

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – CAMPUS CAÇAPAVA DO SUL**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA MINERAL**

**BARBARA VICTÓRIA REFFATTI ANDRADE**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PERFILAGEM GAMA-GAMA NA  
ESTIMATIVA DA ESPESSURA E DENSIDADE DE CAMADAS DE CARVÃO: UM  
ESTUDO DE CASO**

**Caçapava do Sul**

**2024**

**BARBARA VICTÓRIA REFFATTI ANDRADE**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PERFILAGEM GAMA-GAMA NA  
ESTIMATIVA DA ESPESSURA E DENSIDADE DE CAMADAS DE CARVÃO: UM  
ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa (Campus – Caçapava do Sul), como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mineral.

Orientadora: Prof. Dra. Luciana Arnt Abichequer

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Salvadoretti

**Caçapava do Sul**

**2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

A553a Andrade, Barbara Victória Reffatti  
Análise da Aplicação do Método de Perfilagem Gama-gama na  
Estimativa da Espessura e Densidade de Camadas de Carvão: um  
Estudo de Caso / Barbara Victória Reffatti Andrade.  
103 p.  
  
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM ENGENHARIA MINERAL, 2024.  
"Orientação: Luciana Arnt Abichequer".  
  
1. método gama-gama. 2. carvão. 3. densidade. 4. espessura.  
I. Título.

**BARBARA VICTÓRIA REFFATTI ANDRADE**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PERFILAGEM GAMA-GAMA NA  
ESTIMATIVA DA ESPESSURA E DENSIDADE DE CAMADAS DE CARVÃO: UM  
ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa (campus – Caçapava do Sul), como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Tecnologia Mineral.

Dissertação defendida e aprovada em: 01 de agosto de 2024

Banca examinadora

---

Prof. Dra. Luciana Arnt Abichequer  
Orientadora  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Marco Antonio da Silva Braga  
UFRJ



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/08/2024, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Marco Antonio da Silva Braga, Usuário Externo**, em 04/08/2024, às 15:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Paulo Salvadoretti, Usuário Externo**, em 05/08/2024, às 15:31, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANA ARNT ABICHEQUER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/08/2024, às 16:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1505156** e o código CRC **87F437DA**.

Dedico esta dissertação a minha amada avó e  
melhor amiga, Hélia Marques Andrade (*in  
memorian*).

## RESUMO

Em depósitos carboníferos, onde a rocha apresenta-se friável, nem sempre é possível obter a recuperação de um furo de sondagem (*hard data*), principal método direto para a coleta de dados de informações acerca da espessura, densidade e características das camadas de carvão e de estéril. Quando a recuperação de testemunho não é viável, são adotados métodos indiretos (*soft data*) com a finalidade de estimar estes atributos. Este estudo tem como objetivo comparar os dados de densidade e espessura de camadas de carvão adquiridos através do método de perfilagem gama-gama, por meio dos sensores *Long-Spaced Density* (LSD) e *High Resolution Density* (HRD) com aqueles obtidos através da recuperação de testemunho, de maneira a avaliar a acuracidade do método geofísico gama-gama e se um dos sensores utilizados apresenta maior acuracidade quando comparado ao outro. O enfoque na análise da densidade e da espessura dos estratos carboníferos ocorre porque estes são dois parâmetros que influenciam na decisão de se uma camada será lavrada ou não e para a análise das mesmas, foram definidos limites, que são: (1) quanto menor a densidade de um estrato carbonífero (igual ou inferior a  $2,0 \text{ g/cm}^3$ ) maior será o poder calorífico do minério e por consequência, maior será o seu valor econômico; (2) a espessura das camadas, para ter possível potencial econômico, deve ser igual ou maior do que 0,4 metros conforme os parâmetros utilizados na indústria. A aquisição de dados foi realizada em quatro furos da área carbonífera denominada B3, localizada no município de Butiá, a 86 km de distância da capital do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Em relação à geologia da área, os pacotes carboníferos analisados pertencem à Formação Rio Bonito, unidade do Grupo Guatá da Bacia do Paraná. Para que o comparativo entre os dois grupos de dados fosse possível, foram aplicados os limites estabelecidos e citados acima para as camadas que deveriam ser analisadas via método geofísico e via dados geológicos e que são comumente empregados na avaliação de jazimentos carboníferos. Após a análise, comparou-se os dados obtidos através do método geofísico com os dados geológicos, com o uso do *software WellCad™*, estatística uni e bivariadas. Adicionalmente, realizou-se a comparação entre os dados geológicos e os dados obtidos via perfilagem gama-gama por dois sensores diferentes, o LSD e o HRD. Após as análises realizadas, concluiu-se que o método gama-gama, via ambos os sensores, é eficaz na identificação dos estratos

carboníferos, suas espessuras e densidades. Ademais, conclui-se que o método gama-gama é uma ferramenta valiosa na aquisição de dados, promovendo o adensamento de informações a respeito de um jazimento carbonífero, além de poder ser utilizado em locais onde não é possível realizar a sondagem com recuperação de testemunho.

