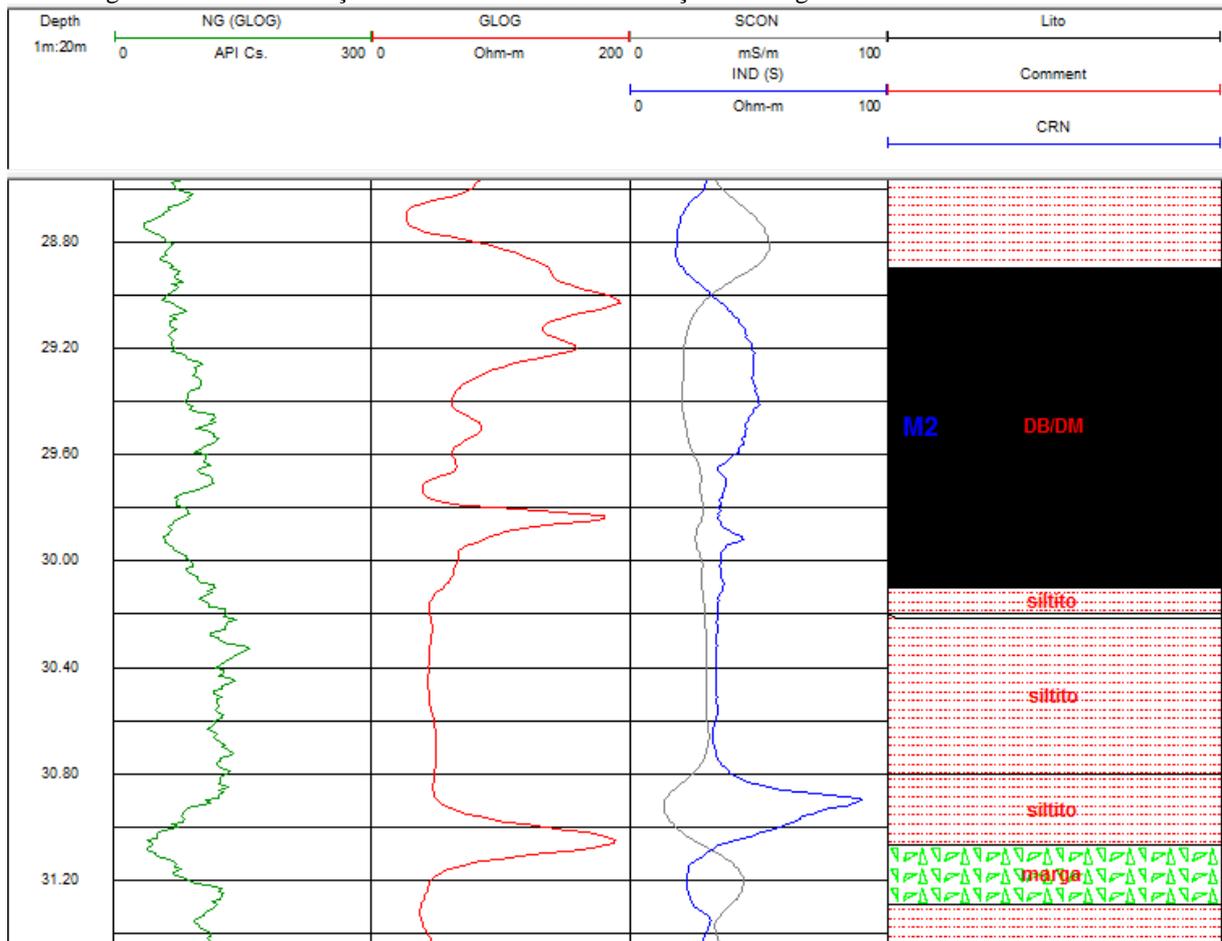
Na análise de furo CRN-72, foram identificados 3 estratos de carvão na descrição geológica, mas o registro de GLOG identificou apenas um devido à falta d'água e ao registro incompleto no primeiro e último estratos de carvão. A falta d'água no furo impediu o funcionamento do GLOG para registrar a camada S (o perfil de gama natural da mesma sonda confirmou esta camada, ilustrada na Figura 58). Obviamente, a presença de arenitos neste furo fez com que o GLOG apresentasse valores elevados de resistividade, fora da escala ideal para a visualização dos estratos de carvão.

Figura 58 - Falha de GLOG por falta d'água no furo CRN-72.



No entanto, o GLOG demonstra sua eficácia para discriminar margas entre siltitos, como pode ser visto na Figura 59. Nota-se que sem a descrição de testemunhos, este registro poderia ser classificado como uma camada de carvão por apresentar baixo valor de gama natural e resistividade alta.

Figura 59 - A identificação da camada M2 e discriminação da margas entre siltitos no furo CRN-72.



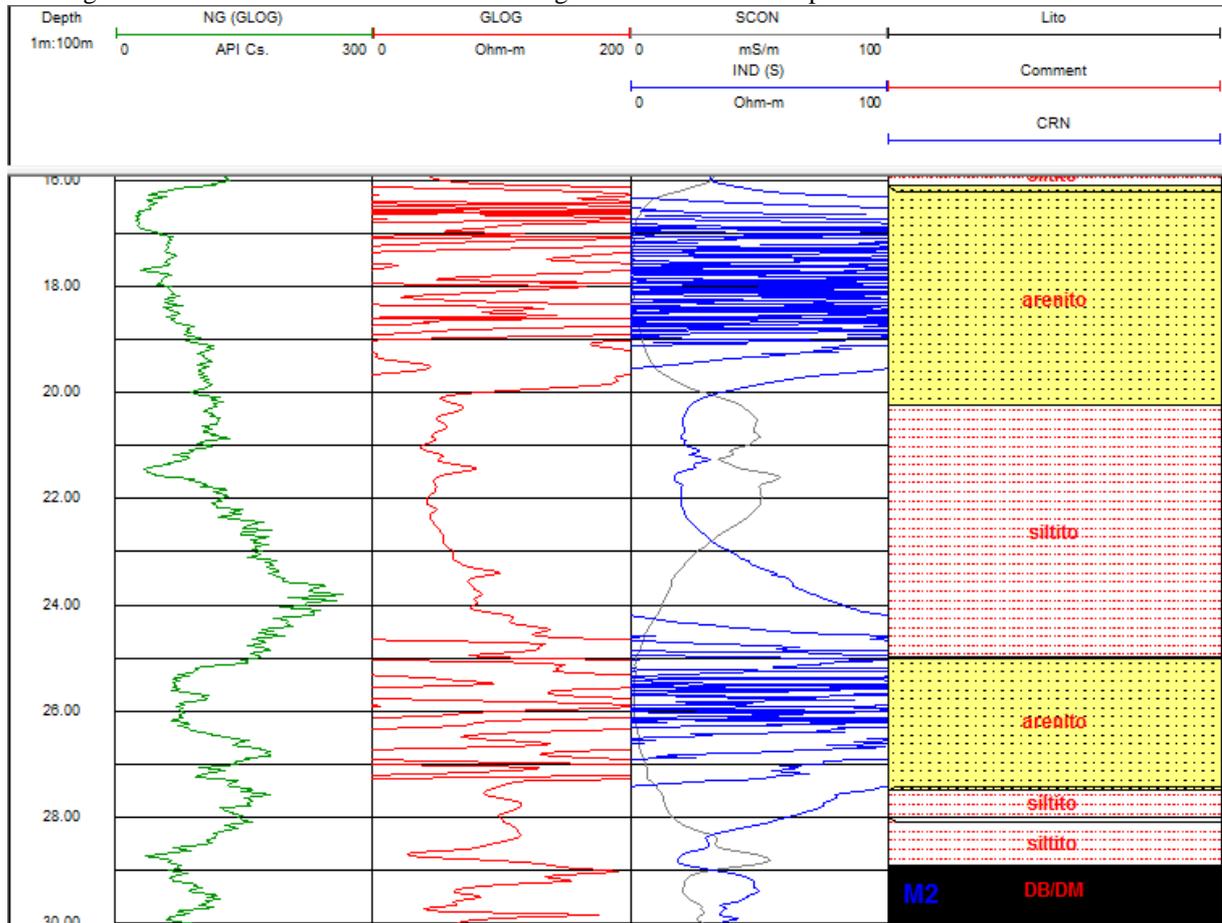
- Furo CRN-72: Comparação entre IND e Descrição Geológica

Observa-se que o perfil de indução registrou a camada S onde GLOG falhou por falta d'água (Figura 58). Esse fato prova sua capacidade de funcionamento em qualquer condição de fluido preenchendo o furo, seja seco ou com água.

Na Figura 60, os registros de 2 estratos de arenito seguem o mesmo comportamento do perfil GLOG, com sinal de alta resistividade (fora da escala) e correspondendo à descrição geológica. Entretanto, na comparação entre as espessuras por perfilagem e testemunho para a

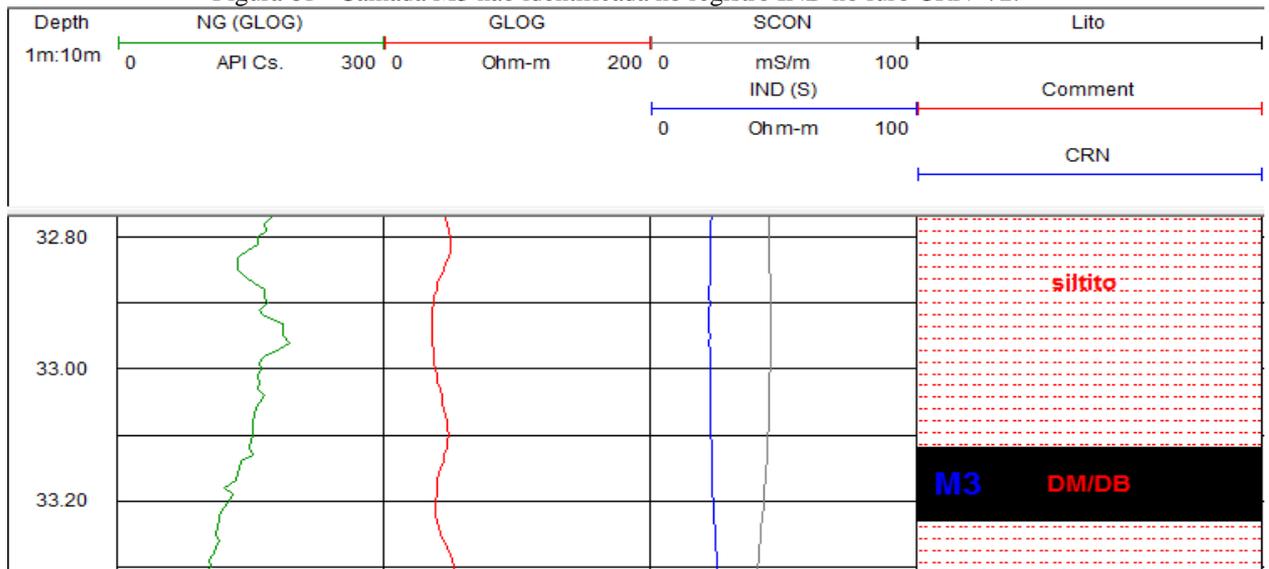
marga, o registro IND é mais largo e sua profundidade é deslocada em relação à descrição geológica (Figura 59).

Figura 60 - O sinal de alta resistividades no registro de GLOG e IND para identificar estrato de arenito.



No total, o registro IND identificou 2 (S e M2, Figuras 58 e 59, respectivamente) dentre 3 estratos de carvão, sendo que a última camada M3 (Figura 61) é muito fina (0,11 m) e não foi identificada devido à sua limitada resolução vertical.

Figura 61 - Camada M3 não identificada no registro IND no furo CRN-72.



- Furo CRN-81: Comparação entre GLOG e Descrição Geológica

Na análise de furo CRN-81, há um total de 4 estratos de carvão. Todos foram identificados no registro de GLOG, mas o contato entre a camada S e arenito não foi bem definido, sendo que o registro apresentou uma camada de carvão muito espessa, por não conseguir separá-la (Figura 62).

O comportamento deste registro (GLOG) gera dúvidas ao definir-se qual profundidade seria escolhida como base da camada S. Provavelmente escolheria-se 14,5m sem dispor da descrição de testemunho. Esta situação comprova novamente a dificuldade de GLOG para estabelecer claramente o contato entre carvão e arenito.

Outra situação ocorreu com a estimativa de espessura da camada M3, que mostrou-se muito menor quando comparada ao testemunho de sondagem (Figura 63).

Figura 62 - Imagem mostrando a dificuldade para registrar a base de camada S e o registro exagerado pelo SPR no furo CRN-81.