**Palavras-chave:** método gama-gama; carvão; densidade; espessura.

## ABSTRACT

In coal deposits where the rock is friable, it is not always possible to obtain core recovery samples, the main direct method for collecting data about the thickness, density and characteristics of coal and waste layers (hard data). When the core recovery is not feasible, indirect methods (soft data) are adopted in order to know the attributes of the coal seams. This study aims to compare the density and thickness data of coal layers acquired through the gamma-gamma logging method, using the Long-Spaced Density (LSD) and High-Resolution Density (HRD) sensors, with those obtained through core recovery data analysis, to assess the accuracy of the gamma-gamma geophysical method and determine if one sensor exhibits greater accuracy when compared to the other. The focus on analyzing the density and thickness of coal seams is because these are two limits that influence the decision of whether a layer will be mined or not: (1) the lower the coal seam density (equal to or less than 2.0 g/cm<sup>3</sup>) consequently, the higher the calorific power and, the higher the economic value associated; (2) the thickness of the layers, must be equal to or greater than 0.4 meters, for potential economic viability, accordingly to industry standards. Data acquisition was conducted in four drillholes in the coal area known as B3, located in the Butiá city, 86 km away from the capital of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil. In terms of the geology of the area, the analyzed coal packages belong to the Rio Bonito Formation, a unit of the Guatá Group in the Paraná Basin. The limits established for the layers to be analyzed via geophysical methods, were that cited above and commonly used in evaluating coal deposits. After analysis, the data obtained through geophysical methods was compared with geological data using the WellCad™ software, uni and bivariate statistics. Additionally, a comparison was made between geological data and data obtained via gamma-gamma logging using two different sensors, LSD and HRD. After the analyses conducted, it was concluded that the gamma-gamma method, using both sensors, is effective in identifying coal seams, their thicknesses, and densities. Furthermore, it is concluded that the gamma-gamma method is a valuable tool in data acquisition, providing comprehensive information about a coal deposit, and can be used in locations where core recovery drilling is not possible.

**Keywords:** gamma-gamma method; coal; density; thickness.

## LISTA DE FIGURAS

Figura - 1 - Exemplo de representação gráfica de um perfil geofísico de poço. Onde da esquerda para direita são observados os seguintes parâmetros: (1) profundidade em metros; (2) registro Caliper; (3) registro de gama natural; (4) registro em gama-gama através da sonda LSD; (5) coluna estratigráfica.....	8
Figura 2 - Ilustração da execução da perfilagem geofísica em um furo de sondagem. ....	10
Figura 3 - Representação esquemática dos três principais parâmetros de investigação na perfilagem geofísica. ....	11
Figura 4 - Exemplo de resolução vertical em uma sonda com volume de investigação esférico.....	12
Figura 5 - efeito de diferentes colimações no volume de investigação e profundidade de investigação. ....	13
Figura 6 - Três efeitos de poço que alteram o registro do parâmetro geofísico de interesse.....	14
Figura 7 - Exemplo da capacidade das radiações ionizantes de penetrar diferentes materiais: em vermelho $\alpha$ , em amarelo $\beta$ e em verde, $\gamma$ . ....	15
Figura 8 - Radiação penetrando e posteriormente atravessando um determinado meio. ....	16
Figura 9 – Representação esquemática do Espalhamento de Compton. ....	18
Figura 10 - Ilustração da correlação entre os parâmetros de interesse. ....	20
Figura 11 – Sonda composta de fonte radioativa, cinco cintilômetros e braço mecânico. ....	21
Figura 12 - Imagem ilustrando o fenômeno de medida de radiação retroespalhada na perfilagem geofísica de densidade.....	21
Figura 13 - Função da resposta característica para sondas de perfil de radiação gama retroespalhada para materiais de diversas densidades. ....	22
Figura 14 – Ilustração do procedimento sequencial do ensaio afunda-flutua. As densidades estão em $\text{g/cm}^3$ . ....	25
Figura 15 – Mapa de localização da área de estudo.....	28
Figura 16 – Localização geográfica dos furos estudados na Área B3.....	28
Figura 17 – Mapa da geologia regional da Área B3, onde a cor vermelha representa as localidades onde são observadas rochas da Bacia do Paraná no Brasil, Uruguai e	

Argentina e a cor verde representa onde estão localizadas as rochas da Bacia no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. ....	29
Figura 18 - Coluna estratigráfica da Área B3, mostrando à direita da imagem, as variações faciológicas de cada camada. ....	33
Figura 19 – Etapas realizadas ao longo do trabalho, onde no fluxograma a cor verde representa etapas realizadas em estudos anteriores, enquanto a cor azul representa as etapas realizadas ao longo deste trabalho. ....	34
Figura 20 - Foto da perfuratriz Sullivan 22, utilizada durante a execução da campanha de sondagem na Área B3. ....	35
Figura 21 - Foto mostrando o armazenamento de alguns testemunhos de sondagem. ....	35
Figura 22 - Sonda SWDS® detalhando seus três tipos de sensores e a fonte radioativa. ....	37
Figura 23 - Tela do software durante uma leitura de perfil da sonda SWDS®, onde as cores das linhas representam os seguintes parâmetros – (1) linha azul corresponde ao registro da profundidade; (2) linha preta corresponde ao comportamento da parede do poço; (3) linha vermelha, representando o registro da densidade das camadas. ....	38
Figura 24 - trecho de uma coluna estratigráfica correspondente à recuperação de um furo da Área B3. ....	40
Figura 25 – Preparação de um dos meios densos contendo água e $\text{CHBr}_3$ . ....	42
Figura 26 – Despejo de uma das misturas em uma das cubas. ....	42
Figura 27 - Coleta do material flutuante. ....	43
Figura 28 - Material afundado sendo disposto para a secagem. ....	43
Figura 29 - Perfil geofísico em formato de texto usando uma escala de 1 cm. ....	45
Figura 30 - Exemplo de trecho do furo B3-03 no software Wellcad™, mostrando os registros de profundidade, sensores contidos na sonda geofísica e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem e análise laboratorial. ...	46
Figura 31 - Exemplo do uso da ferramenta <i>Statistic Bar</i> em uma das camadas do furo B3-18. ....	48
Figura 32 - Trecho hipotético de um perfil litológico, onde tem-se duas camadas de carvão e uma camada de estéril entre elas, onde: Camada A tem densidade dentro do limite estabelecido, mas espessura menor que o limite; B é uma camada de material estéril, tal como um siltito e C é uma camada carbonífera que se enquadra nos parâmetros estabelecidos. ....	53