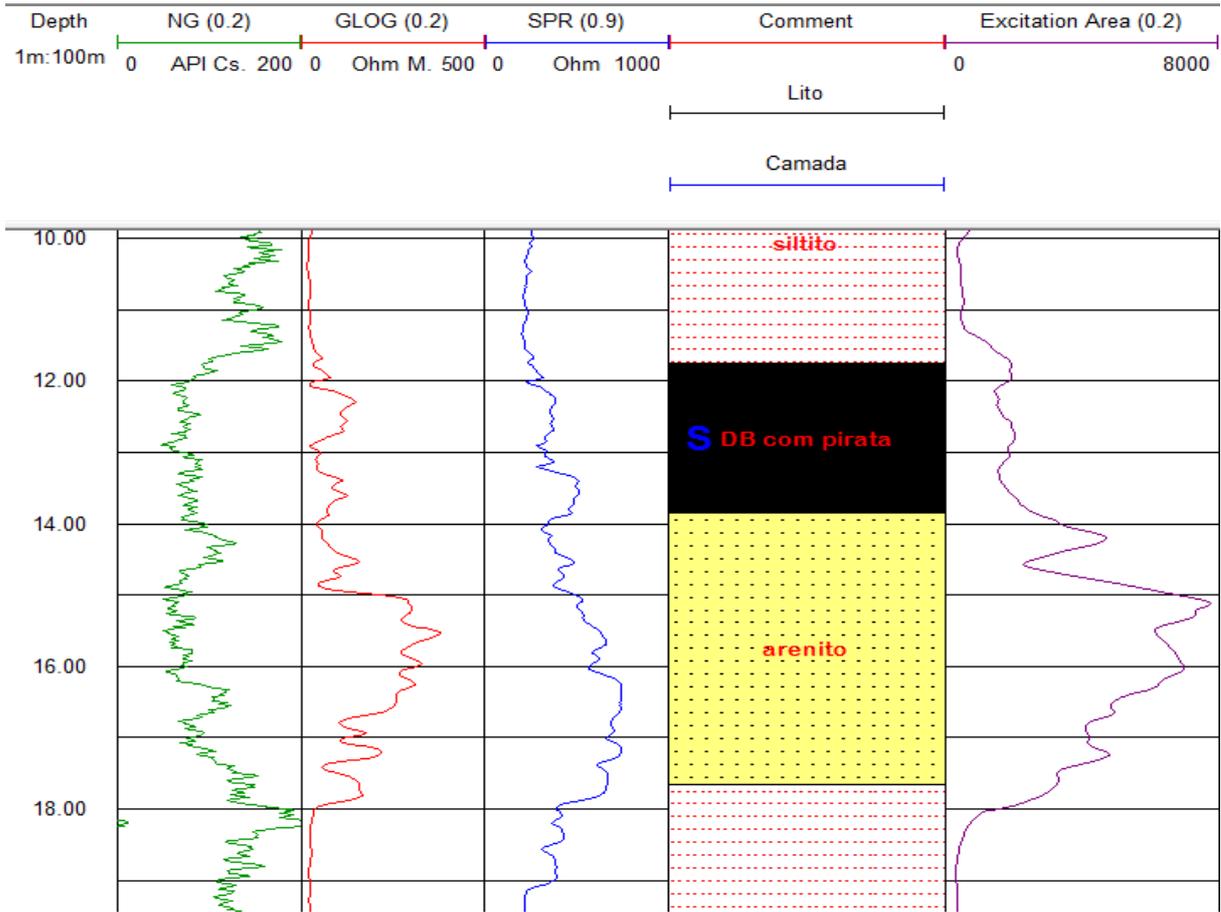
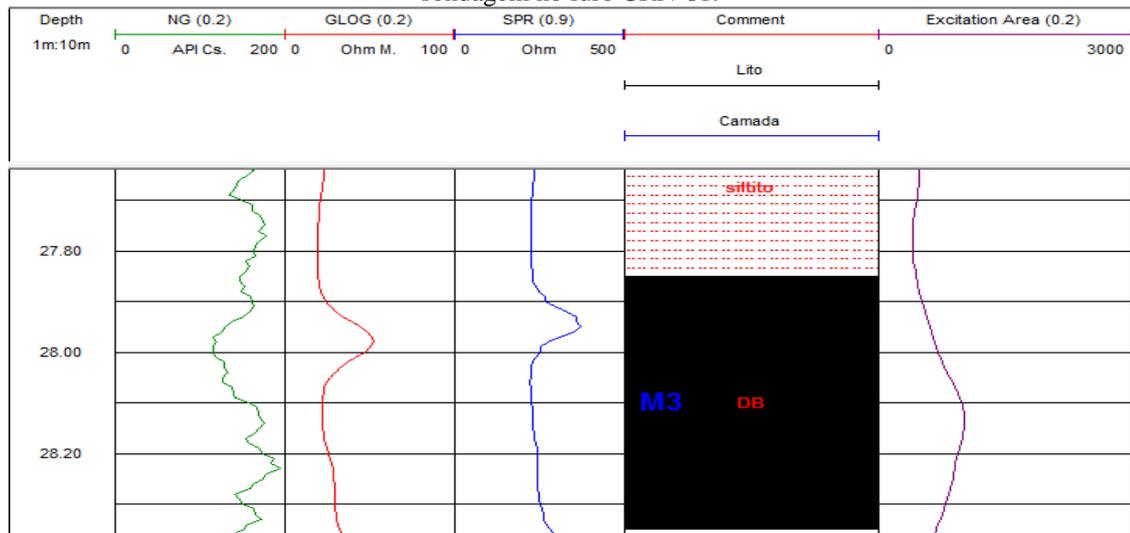
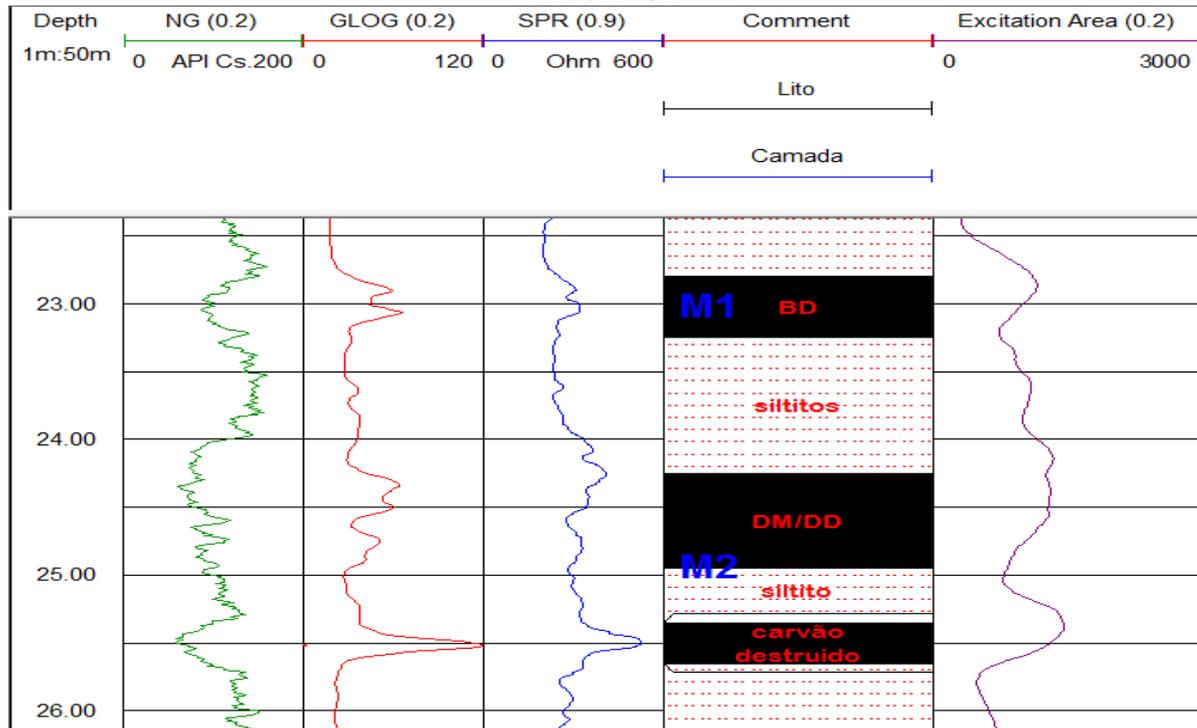


Figura 63 - Imagem mostrando uma grande diferença entre as espessuras estimadas pelos registros elétricos e sondagem no furo CRN-81.



Nas Figuras 62 a 65, observa-se a intercalação com pirita na camada S (qualidade DB); os registros comportam-se de forma similar ao já visto nos casos semelhantes anteriores. O reconhecimento do estrato de arenito pelo GLOG, nestes casos, é razoável. O registro de GLOG correlaciona bem todos os componentes da camada M2 (DM/DD/siltito e carvão destruído) com seus picos (Figura 64).

Figura 64 - Imagem da eficácia do GLOG para discriminar os componentes que constituem a camada M2 no furo CRN-81.



- Furo CRN-81: Comparação entre SPR e Descrição Geológica

No registro de SPR do furo CRN-81, os 3 estratos iniciais de carvão foram identificados, dentre 4 indicados pela descrição geológica. Porém, M2 é pouco distinta se comparada ao registro do GLOG (Figura 64). A estimativa do contato entre a camada S e arenito também apresenta problemas, assim como ocorreu com o GLOG (Figura 62).

- Furo CRN-82: Comparação entre GLOG e Descrição Geológica

No furo de CRN-82, a dificuldade de estabelecer-se o contato entre a camada S e arenito também ocorre (Figura 65). Sem a descrição geológica, há pouca chance de identificar-se a base exata de camada S (setas 1 ou 2, na Figura 65). No caso da camada M2, esta não foi

identificada (Figura 66), enquanto que a camada M1 aparece com pouca definição. No geral, o GLOG conseguiu identificar 2 estratos de carvão, de um total de 3 indicados pelos testemunhos de sondagem.

Figura 65 - Imagem mostrando a dificuldade para estabelecer o contato entre a camada S e arenito no furo CRN-82.

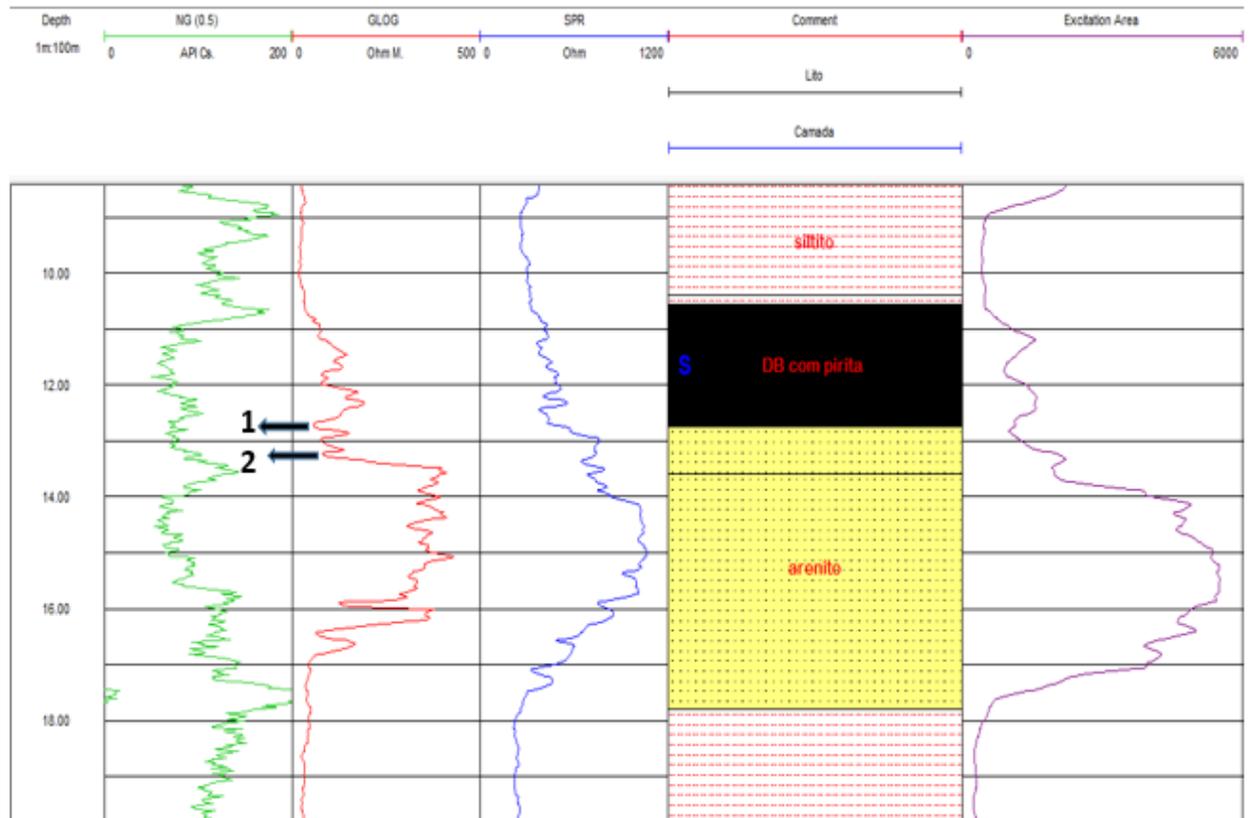
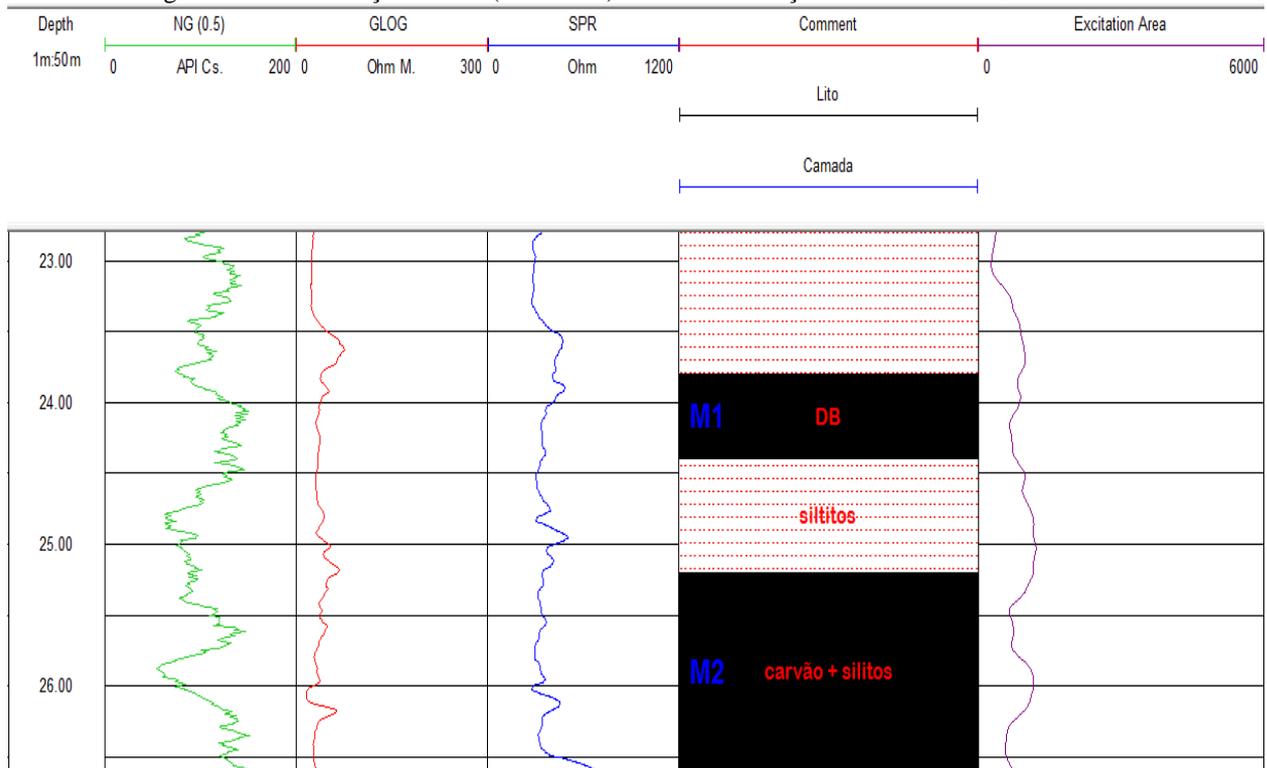


Figura 66 - Identificação de M1 (deslocado) e não identificação de M2 no furo CRN-82.



- Furo CRN-82: Comparação entre SPR e Descrição Geológica

Nessa análise, a comparação da espessura por SPR e testemunho é visualmente melhor que o GLOG com respeito ao contato entre carvão e arenito (aprox. 12,50m de profundidade). O registro de AE pode ajudar aqui, como é mostrado na Figura 65. Nota-se que a definição do contato litológico depende muito da disponibilidade de testemunhos, que servem como referência.

O SPR conseguiu discriminar 2 estratos de carvão (S e M1), enquanto que M2 não foi identificado (Figura 66).

### 5.4.3. Área do Calombo

As partir desta análise de dados, serão abordados os registros de sonda OPTV. Neste depósito, foram perfilados 2 furos de sondagem com testemunhos: CAL-58B e CAL-57. No furo CAL-58B, não conseguiu-se manter o preenchimento com água desde o início até a profundidade de aproximadamente 40,9m (Figura 67), uma situação que resultou na utilização

apenas da sonda IND, como registro elétrico. Abaixo de 40,9m, o preenchimento com água foi completo. Trata-se de uma situação especial, onde foi executada a perfilagem e obtenção dos registros em furo seco e em furo com água. O furo CAL-57 foi perfilado com SPR, e foi também usado no teste de água decantada, descrito no item 5.2. Em ambos os furos executou-se a coleta de dados com a sonda OPTV. A Tabela 9 apresenta as espessuras estimadas por perfilagem no depósito Calombo, em comparação com as espessuras determinadas pela análise de testemunhos de sondagem nos furos CAL-57 e CAL-58B.

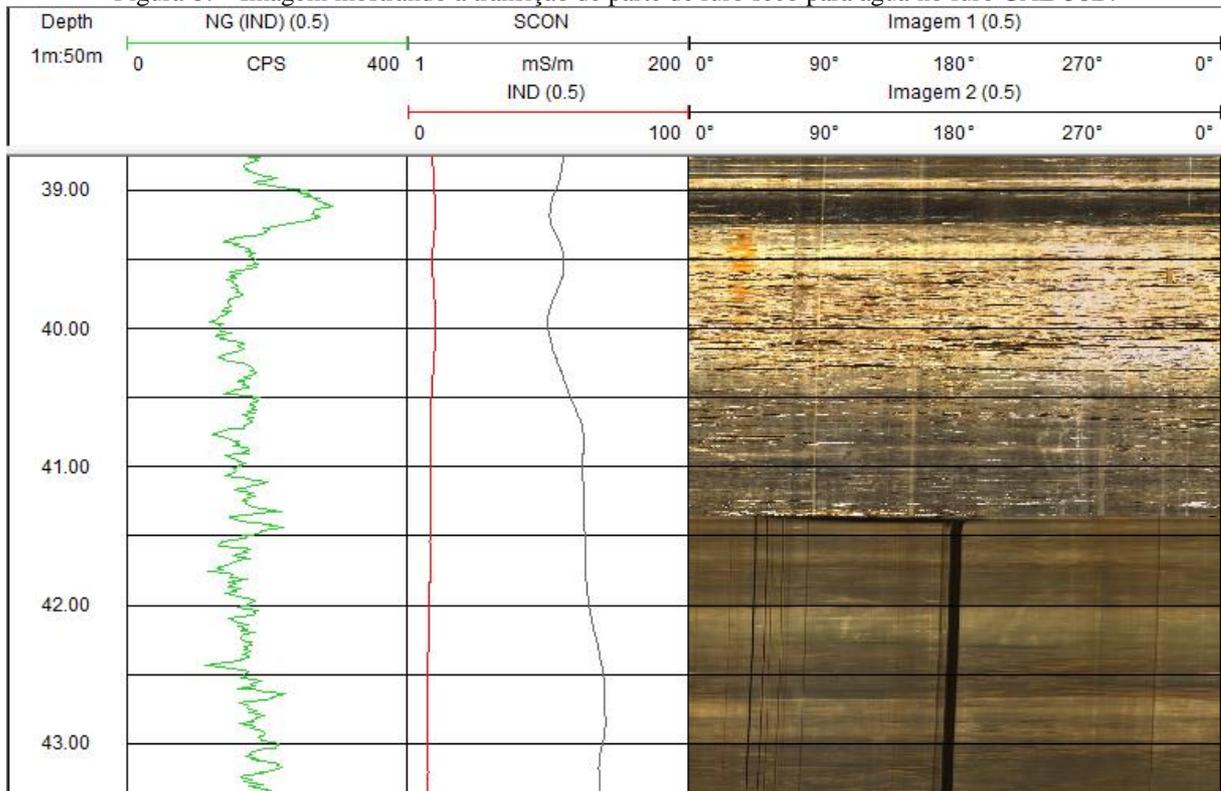
Tabela 9 - Estratos de carvão dos furos de sondagens da companhia Calombo e os resultados obtidos de espessuras estimadas nos registros elétricos em relação às descrições geológicas. ND = perfil geofísico não disponível; NV = estrato não visível na perfilagem.

Furo	Camada	Testemunho			GLOG			SPR			IND		
		De	Para	Espessura	De	Para	Espessura	De	Para	Espessura	De	Para	Espessura
CAL - 57	CA	29.5	30.63	1.13	ND	ND	ND	NV	NV	NV	ND	ND	ND
CAL - 57	S1	39.76	39.8	0.04	ND	ND	ND	NV	NV	NV	ND	ND	ND
CAL - 57	S2	39.98	41.99	2.01	ND	ND	ND	39.89	42.21	2.32	ND	ND	ND
CAL - 57	S3	44.8	45.17	0.37	ND	ND	ND	NV	NV	NV	ND	ND	ND
CAL - 57	M	48.91	49.64	0.73	ND	ND	ND	NV	NV	NV	ND	ND	ND
CAL - 58B	A	36.7	38.28	1.58	ND	ND	ND	ND	ND	ND	36.27	38.42	2.15
CAL - 58B	S1	46.42	47.03	0.61	ND	ND	ND	ND	ND	ND	NV	NV	NV
CAL - 58B	S2	47.47	50.89	3.42	ND	ND	ND	ND	ND	ND	46.08	50.91	4.83
CAL - 58B	S3	52.71	52.97	0.26	ND	ND	ND	ND	ND	ND	NV	NV	NV
CAL - 58B	M	55.4	56.4	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	NV	NV	NV

● Furo CAL-58B: Comparação entre Imagens OPTV e Descrição Geológica

Apenas na parte superior do furo (acima de 40,9m) as imagens de OPTV mostraram boa visibilidade (condição de furo seco). Abaixo desta profundidade, a turbidez da água não permitiu reconhecimento litológico satisfatório. A Figura 67 mostra a transição da imagem produzida de furo seco para furo com água.

Figura 67 - Imagem mostrando a transição de parte de furo seco para água no furo CAL-58B.



Para melhorar a correlação entre sinais geofísicos e testemunhos, foi preciso aplicar um *shift* de 0,5m no OPTV e nos outros registros (NG e IND).

As Figuras 68 (A e B) mostram contrastes entre camada de carvões e estéreis no furo seco e com água, respectivamente. Porém, para obter-se imagem boa dentro d'água, a iluminação foi aumentada para o nível 14 a partir de aprox. 41m de profundidade. Observa-se na Figura 68 B que, sendo água decantada, é possível visualizar os estratos de carvões CS1, CS2 e o *parting* entre eles, quando os valores de iluminação e *exposure* estão escolhidos corretamente. Na comparação da imagem com a descrição geológica, parece que a visualização da camada CS2 é incompleta a partir de 50m e a causa impediu o reconhecimento das outras camadas (CS3 e CM), conforme a Figura 69.

Figura 68 - Imagens capturadas de OPTV em (A) furo seco e (B) com água.