Figura 33 - Perfil hipotético de uma camada de carvão A, que possui uma espessura total de 1.20 m, porém 20 centímetros dessa camada são compostos por intercalações de siltito. ....	54
Figura 34 - Furo B3-03 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (LSD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem. ....	57
Figura 35 - Furo B3-12 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (LSD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem. ....	58
Figura 36 - Furo B3-13 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, gama natural, diâmetro do furo, registro de densidade (LSD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem. ....	59
Figura 37 - Furo B3-18 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (LSD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem. ....	60
Figura 38 – Histograma de diferenças relativas de espessura em porcentagem quando comparados os dados geológicos aos dados gama-gama via sensor LSD. ....	67
Figura 39 – Histogramas de diferenças relativas de densidade em porcentagem quando comparados os dados geológicos aos dados gama-gama via sensor LSD. ....	68
Figura 40 – Gráfico de dispersão comparando dados geológicos e dados obtidos via método gama-gama via sensor LSD, para espessura. ....	69
Figura 41 - Furo B3-03 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (sensores LSD e HRD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem. ....	70
Figura 42 - Furo B3-12 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (sensores LSD e HRD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem. ....	72
Figura 43 - Furo B3-13 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (sensores LSD e HRD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem. ....	73

Figura 44 - Furo B3-18 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (sensores LSD e HRD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem. ....	75
Figura 45 – Histograma das diferenças de espessura quando comparados as diferenças entre os dados geológicos aos dados gama-gama via sensor HRD. ....	79
Figura 46 – Histograma das diferenças de densidade quando comparados as diferenças entre os dados geológicos aos dados gama-gama via sensor HRD. ....	80
Figura 46 – Gráficos de dispersão comparando dados geológicos e dados obtidos via método gama-gama via sensor HRD, para espessura.....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação usada para a qualidade de carvão expedita de acordo com a Anon (1993).....	5
Tabela 2 - Valores de alguns parâmetros geofísicos para diferentes tipos de carvão, onde deve-se atentar principalmente para a coluna densidade. ....	47
Tabela 3 - Tabela comparativa entre os dados provenientes da descrição litológica e os dados adquiridos através do método gama-gama via sensor LSD. ....	63
Tabela 4 – Tabela com os valores de coeficiente de espalhamento de quartis para as a diferença relativa de espessura e densidade entre <i>hard data</i> e <i>soft data</i> via sensor LSD. ....	68
Tabela 5 - Tabela comparativa entre os dados provenientes da descrição litológica e os dados adquiridos através do método gama-gama via sensor HRD.....	76
Tabela 6 – Tabela com os valores de coeficiente de espalhamento de quartis para as diferenças entre espessura e densidade entre <i>hard data</i> e <i>soft data</i> via sensor HRD. ....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS

CPS - contagens por segundo

PVC - policloreto de vinil

NW - noroeste

m - metros

g/cm<sup>3</sup> - gramas por centímetro cúbico

## LISTA DE SIGLAS

Anon - *Standards Association of Australia*

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

SWDS® - *Sidewall Density Sonde*

LSD – *Long-Spaced Density*

HRD - *High Resolution Density*

BR - Brilhante (vitrênio > 90%)

BB - Brilhante com bandas foscas (ente 60% e 90% de vitrênio)

BD - Intercalações de bandas brilhantes e foscas (entre 40% a 60% de vitrênio)

DB - Predominância de material fosco com bandas brilhantes (entre 10% e 40% de vitrênio)

DM - Fosco com poucas bandas brilhantes (entre 1% e 10% de vitrênio)

DD - Fosco (vitrênio <1%)

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivos Gerais.....	3
2.2 Objetivos Específicos .....	3
3 CONCEITOS GERAIS .....	3
3.1 Origem dos depósitos carboníferos e classificações de carvão .....	3
3.2 Perfilagem Geofísica .....	6
3.3 Determinação da Densidade ( $\rho$ ) de Carvão em Laboratório - Método Afunda-Flutua .....	24
3.4 Revisão da Literatura .....	25
4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .....	28
5 GEOLOGIA REGIONAL .....	29
6 GEOLOGIA LOCAL .....	30
7 MATERAIS E MÉTODOS .....	34
7.1 Etapa de Campo – Sondagem com Recuperação de Testemunho .....	34
7.2 Tratamento de Dados.....	39
8 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	52
8.1 Sensor Long-Spaced Density (LSD) .....	55
8.2 Sensor High Resolution Density (HRD).....	69
8.3 Comparações entre os perfis usando os sensores LSD e HRD.....	81
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
REFERÊNCIAS .....	85

## 1 INTRODUÇÃO

A avaliação de um depósito mineral é um processo empregado de forma contínua, que tem início nas etapas exploratórias e segue até o fim da vida útil de uma mina. As técnicas de avaliação começam quando se é instituída uma campanha de sondagem, onde é definida uma malha de amostragem e a quantidade de furos a serem realizados a fim de se obter a recuperação dos testemunhos, para posterior descrição e análise dos mesmos. A campanha tem como objetivo a coleta de amostras para análises laboratoriais de forma a verificar a qualidade do minério, a determinação do local onde estão os recursos, o tamanho e a geometria do corpo de minério, dentre outros fatores. Os custos de uma campanha de amostragem dependem de diversas variáveis, dentre elas o método empregado e o tamanho da malha estabelecida.

A sondagem rotativa é um método confiável e indispensável durante o processo de avaliação e exploração de um depósito, no entanto, possui algumas desvantagens, tais como: (1) a demora e o elevado custo, o que impossibilita que seja realizada uma malha de sondagem tão adensada a ponto de se obter a geometria real do corpo de minério através de dados materiais (*hard data*); (2) a depender das litologias das rochas investigadas e suas propriedades mecânicas, os furos podem ter baixa recuperação, ou seja, não se consegue recuperar todo o material durante a perfuração. Devido a estes e outros obstáculos, em qualquer campanha de avaliação mineral, a equipe técnica envolvida utiliza além dos métodos diretos de amostragem, também métodos indiretos de investigação (Webber, 2008).