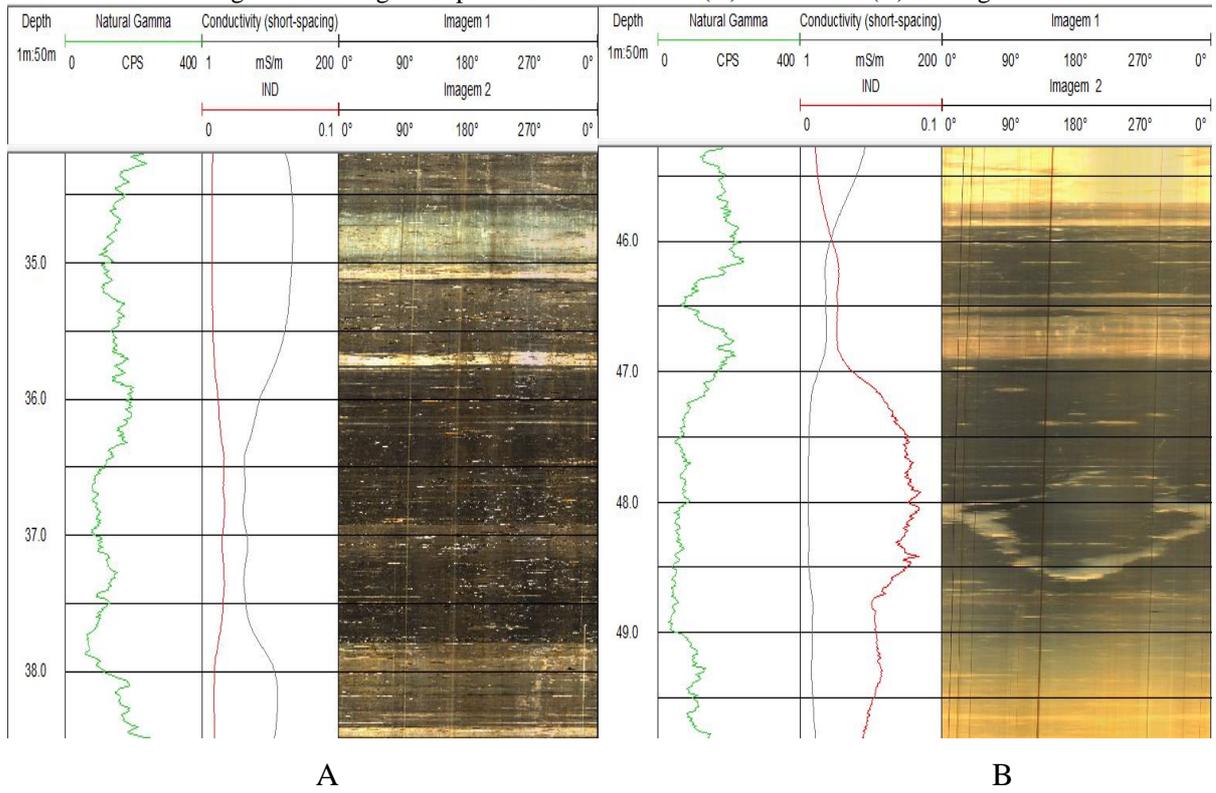
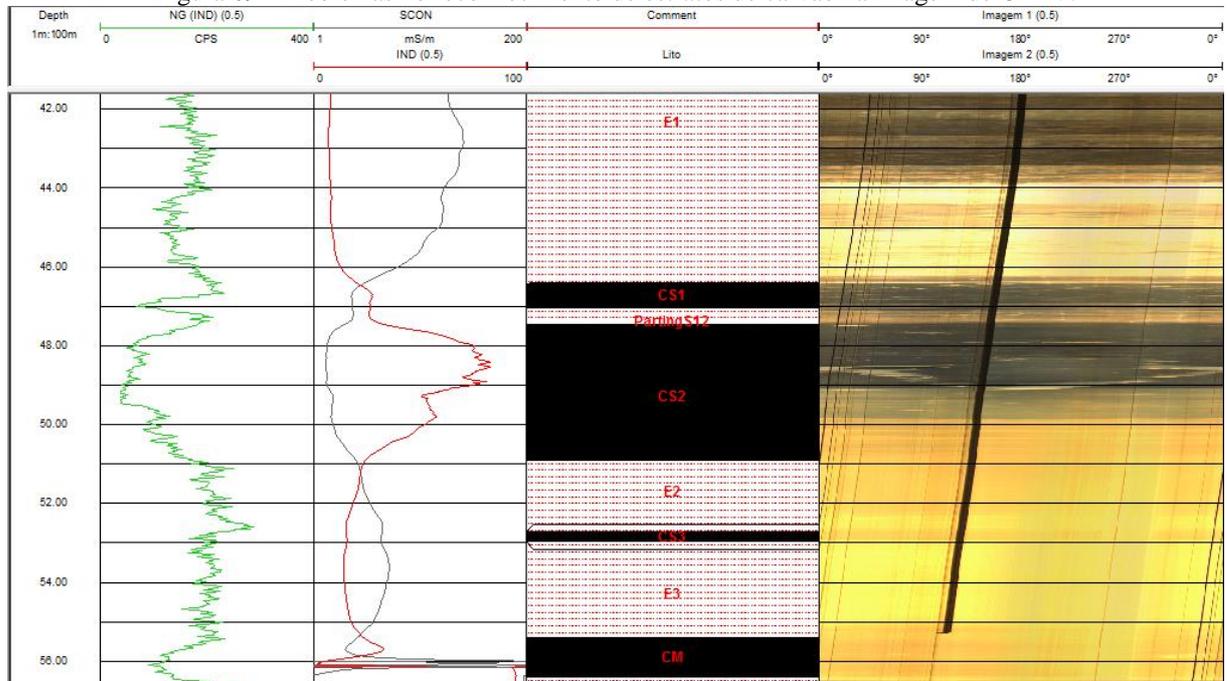


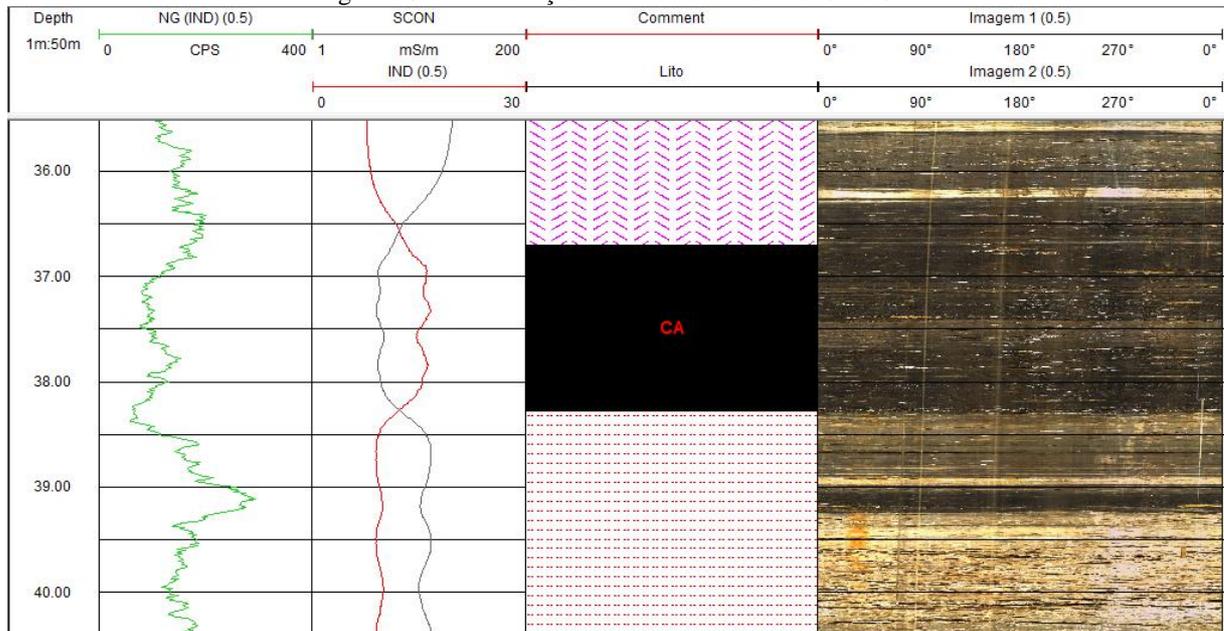
Figura 69 - Problemas no reconhecimento de estratos de carvão na imagem de OPTV.



- Furo CAL-58B: Comparação entre IND e Descrição Geológica

Na análise de IND, a camada A aparece claramente no perfil e sua espessura estimada está próxima ao testemunho (Figura 70). Entretanto, a camada CS1 não consegue ser individualizada da S2, ou seja, a presença de *partings* entre S1 e S2 não é reconhecida (Figura 69).

Figura 70 - Identificação da camada A no furo CAL-57.



A camada S3, com espessura aproximada de 0,3m, não está visível no perfil de indução, ao passo que o registro de CM é incompleto (Figura 69). O registro de IND só permitiu identificar 2 camadas de carvão, porém foram identificadas 5 camadas nos testemunhos.

- Furo CAL-57: Comparação entre imagens OPTV e Descrição Geológica

Em geral, as imagens não são boas devido à turbidez e coloração da água presente no furo. A camada A não pode ser bem visualizada no OPTV (Figura 71); os contatos não são nítidos e a coloração escura esperada para o carvão não se verificou (este é um aspecto inesperado para o OPTV). Ao observar-se os registros de GN e AE, parece haver uma porção central de estéril na camada, que não coincide com a descrição de testemunhos de sondagem. Isto traz dúvidas sobre a real espessura da camada A.

Igualmente, as camadas S1, S2, S3 e M não são visíveis no OPTV em função da turbidez do fluido, como pode ser visto na Figura 72.

Figura 71 - Não visualização de camada de carvão A, sem a cor preta esperada. Furo CAL-57.

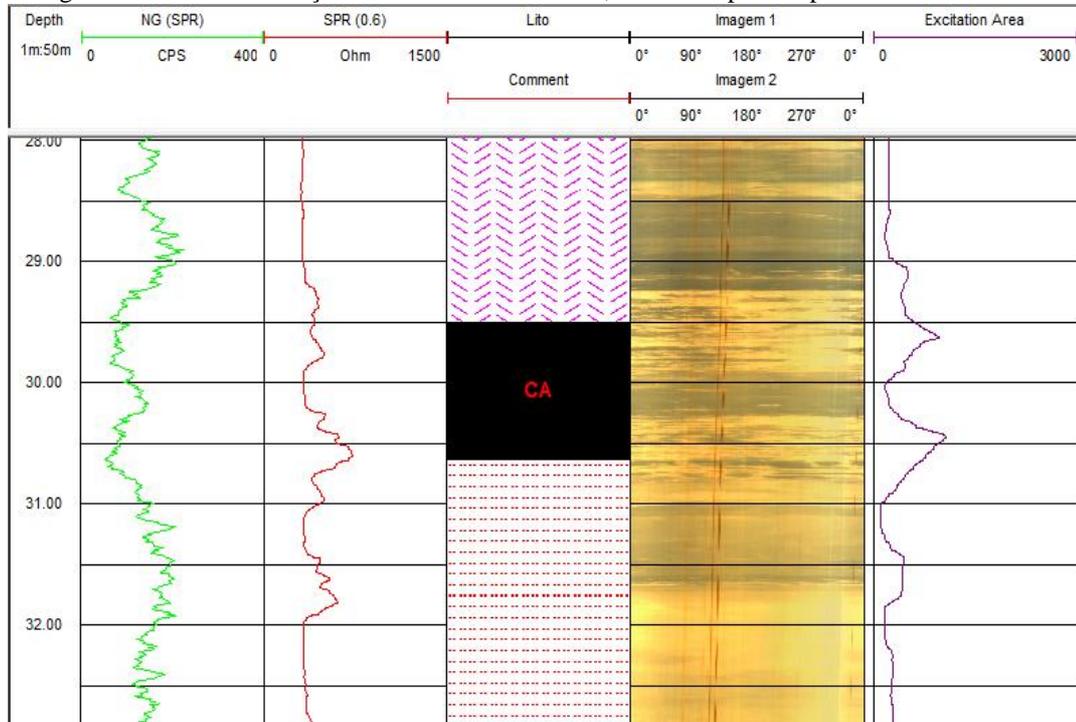
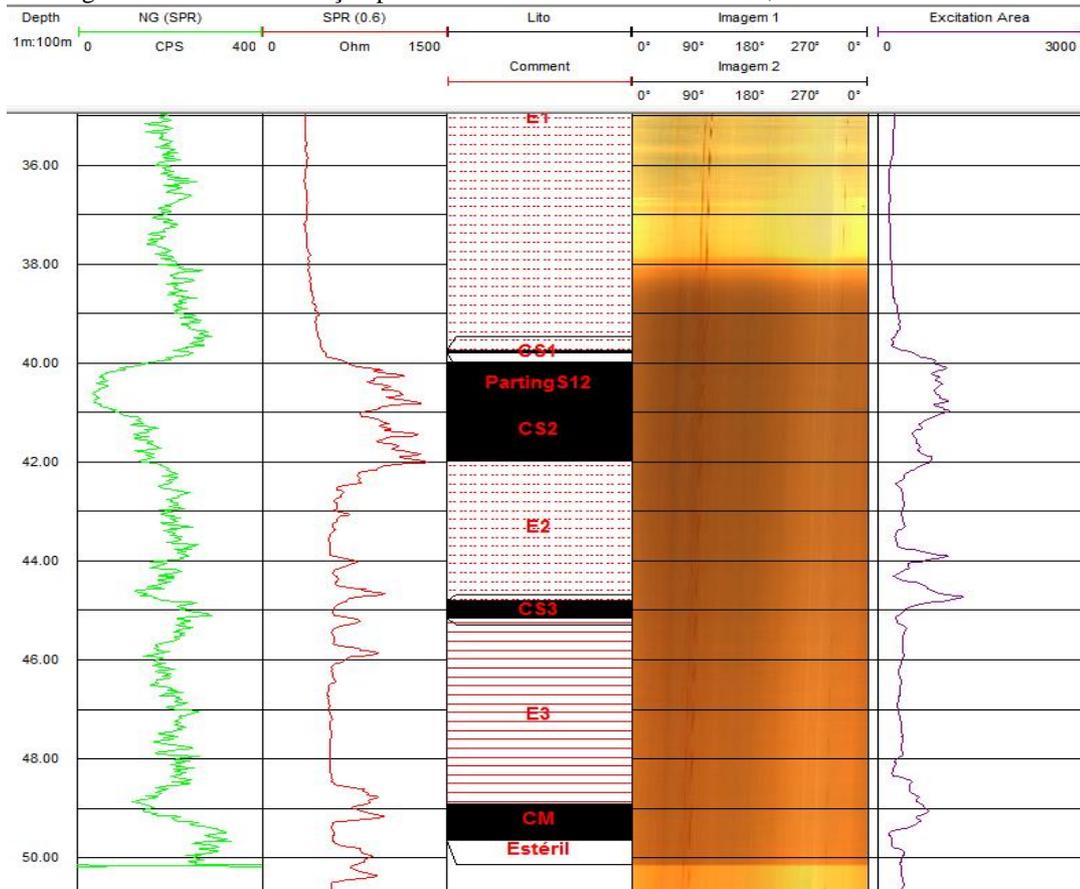


Figura 72 - Não visualização por OPTV dos estratos de carvão S2, S3 e M. Furo CAL-57.



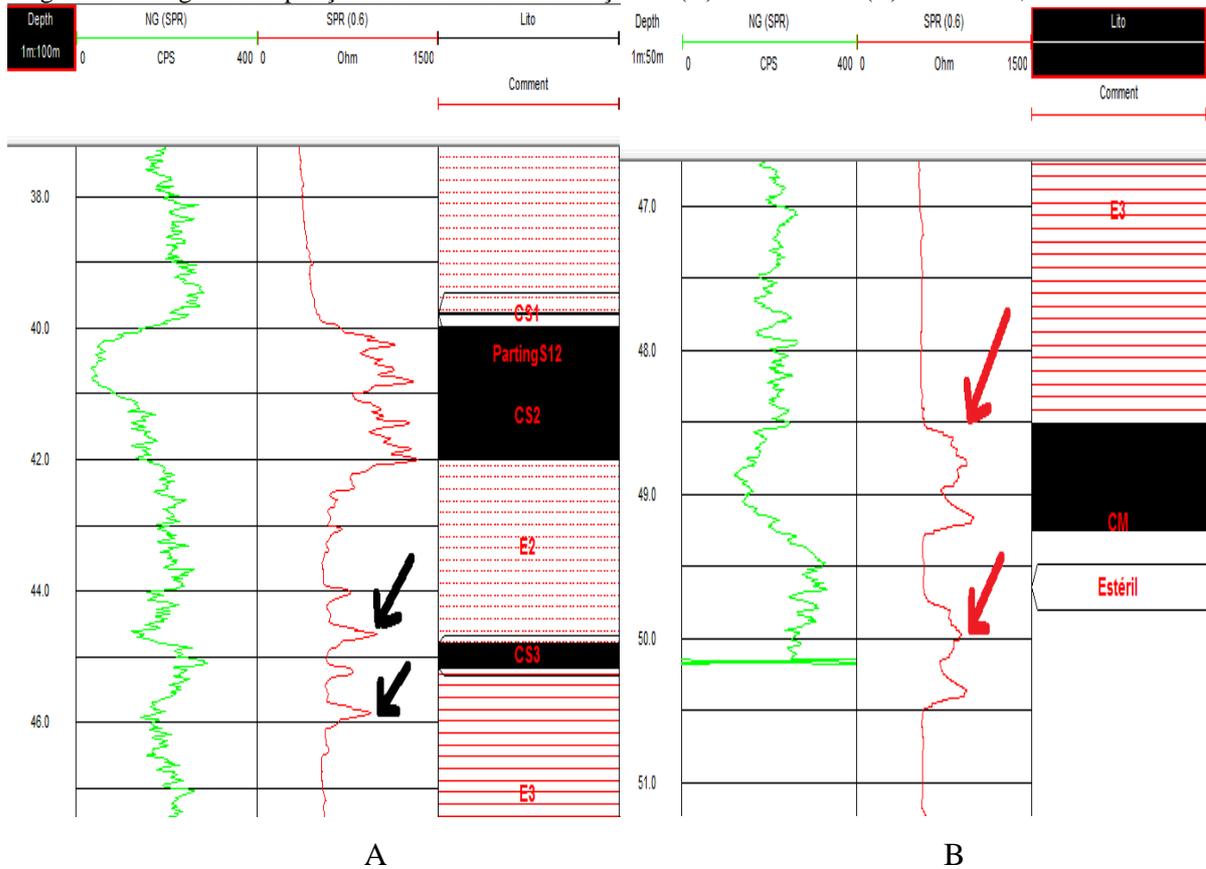
● Furo CAL-57: Comparação entre SPR e Descrição Geológica

Neste perfil, a camada S1 não apareceu no SPR (estrato bastante delgado, apenas 4cm), mas a camada S2 foi bem registrada na perfilagem e teve sua espessura estimada, correspondendo ao testemunho (Figura 72).

Para a camada S3, existem problemas relacionados com a localização desta camada usando-se somente o perfil SPR. Ao observar-se este perfil somente, aparecem picos de alto valor de resistência, que confundem a análise, dando a impressão de que está sendo produzida uma repetição de sinal elétrico da camada S3, que inclusive não é confirmada no perfil GN (ver Figura 73-A, com as repetições assinaladas pelas setas pretas). Ou seja, olhando-se apenas para o SPR, a correlação com testemunho não é confiável. Por outro lado, guiando-se pelo perfil GN, é possível identificar a posição verdadeira da camada S3.

A camada M tem comportamento similar à S3. Uma ilustração da repetição de sinal para SPR encontra-se na Figura 73-B.

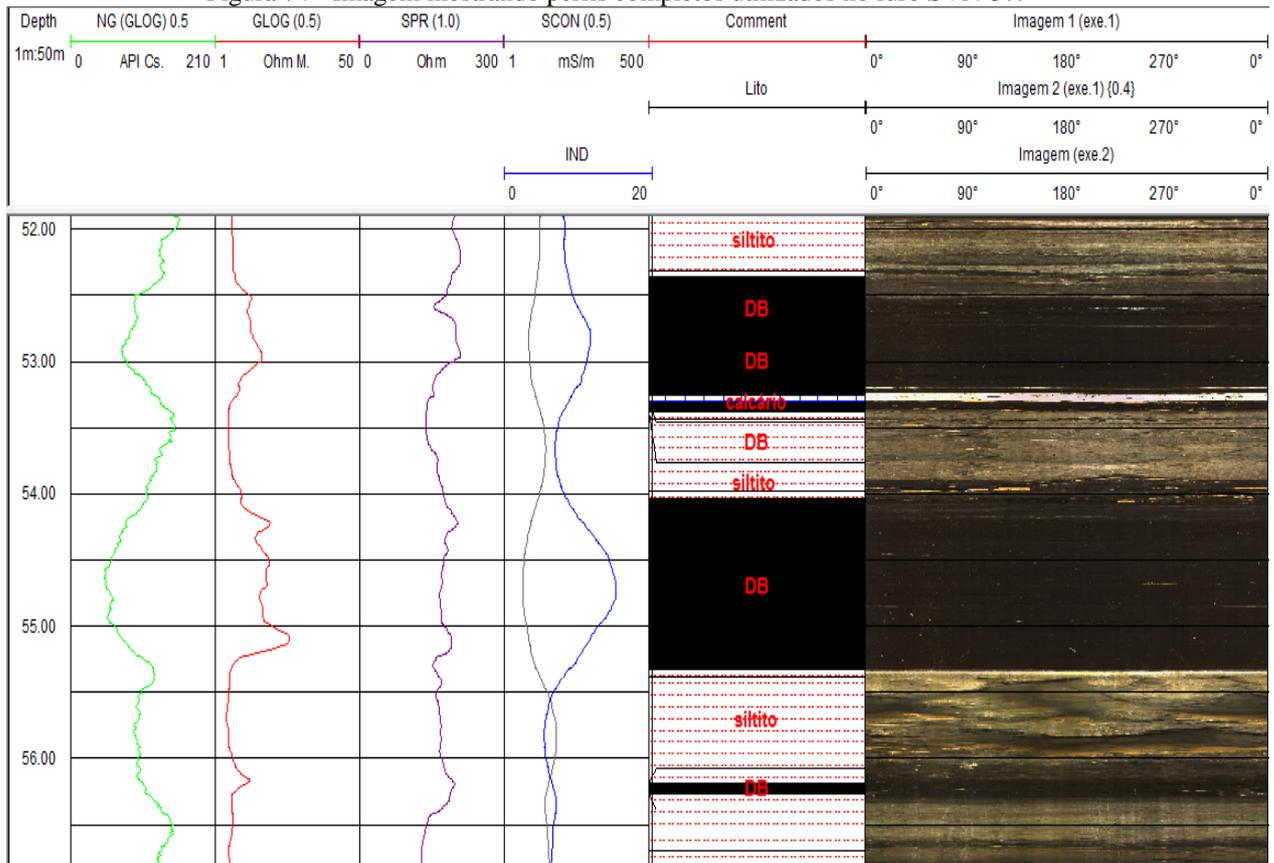
Figura 73- Imagem de repetição de sinais na identificação de (A) camada S3 e (B) camada M, no furo CAL-57.



#### 5.4.4. Área de Seival

Nesta área, apenas um furo de sondagem (SVN-37) foi analisado, tendo sido coletados os registros de todas as sondas (GLOG, SPR, IND e OPTV) utilizadas no atual estudo, inclusive com adição de floculante ao fluido de preenchimento. A Figura 74 ilustra parte dos registros obtidos de cada sonda. O furo apresenta 13 estratos de carvão, sendo 9 com qualidade DB (*Dull Bright*), 3 de qualidade DM e 1 estrato com qualidade BD (*Bright Dull*), a mais alta qualidade para este furo. A presença de estratos carbonosos de pequena espessura (entre 0,1m e 0,3m aprox.), localizados entre camadas de siltitos, foi usada para estimar a resolução vertical das sondas de perfilagem, uma vez que as características de resistividades são bem distintas entre carvão e silito. Por outro lado, existem alguns estratos com alta resistividade que podem confundir a definição dos contatos de perfilagem. O diâmetro de furo é 75mm (3") e a presença de fluido condutivo (sulfato de alumínio) teve impacto nos registros dos perfis elétricos.

Figura 74 - Imagem mostrando perfis completos utilizados no furo SVN-37.



A identificação completa das camadas de carvão por perfilagem e a descrição geológica encontram-se na Tabela 10.

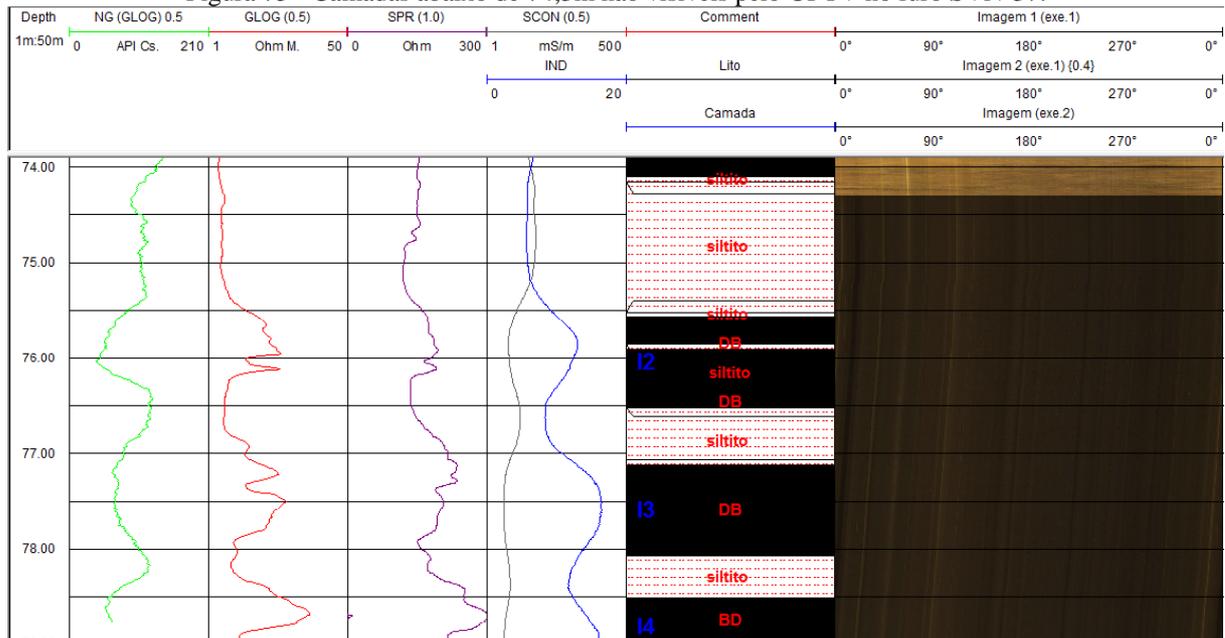
Tabela 10 - Estratos de carvão do furo SVN-37 em Seival e as espessuras estimadas pelos registros elétricos.  
S/N=Camada sem nome.