Em depósitos de carvão, onde a rocha apresenta-se bastante friável, um dos métodos indiretos mais empregados é a perfilagem geofísica aplicada em furos de sondagem. Este método tem sido utilizado devido à sua versatilidade, baixo custo e facilidade de manuseio dos equipamentos envolvidos, além de fornecer respostas praticamente imediatas quando executado. Ademais, a técnica permite a identificação de litologias, das correlações estratigráficas e a determinação de propriedades das rochas e estratos de interesse, como: espessura, porosidade, permeabilidade e densidade (Binzhong & Graham, 2016). A técnica consiste na descida de uma sonda até o fundo de um poço escavado, para a obtenção da medida de profundidade do mesmo. Após, a sonda é içada por meio do acionamento de um guincho e durante a subida ao longo do poço, um ou mais parâmetros de interesse são registrados e os

dados adquiridos no processo são armazenados em um computador para posterior análise e tratamento estatístico (Gasper, 2012).

Também deve-se considerar que o carvão é uma rocha friável o que implica na não recuperação do testemunho de sondagem em muitos casos, o que por consequência pode prejudicar a utilização dos dados materiais para o processo de estimativa da qualidade, tonelagem e espessura de camadas do minério. Surge então, a perfilagem gama-gama como alternativa, pois permite a obtenção de um maior número de informações relacionadas à densidade e espessura dos estratos carboníferos, conforme observado nos trabalhos de Webber *et al.* (2009), Gorelik (2014) e Zhou & Brien (2016).

É usual pensar que a perfilagem geofísica, por tratar-se de um método indireto, fornece menor precisão quando comparada à sondagem com recuperação de testemunhos na exploração e avaliação de depósitos minerais. Partindo deste contexto, esse trabalho visa comparar os dados de densidade e espessura de camadas de carvão adquiridos através do método de perfilagem gama-gama (também chamado de perfilagem geofísica de densidade, perfilagem geofísica nuclear ativa ou perfilagem de retroespalhamento) com aqueles obtidos através de furos de sondagem com recuperação de testemunho, a fim de avaliar a acuracidade do método geofísico em identificar as espessuras e densidades das camadas de carvão e sua capacidade em diferenciar essas camadas de outros estratos (estéril).

Trabalhos tais como, Webber (2008), Gasper (2012) e Gorelik (2014) usam de diversos métodos geofísicos de perfilagem, incluindo o próprio gama-gama em comparativo com os dados físicos do depósito carbonífero também estudado neste trabalho, de forma a aplicar técnicas de geoestatística afim de determinar espessura, densidade e conteúdo de cinzas, no entanto, nenhum destes contempla a correlação estrita entre a perfilagem de densidade e os dados físicos, bem como a acuracidade deste método geofísico de forma isolada.

Tanto os dados de perfilagem gama-gama, quanto os dados físicos analisados neste trabalho, correspondem a 4 poços localizados em uma das áreas carboníferas da Copelmi Mineração Ltda.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

O presente trabalho tem como objetivo geral, avaliar o uso da perfilagem gama-gama como um método alternativo para a obtenção de informações relevantes em termos de densidade e espessura de camadas de carvão.

### **2.2 Objetivos Específicos**

A dissertação tem como objetivos específicos:

- verificar a eficácia da perfilagem geofísica gama-gama na discriminação de estratos carbonosos, em relação às demais litologias existentes na área de interesse;
- analisar as representações gráficas da perfilagem gama-gama da área de estudo tanto via sensor *Long Spaced Density* (LSD), quanto via sensor *High Resolution Density* (HRD), a fim de verificar se as espessuras e densidades das camadas de carvão obtidas através daqueles sensores podem ser comparadas aos dados físicos de espessura e densidade obtidos através da recuperação e análise dos testemunhos de sondagem.

## **3 CONCEITOS GERAIS**

Neste item serão abordados, de forma concisa, a origem e classificação dos depósitos carboníferos bem como o histórico da perfilagem geofísica e suas principais propriedades.

### **3.1 Origem dos depósitos carboníferos e classificações de carvão**

Segundo o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2014), o carvão mineral é a nomeação dada a um grupo de rochas utilizadas como fonte de energia. Estas rochas foram originadas através da deposição de restos vegetais (material lenhoso, celulose, algas etc.) em águas rasas em um ambiente anaeróbico, seguido por sua parcial decomposição por meio de bactérias. Posteriormente, ao longo do tempo geológico, esse material sofreu a influência de pressão e calor, devido à deposição de outras

camadas de materiais acima (pressão litostática). Ainda segundo sua origem, os depósitos carboníferos podem ser de dois tipos: (1) carvões sapropélicos, formados a partir da deposição e soterramento de algas marinhas; (2) carvões húmicos, aqueles originados a partir de material vegetal existente no continente. O depósito carbonífero estudado nesta dissertação, bem como os outros existentes no sul do Brasil, são do tipo húmico.

### 3.1.1 Composição e Classificação dos Carvões

Existem duas principais classificações de carvão relacionadas à sua composição, a primeira vinculada ao teor de carbono (classificação química) e a segunda é uma classificação, de acordo com o teor de vitrênio, seguindo o padrão da *Standards Association of Australia* (Anon, 1993).

De acordo com a classificação química, em ordem, os carvões mais pobres até os mais ricos em carbono são: turfa, linhito, hulha (ou carvão betuminoso) e antracito. Essa série do carvão, nada mais é do que a evolução do processo de transformação do material vegetal em carvão. Quanto maior é a solidificação da matéria orgânica original, maior foi sua evolução e, portanto, maior é seu conteúdo de carbono, essa evolução na série do carvão é comumente chamada de *rank*. Carvões com baixo *rank* apresentam um maior conteúdo de água, enquanto carvões com alto *rank*, como o antracito possuem baixo conteúdo de água, o que atribui maior poder calorífico. Além disso, os carvões também são classificados de acordo com seu *grade*, que é a relação entre a matéria orgânica e inorgânica encontrada em uma camada de carvão. Outro fator relacionado à sua qualidade, é o conteúdo de cinzas, ou seja, o conteúdo de impurezas encontradas em carvões, estas que podem ser sílica, alumina, óxidos de ferro e enxofre (CPRM, 2014).