Furo	Sondagem				Perfilagem								
	Camada	Testemunho			GLOG			SPR			IND		
		De	Para	Espessura	De	Para	Espessura	De	Para	Espessura	De	Para	Espessura
SVN - 37	S5	51.39	51.76	0.37	51.42	51.87	0.45	51.42	51.96	0.54	NV	NV	NV
SVN - 37	S4	52.36	53.38	1.02	52.38	53.31	0.93	NV	NV	NV	51.65	53.42	1.77
SVN - 37	S3	54.03	55.33	1.3	54.08	55.29	1.21	NV	NV	NV	53.92	55.49	1.57
SVN - 37	S/N	56.19	56.27	0.08	56.04	56.24	0.2	56.09	56.4	0.31	NV	NV	NV
SVN - 37	S2	58.25	59.19	0.94	58.23	59.12	0.89	58.21	59.12	0.91	58.08	61	2.92
SVN - 37	BL1	59.85	60.33	0.48	59.65	60.12	0.47	59.4	60.49	1.09	NV	NV	NV
SVN - 37	BL2	60.41	60.71	0.3	60.22	60.47	0.25	NV	NV	NV	NV	NV	NV
SVN - 37	BL3	60.81	60.92	0.11	60.54	60.74	0.2	NV	NV	NV	NV	NV	NV
SVN - 37	S	62.61	64.86	2.25	62.35	64.64	2.29	NV	NV	NV	62.28	64.88	2.6
SVN - 37	I	65.66	67.23	1.57	65.41	67	1.59	NV	NV	NV	65.35	67.28	1.93
SVN - 37	I1	72.73	74.1	1.37	72.42	73.64	1.22	72.48	73.65	1.17	70.56	73.97	3.41
SVN - 37	I2	75.57	76.52	0.95	75.36	76.21	0.85	75.36	76.21	0.85	75.26	76.46	1.2
SVN - 37	I3	77.12	78.07	0.95	76.76	77.92	1.16	76.56	77.92	1.36	76.86	78.45	1.59
SVN - 37	I4	78.52	79.12	0.6	78.22	78.9	0.68	78.21	79.1	0.89	NV	NV	NV

- Furo SVN-37: Comparação entre Imagens OPTV e Descrição Geológica

As imagens geradas no furo SVN-37 foram claras (Figura 74). Foi possível identificar 11 camadas de carvão no total. Entretanto, abaixo de 74,3m de profundidade, o acúmulo de resíduos impediu a visibilidade dos estratos (Figura 75).

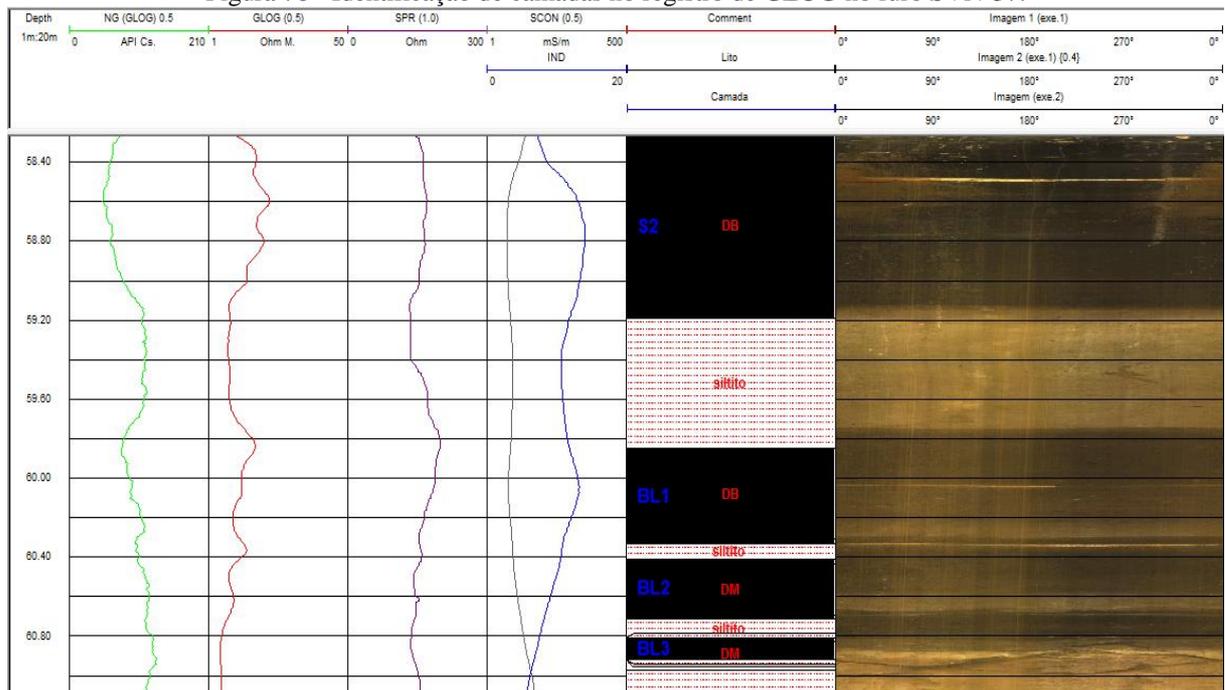
Figura 75 - Camadas abaixo de 74,3m não visíveis pelo OPTV no furo SVN-37.



- Furo SVN-37: Comparação entre imagens GLOG e Descrição Geológica

O aspecto mais importante a ser notado quanto ao GLOG é que quase todos os estratos de carvão podem ser bem individualizados neste perfil, com exceção da sequência BL1-BL2-BL3, onde a individualização não é clara. Assim, é possível estimar as espessuras de todos os estratos, e comparar com as descrições geológicas. A Figura 76 mostra 4 estratos de carvões, onde o primeiro (camada S2) é de qualidade DB e bem distinto dos demais no GLOG e nos outros registros, tendo correspondência com a imagem gerada no OPTV e descrição de testemunho. Nos 3 restantes (BL1, BL2, BL3), apenas o GLOG consegue dar indicativos de individualização, ainda assim com pouca clareza.

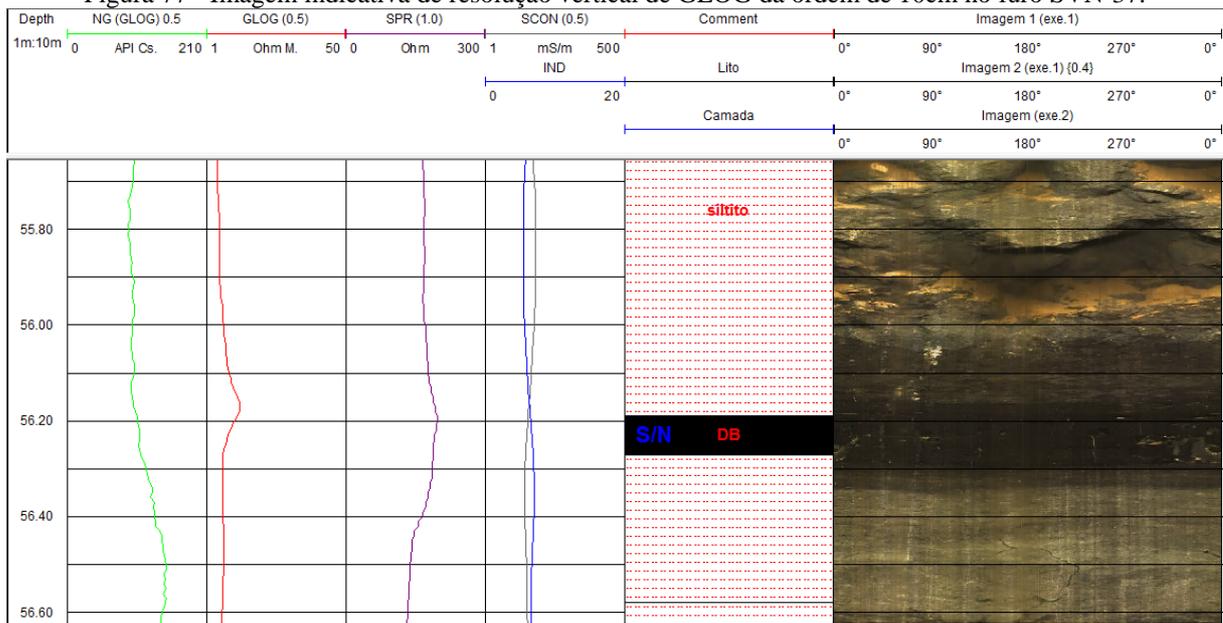
Figura 76 - Identificação de camadas no registro de GLOG no furo SVN-37.



As comparações com a descrição geológica também permitem estimar a resolução vertical da sonda GLOG, para esta condição geológica.

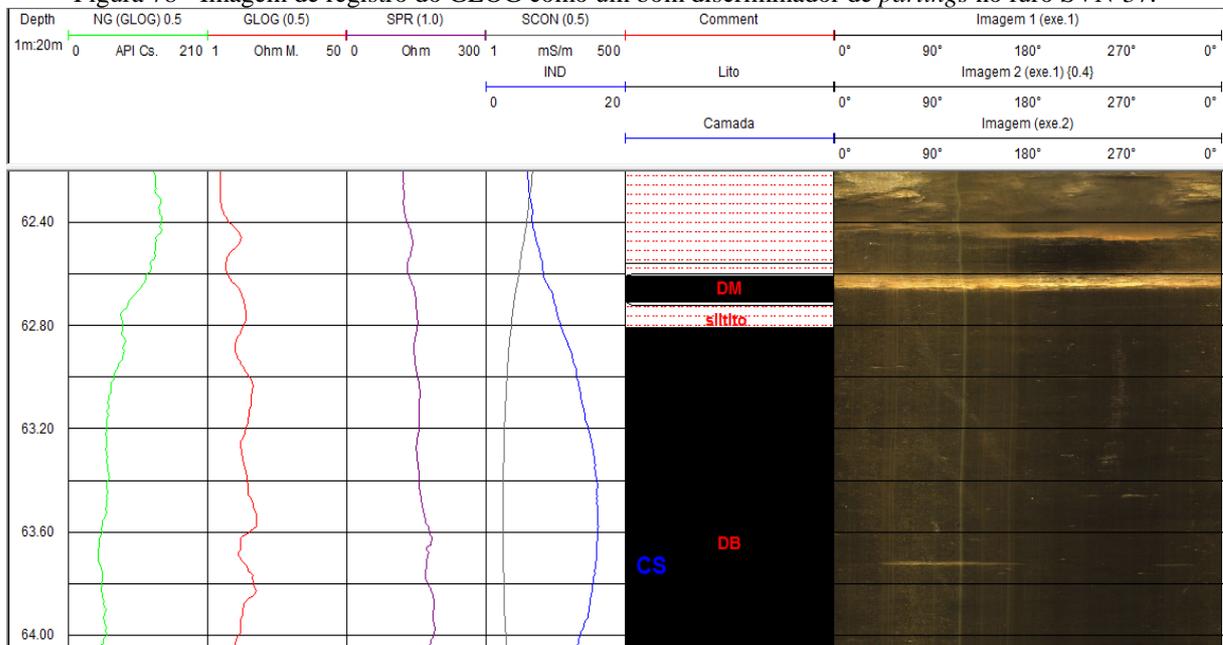
Uma camada de carvão sem denominação (S/N), com 8cm de espessura e iniciando em 56,19m, conseguiu ser individualizada aqui (Figura 77), produzindo um registro com aprox. 0,15 m de espessura. Isto está próximo da resolução teórica esperada para o dispositivo *guard-log* (10cm, no presente caso).

Figura 77 - Imagem indicativa de resolução vertical de GLOG da ordem de 10cm no furo SVN-37.



O GLOG também funcionou bem como discriminador de *partings*, então a noção de resolução vertical pode ser aplicada aqui. Ele conseguiu individualizar *partings* de cerca de 10cm de espessura entre os litotipos DM e DB, como pode ser visto na Figura 78.

Figura 78 - Imagem de registro do GLOG como um bom discriminador de *partings* no furo SVN-37.

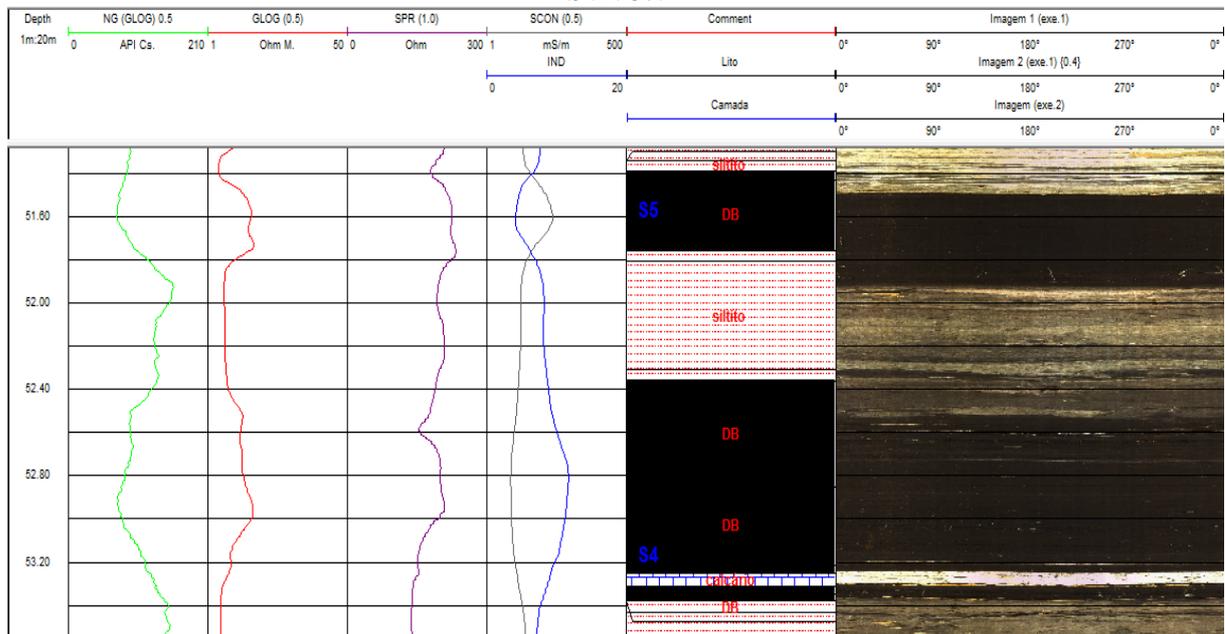


● Furo SVN-37: Comparação entre IND e Descrição Geológica

Como já foi citado no (capítulo 2.4.3), apenas o registro SCON será analisado devido à sua capacidade de dar respostas mais detalhadas que LCON. Os estratos mais finos de carvão não conseguem ser individualizados pela sonda IND. Exemplo disso é o registro das camadas S4 e S5 (Figura 79), que se fundem dando a impressão de tratar-se de uma camada de carvão única tendo seu teto e base em aproximadamente 51,7 e 53,4m.