Além do *rank*, *grade* e do conteúdo de cinzas, outra propriedade fundamental nos carvões é o poder calorífico, que é a quantidade de energia por unidade de massa (ou de volume, no caso dos gases) liberada na oxidação de um determinado combustível. O poder calorífico em linhito e turfas é inferior a 4000 kcal (quilocalorias), enquanto os demais carvões possuem poder calorífico entre 7000 e 8650 kcal (CPRM, 2014).

### 3.1.2 Composição Petrológica dos Carvões

Em relação aos aspectos petrológicos do carvão, este é considerado uma rocha sedimentar de origem orgânica. De forma resumida, tais como as demais rochas, o carvão possui características petrológicas que podem ser estudadas em nível macro e microscópico, a fim de classificar a qualidade deste bem mineral.

#### 3.1.2.1 Litotipos

Os litotipos identificáveis macroscopicamente (por definição com espessura mínima de 1cm) são vitrênio, clarênio, durênio e fusênio, que se alternam na forma de lâminas em uma camada de carvão (CPRM, 2014). Além de poder se realizar a análise expedita dos litotipos em campo, estes refletem o tipo de contribuição da matéria e as variações químicas e físicas sofridas na época da acumulação em turfeiras.

O conteúdo de vitrênio é também um dos parâmetros adotados para classificação expedita de carvão. Na Tabela 1 é apresentada a classificação do carvão conforme o padrão utilizado pela Anon (1993), e que será aplicado neste trabalho, onde nota-se que quanto maior o conteúdo de vitrênio existente em uma amostra/testemunho de carvão, menor será seu conteúdo de cinzas e maior será seu poder calorífico, portanto, melhor será a qualidade do carvão e por consequência maior o valor econômico agregado ao mineral (Webber, 2012).

Tabela 1 – Classificação usada para a qualidade de carvão expedita de acordo com a Anon (1993).

Classificação	Descrição
BR	Brilhante (vitrênio > 90 %)
BB	Brilhante com bandas foscas (entre 60 % e 90 % de vitrênio)
BD	Intercalações de bandas brilhantes e foscas (entre 40 % a 60 % de vitrênio)
DB	Predominância de material fosco com bandas brilhantes (entre 10 % e 40 % de vitrênio)
DM	Fosco com poucas bandas brilhantes (entre 1 % e 10 % de vitrênio)
DD	Fosco (vitrênio < 1 %)

Fonte: Webber (2012).

### **3.1.2.2 Macerais**

A nível microscópico nos carvões, são observados os macerais, que são constituídos por uma mistura de compostos orgânicos. Analogamente, os macerais podem ser comparados aos minerais que compõem as rochas inorgânicas (Levandowski, 2009).

São três os grupos de macerais, segundo a classificação de *International Committee for Coal and Organic Petrology* (1971): (1) a vitrinita, que é resultado da carbonificação de substâncias húmicas; (2) a liptinita que é composta essencialmente por remanescentes de plantas ricas em hidrogênio tais como resinas e ceras; (3) a inertinita, relativamente inerte a queima e derivado das mesmas substâncias que compõem a vitrinita, porém que foram submetidos a um processo de oxidação antes da deposição em pântanos (Levandowski, 2009).

## **3.2 Perfilagem Geofísica**

Neste tópico serão contemplados os conceitos básicos e aplicação, funcionamento e princípios da técnica de perfilagem gama-gama.

### **3.2.1 Histórico da Perfilagem Geofísica**

A evolução do método de Perfilagem Geofísica desenvolveu-se paralelamente à própria Geofísica como um ramo da Geociências. O método foi concebido em meados da década de 20, pelos irmãos Schlumberger, estes que anos antes aplicavam o método de resistividade elétrica em superfície, decidiram que, para se obter mais informações a respeito de formações rochosas mais profundas, era de extremo interesse utilizar uma sonda elétrica em poços previamente perfurados.

A primeira tentativa de perfilagem geofísica através de uma sonda elétrica, data de 5 de setembro de 1927, quando uma equipe liderada pelo físico Henri Doll começou a realizar medições em diversas profundidades ao longo de um poço de 500 metros localizado em Pechelbronn, na França, assim foi criado o perfil de resistividade. As informações obtidas nesse ensaio eram simples, no entanto foram um ponto de virada para a exploração geofísica nos anos seguintes. O método de perfilagem geofísica

elétrica começou a ser amplamente utilizado na exploração de reservas de petróleo e em 1929, o método já estava sendo aplicado em diversos locais ao redor do mundo, como na antiga União Soviética, Estados Unidos e Venezuela (Schlumberger Enterprise, 2022).

No entanto, foi somente a partir da década de 60 que a técnica de perfilagem geofísica começou a ser utilizada em depósitos de carvão, através do método de resistividade. Este método fornecia excelentes leituras quando o depósito de carvão era caracterizado pela intercalação entre o minério e camadas de estéril constituídas por argila, pois o carvão possui baixa resistividade se comparada a este tipo de estéril. No entanto, em depósitos nos quais as camadas de carvão encontram-se intercaladas com arenitos e/ou conglomerados e com baixo conteúdo de estéril em argila, a distinção e a visualização dos estratos carboníferos ao longo do perfil geofísico tornava-se complexa.

A partir desta problemática, novos tipos de sondas de perfilagem começaram a ser desenvolvidas. Em um primeiro momento, a perfilagem começou a ser realizada por meio do método gama natural, no entanto, também observou-se que a técnica possuía algumas limitações em distinguir carvão de estéril, o que fez com que fossem desenvolvidas outras metodologias (Schlumberger Enterprise, 2022).