Do total de 13 camadas, o perfil IND só conseguiu discriminar 9 estratos de carvão.

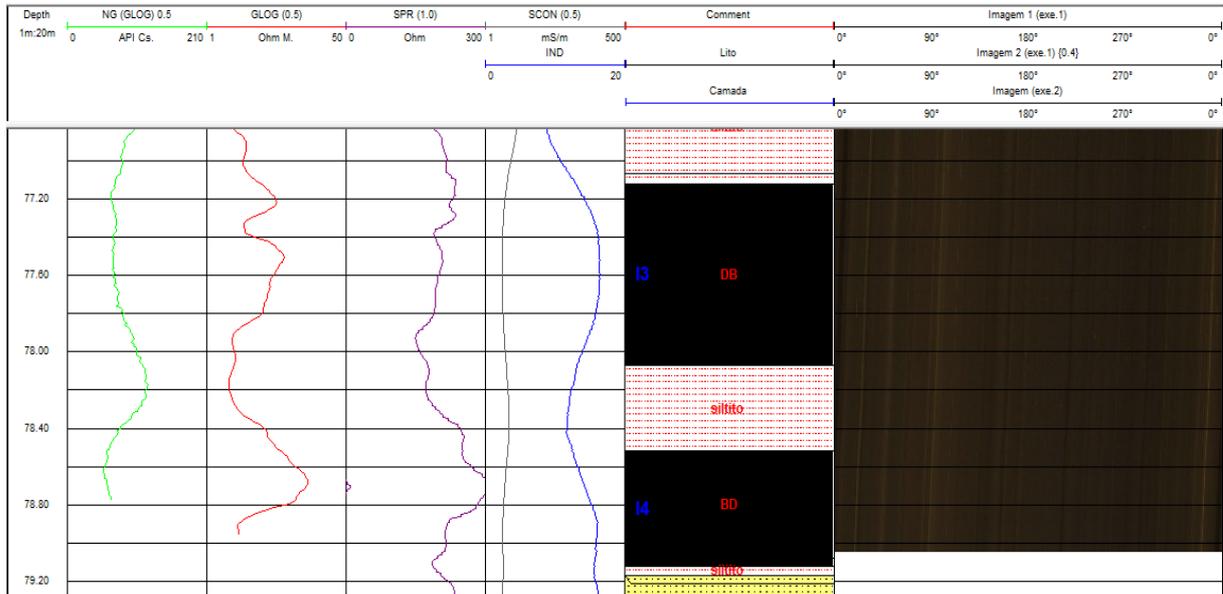
Figura 79 - Imagem mostrando a dificuldade do registro de IND para individualizar as camadas S5 e S4 em furo SVN-37.



Ao contrário do GLOG, a camada de carvão de 8cm (S/N) não aparece nos registros de indução, o que é observado na Figura 76. Além disso, as discriminações de intercalações de estéril entre estratos de carvão não são claras (ver Figura 80).

Para individualizar-se uma camada de carvão, é necessária uma separação de estéril de pelo menos 60cm; em caso contrário, o perfil IND mostrará uma feição única.

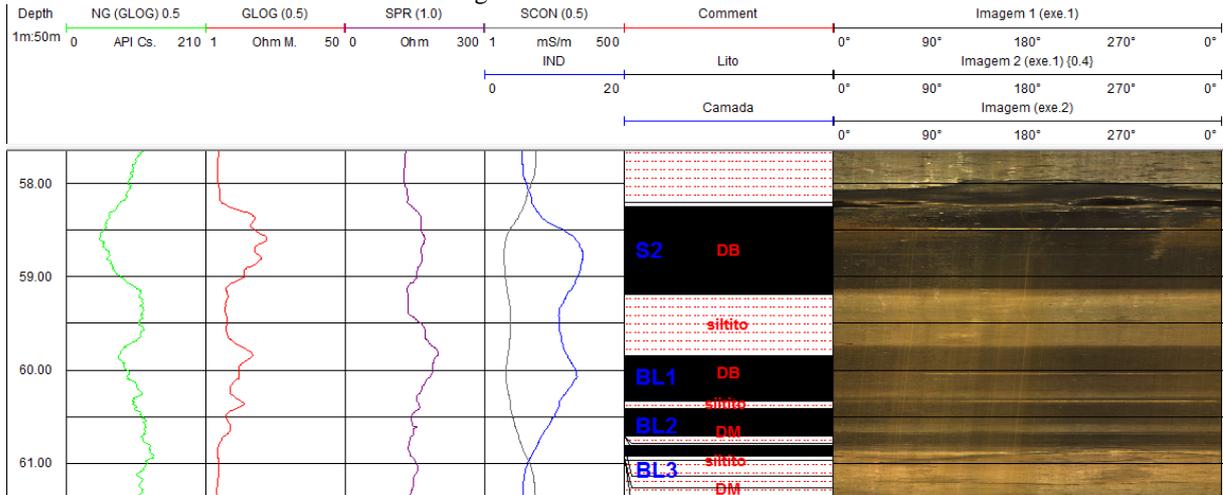
Figura 80 - Imagem mostrando a dificuldade do registro de IND ao mostrar intercalações de estéril entre estratos de carvão no furo SVN-37.



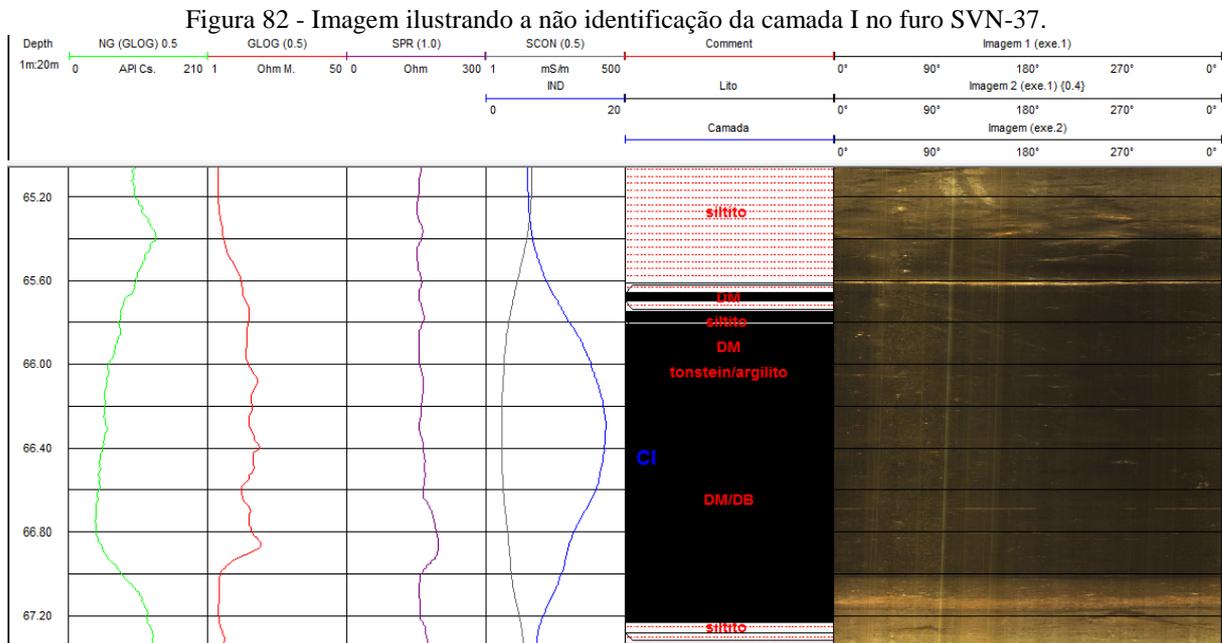
● Furo SVN-37: Comparação entre SPR e Descrição Geológica

O SPR identificou 10 estratos de carvão de um total de 13 estratos. Entretanto, apresentou dificuldades quanto aos *partings* entre as camadas de carvão. Por exemplo, na Figura 81, o registro que marca a espessura de separação entre S2 e BL1 é menor quando comparada à espessura proporcionada pela descrição geológica (ver diferença na Tabela 10).

Figura 81 - Imagem mostrando uma espessura estimada do *parting* menor que a proporcionada por testemunho no registro de SPR no furo SVN-37.



Na Figura 82, observa-se que o SPR não consegue registrar a camada I; o mesmo não ocorre com as outras sondas.



## 5.5. RESULTADOS

A análise dos perfis geofísicos permite encaminhar uma resposta a respeito da principal questão levantada nesta dissertação, ou seja, qual o tipo de sonda de resistividade mais adequado para os trabalhos em carvão nas áreas citadas, no sentido de permitir o reconhecimento litológico mais fácil e claro para estratos de carvão. Os critérios a seguir serão usados para justificar a escolha da “melhor” sonda.

(a) definição da sonda que permitiu a identificação dos estratos de carvão no maior número de vezes, para os furos perfilados;

(b) definição da sonda que apresentou a menor diferença entre espessura de camada observada na descrição geológica (testemunhos) e espessura de camada determinada por perfilagem geofísica.

No critério (a), a sonda que permitiu o maior índice de identificação dos estratos de carvão foi a sonda GLOG. Isto é visto na Tabela 11, onde são mostrados os registros de sucesso na detecção de estratos de carvão, comparando-se as três sondas utilizadas.

Tabela 11 - Percentagem de sucesso na detecção de estratos de carvão para as sondas GLOG, IND e SPR. Obs: ND = Perfil não disponível, F/A = Falta de água, R/I = Registro incompleto.

Furo	Núm. camadas de carvão no furo	Total de camadas identificadas para cada sonda		
		GLOG	SPR	IND
B3-60	4	4	3	ND
B3-61	2	2	0	ND
B3-62	4	4	4	ND
B3-63	8	8	6	ND
B3-66	8	8	6	ND
B3-72	9	9	2	5
CRN-72	3	1(F/A)	ND	2
CRN-81	3	3	3	ND
CRN-82	3	2	2	ND
CAL-57	5	ND	1	ND
RA-48	3	ND	3	ND
CAL-58B	5	ND	ND	2
SVN-37	14	14	9 (R/I)	8

No critério (b), a sonda GLOG foi a que apresentou menor diferença entre espessura de estratos detectados por perfilagem em relação à espessura definida por análise de testemunhos. Isto aparece nas Tabelas 12 e 13. Na Tabela 12, a comparação é feita considerando somente os furos B3-72 e SVN-37, para eliminar a parcialidade durante a análise dos registros, os quais apresentam perfis elétricos para as três sondas (GLOG, SPR, IND). Na Tabela 13, fez-se a comparação utilizando o mesmo critério (b) para os furos de sondagem B3-60, 61, 62 e 63, com os perfis GLOG e SPR. Observa-se que os resultados obtidos e conclusão foram iguais aos verificados na Tabela 12.

Tabela 12 - Estatísticas de diferenças entre espessuras de estratos por perfilagem e por análise de testemunhos de sondagem. NV = estrato não visível na perfilagem.

Furo	Camadas	Espessura por Sondagem (m)	Diferenças de espessura entre perfis geofísicos e testemunhos		
			GLOG (m)	SPR (m)	IND (m)
B3-72	A1	0,49	0,09	0,05	-0,81
	A2	0,18	-0,16	-0,1	NV
	B	0,21	-0,05	NV	NV
	S	1,25	-0,06	NV	-0,59
	Leito	0,32	-0,07	NV	-0,47
	M1	0,40	-0,1	NV	NV
	M2	0,80	-0,11	NV	-1,06
	I1	1,65	-0,66	NV	-1,27
	I2	0,4	0,04	NV	NV
SVN-37	S5	0,37	-0,08	-0,17	NV
	S4	1,02	0,09	NV	-0,75
	S3	1,3	0,09	NV	-0,27
	S2	0,94	0,05	0,03	-1,98
	BL1	0,48	0,01	-0,61	NV
	BL2	0,3	0,05	NV	NV
	BL3	0,11	-0,09	NV	NV
	S	2,25	-0,04	NV	-0,35
	L	1,57	-0,02	NV	-0,36
	L1	1,37	0,15	0,2	-2,04
	L2	0,95	0,1	0,1	-0,25
	L3	0,95	-0,21	-0,41	-0,64
	L4	0,6	-0,08	-0,29	NV

### 5.5.1. Resolução vertical de GLOG

O perfil de GLOG apresenta os melhores resultados em termos de resolução vertical e também da percentagem de identificação de estratos de carvão. Estratos de carvão com até aprox. 15cm de espessura puderam ser identificados. Isto está de acordo a teoria do *guard-log*, que estabelece que este tipo de sonda apresenta resolução vertical da ordem do espaçamento do eletrodo *guard* (10cm, no presente caso).