Após, o método gama-gama, que possui uma fonte radioativa junto à sonda e que capta a radiação retroespalhada pelo meio, foi concebido. Nesta técnica, observou-se que a contagem da radiação que voltava ao sensor era proporcional à densidade dos materiais e que este parâmetro tem alta correlação com o conteúdo de cinzas e o poder calorífico do carvão. Ou seja, quanto menor a densidade de uma camada de carvão, maior seu poder calorífico e por consequência, menor seu conteúdo de cinzas. Ademais, o método mostrou-se extremamente eficaz em distinguir as camadas de estéril das de minério, bem como na determinação de suas espessuras (Borsaru *et al.*, 1985).

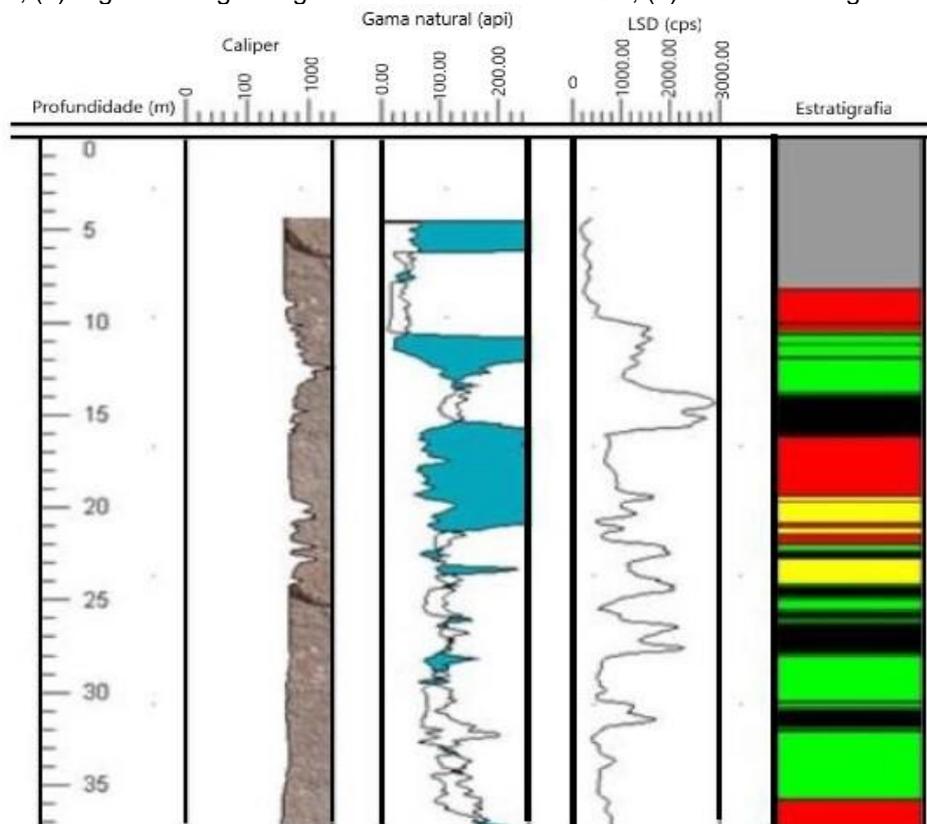
Apesar da técnica gama-gama fornecer excelentes resultados (Borsaru & Ceravolo, 1994; Borsaru *et al.*, 2001; Borsaru, 2005; Borsaru & Asfahania, 2007), tanto em depósitos de carvão, quanto metalíferos e de petróleo e gás, existe uma limitação crucial na utilização da técnica, que é o uso da fonte radioativa. De acordo com Gasper (2012), acidentes quando a fonte radioativa fica presa ao furo podem causar impactos tanto ao meio ambiente, quanto à saúde humana. Vários países têm restrições

rigorosas em relação ao uso da técnica, sendo o Brasil um destes. Para realizar a aplicação em campo do método no Brasil é necessário obter-se autorização (credenciamento) junto à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

### 3.2.2 Fundamentos da Perfilagem Geofísica

Independentemente da técnica aplicada, o perfil de um furo de sondagem tem seu registro geralmente representado de maneira gráfica ou textual, onde estão contidas as informações sobre características e/ou propriedades das litologias que o compõem. Na Figura 1, observa-se a representação gráfica de um perfil geofísico genérico, onde podem ser analisados os seguintes parâmetros: profundidade do perfil, registro *Caliper*, registro gama natural, registro em gama-gama via sensor LSD e coluna estratigráfica.

Figura - 1 - Exemplo de representação gráfica de um perfil geofísico de poço. Da esquerda para direita são observados os seguintes parâmetros: (1) profundidade em metros; (2) registro *Caliper*; (3) registro gama natural; (4) registro em gama-gama através da sonda LSD; (5) coluna estratigráfica.



Fonte: autora.

A perfilagem geofísica é um método indireto utilizado em diversas etapas da pesquisa mineral, tanto nas fases de exploração e avaliação de recursos, quanto na projeção dos avanços, quando a mina já está em fase operacional.

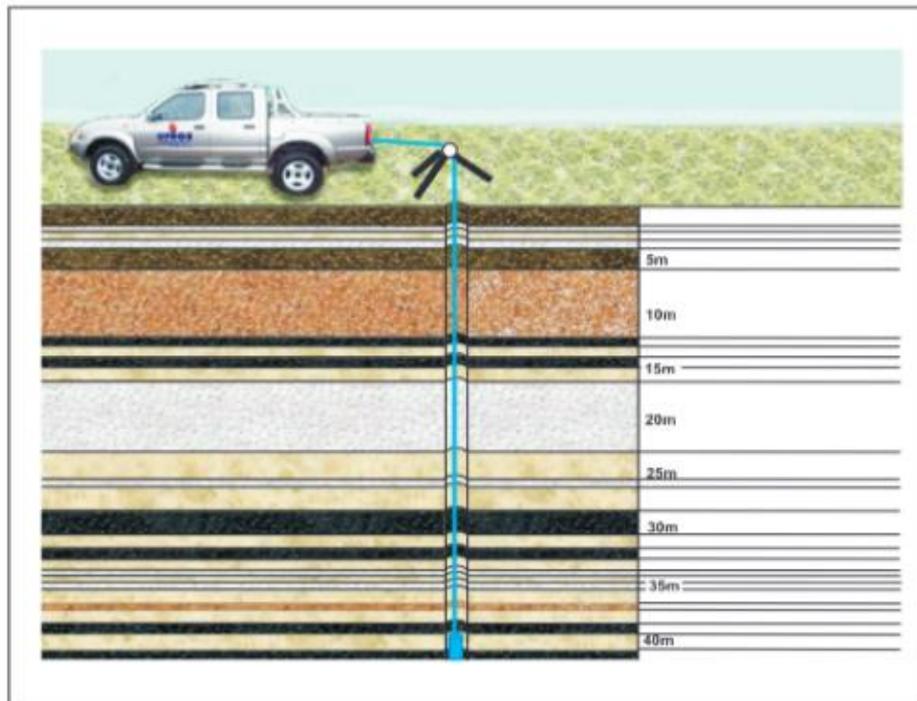
A perfilagem geofísica tem como intuito obter o maior número de informações acerca de um perfil de furo/poço, utilizando assim, múltiplos tipos de sensores que percorrem os poços medindo diferentes parâmetros de interesse.

A aquisição e o registro dos parâmetros desejados pela perfilagem geofísica ocorrem durante a movimentação das sondas ao longo do furo de sondagem. O processo de aquisição de dados é visualmente simples, porém necessita de diversos cuidados, já que a escolha de um método específico de perfilagem em detrimento de outros, será baseado não só nas características litológicas ao qual se deseja obter informações, mas também nas características do poço de sondagem em si, se este é revestido ou não e qual o tipo de revestimento (PVC ou aço, por exemplo), afinal, a depender do método escolhido e do tipo de revestimento do poço, o método pode fornecer um registro errôneo acerca dos parâmetros desejados.

A coleta de dados em campo é constituída basicamente por duas etapas: em um primeiro momento a sonda desce até o fundo do poço de sondagem, de forma a verificar a integridade do furo e sua profundidade; e após, a sonda é içada até a superfície a uma determinada velocidade, capturando ao longo desse trajeto, o registro dos parâmetros referentes ao sensor utilizado. Os dados são, ao mesmo tempo que a sonda está sendo içada, transferidos e armazenados por um computador (Figura 2).

As sondas geofísicas são constituídas por hastes de metal, cujo comprimento pode variar de (1) um, até dezenas de metros, a depender da profundidade dos furos a serem perfilados. Essas sondas podem ser desenvolvidas para o registro de apenas um ou mais parâmetros e/ou podem permitir a conexão de diversas sondas entre si, o que tende a facilitar o registro e a aquisição de diversos parâmetros de forma simultânea nos furos (Gorelik, 2014).

Figura 2 - Ilustração da execução da perfilagem geofísica em um furo de sondagem.

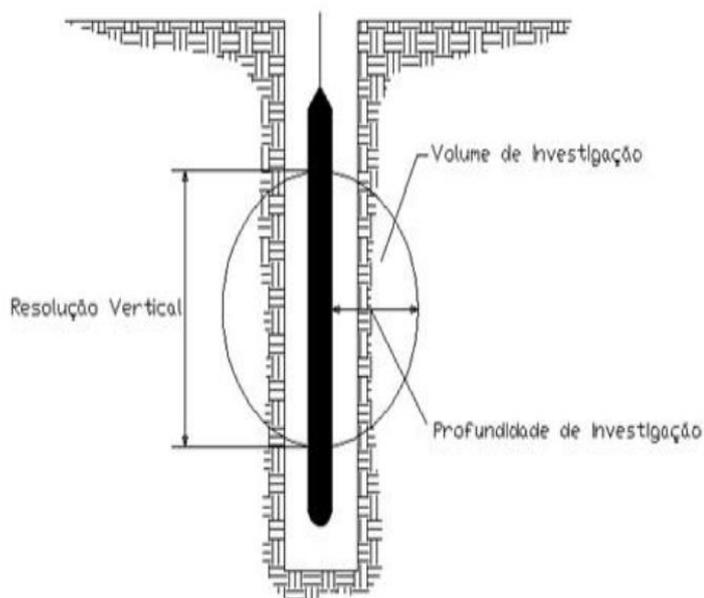


Fonte: Webber *et al.*, (2009).

### 3.2.3 Conceitos Básicos da Perfilagem Geofísica

O desenvolvimento de sondas para a perfilagem geofísica leva em consideração uma gama de parâmetros de interesse a serem investigados, sendo os mais relevantes: o volume de investigação, a resolução vertical, profundidade de investigação, efeito do poço e colimação (Figura 3 e 5). Esses parâmetros estão conectados entre si, já que a mudança no valor de um pode afetar os outros e seu conhecimento prévio é de extrema necessidade não só para a fabricação de sondas, mas também durante o processo de perfilagem e aquisição de dados.

Figura 3 - Representação esquemática dos três principais parâmetros de investigação na perfilagem geofísica.



Fonte: Oliveira (2005).

### 3.2.3.1 Volume de Investigação

Segundo (Hoffman *et al.*, 1982), essa propriedade corresponde a um volume hipotético, no qual todo material contido é levado em consideração quando a sonda e/ou as sondas efetuam a medida dos parâmetros. O formato do volume de investigação pode ser esférico, elipsoidal, em formato de disco ou cone.