O GLOG permite a melhor estimativa das espessuras de *partings* no carvão e também consegue mostrar com mais clareza as diferenças de resistividade entre carvão e estéril (arenitos, por exemplo), ajudando na discriminação dos estratos.

Obs.: nota-se que as diferentes sondas não mostram valores numéricos iguais para a resistividade dos mesmos estratos. Isto também está registrado na literatura (AFONSO, 2014).

Tabela 13 - Estatísticas de diferenças entre espessuras de estratos por perfilagem e por análise de testemunhos de sondagem. NV = estrato não visível na perfilagem, ND = Perfis geofísica não disponível.

Furo	Camadas	Espessura por Sondagem (m)	Diferenças de espessura entre perfis geofísicos e testemunhos		
			GLOG (m)	SPR (m)	IND (m)
B3-60	S	0,57	0,07	0,12	ND
	Leito	0,38	0,05	0,07	ND
	M1	0,66	-0,07	-0,24	ND
	M2	1,4	0,11	NV	ND
B3-61	S	1,13	-0,07	NV	ND
	M2	1,17	0,17	NV	ND
B3-62	A	0,22	0,05	0,12	ND
	S	0,87	0,21	0,25	ND
	M1	0,59	-0,15	-0,16	ND
	M2	0,8	-0,08	-0,13	ND
B3-63	A1	0,36	-0,45	-0,47	ND
	A2	0,26	-0,14	-0,12	ND
	B	0,21	-0,1	NV	ND
	S	1,56	-0,09	0,43	ND
	M1	0,57	-0,55	-1,25	ND
	M2	0,75	-0,34	-0,43	ND
	M3	0,63	-0,06	NV	ND
	L1	2,25	-0,2	-0,51	ND

### 5.5.2. Resolução vertical de SPR

A resolução vertical do SPR em camadas finas pode identificar estratos de até 10cm, embora as repetições de sinal muitas vezes não permitam estimar a espessura real da camada. A discriminação de *partings* no carvão, no entanto, não é bem definida como ocorre em GLOG. Mesmo assim, dada a classificação das sondas utilizadas neste trabalho em termos de resolução vertical e de percentagem na identificação de estratos de carvão, considera-se o SPR como o segundo melhor arranjo.

### **5.5.3. Resolução vertical de IND**

O registro de IND tem a resolução vertical mais pobre entre as 3 sondas elétricas estudadas. Pelos resultados deste estudo, a sonda de indução não permite identificar estratos de carvão com espessura inferior a 60 ou 70cm.

### **5.5.4. Imagens de OPTV**

No aspecto dos objetivos secundários desta dissertação, ou seja, a verificação da aplicabilidade e resolução vertical da sonda OPTV, as imagens geradas sem dúvida auxiliam na identificação de estratos. Observa-se, nas imagens capturadas pelo OPTV, que quando o contato entre carvão e estéril é abrupto, como foi observado no calcário da Figura 79, este permite resolução vertical suficiente para observar estratos com espessura menor que 5cm. Nesta situação (contato abrupto), a imagem de OPTV oferece excelente apoio como ferramenta de verificação de perdas de recuperação de testemunhos, mostrando qualidade igual ou superior a fotos tiradas diretamente de testemunhos. Entretanto, quando o contato é gradual, como na camada S/N da Figura 77, a identificação fica sujeita a erros que variam em cada situação considerada.

Quanto ao fluido contido nos furos, a OPTV funcionou bem com água limpa (com floculante neste trabalho) ou ar. A perfuração destrutiva em furos secos também mostrou boas imagens, podendo ser bastante útil em situação de identificação de estratos em bancada de lavra, quando os contatos forem abruptos.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões e considerações finais desta dissertação, além de algumas recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

### 6.1. CONCLUSÕES

Como objetivo principal, este trabalho pretendeu analisar a aplicabilidade de diferentes dispositivos de perfilagem geofísica, destinados à medida de resistividade elétrica em estratos de carvão. Três dispositivos diferentes foram comparados: *guard-log*, *single point resistance* e *induction log*.

A análise dos perfis geofísicos obtidos em campo, quando comparados às descrições geológicas (testemunhos de sondagem), mostrou que, na grande maioria das vezes, a sonda GLOG apresentou o registro elétrico mais detalhado dos estratos de carvão, conseguindo discriminar bem os contatos entre carvão e esteril e mesmo os *partings*, em diversas situações. Desta forma, a espessura de estratos estimada pelo dispositivo *guard-log* apresentou-se mais próxima à descrição geológica do que os demais dispositivos.

O dispositivo SPR pode ser qualificado como o segundo melhor arranjo, considerando os mesmo critérios, apesar das dificuldades originadas pelas repetições de sinais, como visto no tópico 5.5. Na comparação, ele demonstra capacidade inferior ao GLOG quanto à separação de camadas de carvão e estéril.

O dispositivo IND é o de menor resolução vertical dentro os arranjos comparados, tendo conseguido registrar/identificar camadas de carvão de espessura grande (> 70cm). Ainda no aspecto de resolução vertical, IND tem grande dificuldade de registrar os *partings* entre camadas de carvão. Em contrapartida, IND tem uma vantagem sobre as outras sondas – só ele pode ser utilizado em furos secos, pois o funcionamento de GLOG e SPR exige obrigatoriamente água no furo.

Secundariamente, outro objetivo de interesse aqui é avaliar se as imagens geradas pela sonda OPTV podem melhorar a detecção dos estratos de carvão e a resolução vertical das sondas de resistividade. Observou-se que as imagens geradas quando o contato de carvão e estéril é abrupto, permitem resolução vertical suficiente para observar estratos com espessura menor que 5cm. Nesta situação (contato abrupto), a imagem de OPTV oferece excelente apoio como ferramenta de verificação de perdas de recuperação de testemunhos, mostrando qualidade

igual ou superior a fotos tiradas diretamente de testemunhos. Entretanto, quando o contato é gradual, a identificação fica sujeita a erros que variam em cada situação considerada. Outro aspecto importante é que a OPTV pode ser aplicada em furos de desmorte (preferencialmente secos), com boa visibilidade dos estratos. Naturalmente, no caso de furos contendo água, o aspecto operacional deve ser considerado, pois é necessário gastar-se tempo para a preparação do fluido antes da geração de imagens.

## 6.2. RECOMENDAÇÕES

Nos trabalhos futuros, seria importante aumentar o número de furos de desmorte para poder melhor comparar os perfis elétricos contra as imagens de OPTV. Como foi observado durante os testes, furos secos permitem as melhores imagens, neste caso, eliminando também o efeito do floculante nos registros de resistividade.

Quanto à repetição de sinal observado na sonda SPR, é fortemente recomendada a comparação com sondas SPR de outros fabricantes, pois este parece ser um efeito específico ligado ao modelo testado no presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABOARRAGE, A. M.; LOPES, R. C. **A Borda Leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica – SC/RS.** Porto Alegre: DNPM/CPRM, 1986. 18v.

AFONSO, J. M. S. **Electrical Resistivity Measurements in Coal: Assessment of Coal-Bed Methane Content, Reserves and Coal Permeability.** 2014. 272 f. Tese (PhD) – Department of Geology, University of Leicester, Leicester, 2014.

ARCHIE, G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. **Transactions of the AIME**, Englewood, v. 146, n. 1, p. 54-62, Dec. 1942.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 2519-1993:** Guide to the technical evaluation of higher rank coal deposits. Homebush, 1993.

BOND, L. O.; ALGER, R. P.; SCHMIDT, A. W. Well log applications in coal mining and rock mechanics. **Transactions of the Society of Mining Engineers**, Englewood, v. 250, p. 355-362, Jun. 1971.

BORSARU M.; ASFAHANIA, J. Low-activity spectrometric gamma-ray logging technique for delineation of coal/rock interfaces in dry blast holes. **Applied radiation and isotopes**, Amsterdam, v. 65, n. 6, p. 748-755, Jun. 2007.

BORSARU, M., CHARBUCINSKI, J., EISLER, P. L., YOUL, S. F. Determination of ash content in coal by borehole logging in dry boreholes using gamma-gamma methods. **Geoexploration**, Tucson, v. 23, n.4, p.503-518, Dec. 1985.

COPELMI MINERAÇÃO LTDA. **Relatório de Pesquisa.** Porto Alegre: DNPM, 1984. Gerência de Geologia e Pesquisa.

COPELMI MINERAÇÃO LTDA. **Relatório de Avaliação Geológica da Jazida de Seival.** Porto Alegre: Copelmi, 2005. Gerência de Geologia e Pesquisa.

COPELMI MINERAÇÃO LTDA. **Relatório de Pesquisa.** Porto Alegre: DNPM, 2005. Gerência de Geologia e Pesquisa.

COPELMI MINERAÇÃO LTDA. **Relatório de Pesquisa Interno.** Porto Alegre: DNPM, 2008. Gerência de Geologia e Pesquisa.

DAVIS, R. K.; MONIER-WILLIAMS, M. E.; SOL, S. J. Y.; SCHNEIDER, G. W.; PAILLET, F. L.; TURPENING, R. M. **Review of Borehole Based Geophysical Site Evaluation Tools and Techniques.** Toronto: Nuclear Waste Management Organization, 2009. 174 f. Relatório técnico TR-2009-25.

FERREIRA DA SILVA, C. N.; LAURIA, R. G. **Estudo da Viabilidade Técnica e Econômica da Substituição do Sulfato de Alumínio pelo Cloreto Férrico ou Sulfato Férrico no Tratamento de Água de Abastecimento.** 2006. 126 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Fundação Educacional de Barretos, Barretos, 2006.

FIRTH, D.; EIKINGTON, P. **Log Analysis for Mining Applications**. Brendale: Reeves Wireline Services, 1999.

GASPER, G. O. **Estimativa de qualidade de carvão a partir de perfilagem geofísica e seu uso no planejamento de lavra a curto prazo**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

GORELİK, B. **Avaliação do Uso da Perfilagem Geofísica para Reconhecimento das Assinaturas e Estimativas da Qualidade do Carvão dos Depósitos do Rio Grande do Sul**. 2014. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

HARTMAN, H.L. **SME Mining Engineering Handbook**, 2. Ed. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 1992.

HEARST, J. R.; NELSON, P. H.; PAILLET, F. L. **Well logging for physical properties**, 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2000.

HOFFMAN, G. I.; JORDAN, G. R.; WALLIS, G.R. **Geophysical Borehole Logging Handbook for Coal Exploration**. Edmonton: The Coal Mining Research Centre, 1982.

KAYAL, J. R.; DAS, L. K. A method of estimating ash content of coal from combined resistivity and gamma-ray logs. **Geoexploration**, Tucson, v. 19, n. 3, p. 193-200, Dec. 1981.

KAYAL, J. R.; CHRISTOFFEL, D. A. Coal Quality from Geophysical Logs: Southland Lignite Region, New Zealand. **The Log Analyst**, Houston, v. 30, n. 3, p. 343-352, Sept. 1989.

KOPPE, V. C. **Análise de Incerteza Associada à Determinação da Velocidade de Onda Sônica em Depósitos de Carvão Obtida por Perfilagem Geofísica**. 2005. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LIBÂNIO, M.; PEREIRA, M. M.; VORCARO, B. M.; RAIMUNDA, C. R.; HELLER L. Avaliação do Emprego de Sulfato de Alumínio e do Cloreto Férrico na Coagulação de Água Naturais de Turbidez Média e Cor Elevada. In: FEIRA INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 19., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 1997. p. 1365-1373.

MORIN, R.H. Hydrologic Properties of Coal Beds in the Powder River Basin, Montana I: Geophysical Log Analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 308, n. 1-4, p. 227-241, Jul. 2005.

NAEIMIPOUR, A.; BAHRAMPOUR, S.; DOGRUOZ, C. Ground Characterization While Drilling Roofbolters in Tunneling Operations. In: NORTH AMERICAN TUNNELING, 1., 2014, Los Angeles. **Proceedings...** Englewood: SME, 2014. p. 553-563.

OLIVEIRA, L. J. **Avaliação do uso da perfilagem geofísica para obtenção de informações secundárias para utilização em co-estimativas de variáveis geológico-mineiras.** 2005. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

REEVES, D. R. **Coal interpretation manual.** East Lake: BPB Instruments, 1981.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics.** Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations.** Washington: ASCE Press, 1997.

WEBBER, T. **Estimativa de qualidade de carvão usando krigagem dos indicadores aplicados a dados obtidos por perfilagem geofísica.** 2008. 233 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

WINSAUER, W. O.; SHEARIN JR, H. M.; MASSON, P. H.; WILLIAMS, M. Resistivity of brine-saturated sands in relation to pore geometry. **AAPG bulletin**, Tulsa, v. 36, n. 2, p. 253-277, Jun. 1952.