O que define o volume de investigação é a forma como a sonda foi desenvolvida e para que tipo de situação ela foi criada. Por exemplo, para realizar a aquisição de dados de litologias que são perpendicularmente distantes das paredes do poço, deve-se utilizar uma sonda com volume de investigação grande. Já, caso o objetivo seja apenas obter informações relacionadas às rochas mais próximas da sonda ou adquirir dados relacionados ao revestimento do poço, como sua integridade, zonas de infiltração e estruturas de falha, o volume de investigação pode ser pequeno.

### 3.2.3.2 Profundidade de Investigação

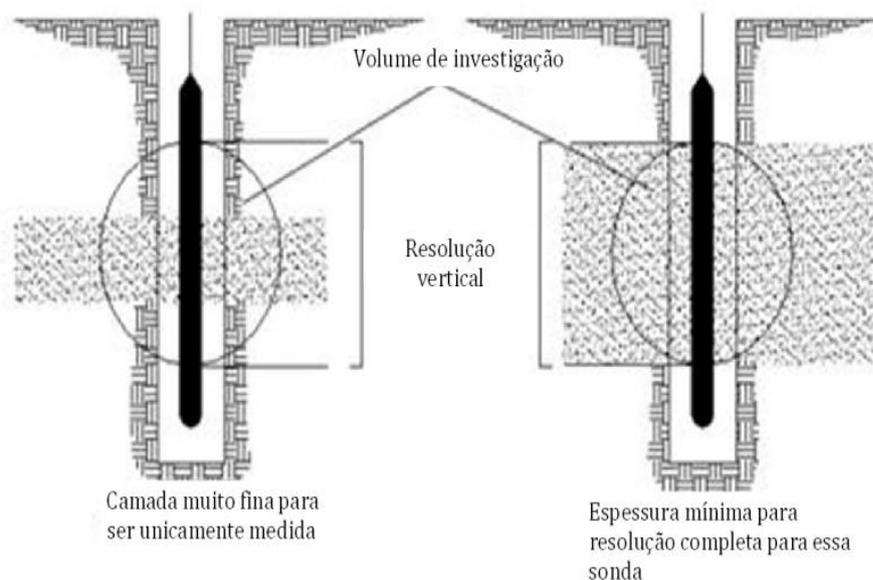
A profundidade, ou o raio de investigação, nada mais é do que a profundidade máxima alcançada pelo volume de investigação, perpendicularmente ao eixo do poço. No caso de um volume de investigação esférico, a profundidade de investigação será

igual ao raio do mesmo. Com o aumento da profundidade de investigação, os parâmetros medidos serão referentes ao material mais afastado perpendicularmente da sonda e, também, por consequência, maior será o volume de investigação.

### 3.2.3.3 Resolução Vertical

Segundo (Hoffman *et al.*, 1982) a resolução vertical é a dimensão mínima com que a sonda consegue registrar características relacionadas a um determinado tipo de rocha. A leitura do sensor é composta pelo valor médio do parâmetro de interesse que está sendo investigado nas formações rochosas presentes dentro de uma determinada área de resolução vertical. Ou seja, a resolução é a capacidade de uma sonda de medir um determinado parâmetro relacionado à apenas uma única camada de rocha, ao invés de uma média das camadas em seu redor (Figura 4). Sondas que possuem eficácia em medir camadas rochosas finas, são denominadas de sondas de alta resolução.

Figura 4 - Exemplo de resolução vertical em uma sonda com volume de investigação esférico.



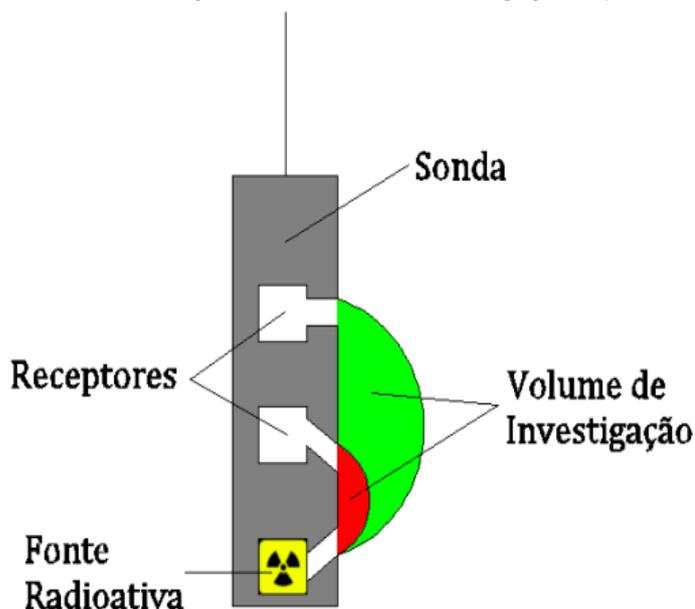
Fonte: Webber (2008).

### 3.2.3.4 Colimação

A colimação é um conceito atrelado a sondas de perfilagem geofísica nuclear, como a utilizada na aquisição dos dados para esta dissertação.

Segundo (Hoffman *et al.*, 1982), a colimação é uma ferramenta existente na sonda responsável por direcionar o fluxo de feixe radioativo para um local específico nas formações rochosas perfiladas. Diferentes colimações exercem alterações diretas nos conceitos anteriormente descritos. Por exemplo, a Figura 5 mostra como diferentes colimações influenciam a forma do volume de investigação e o alcance da profundidade de investigação. Ainda, na Figura 5 é possível observar a interação entre a colimação derivada de uma fonte radioativa que serve para emitir um feixe radioativo na direção das formações e a colimação do receptor mais próximo da fonte, que tem como função medir o resultado proveniente da interação entre a radiação da fonte e as formações rochosas de interesse. Dessa forma, o formato do volume de investigação é elipsoidal, já a colimação do receptor mais afastado da fonte gerou um volume de investigação mais próximo do formato esférico.

Figura 5 - Efeito de diferentes colimações no volume de investigação e profundidade de investigação.



Fonte: Webber (2008).

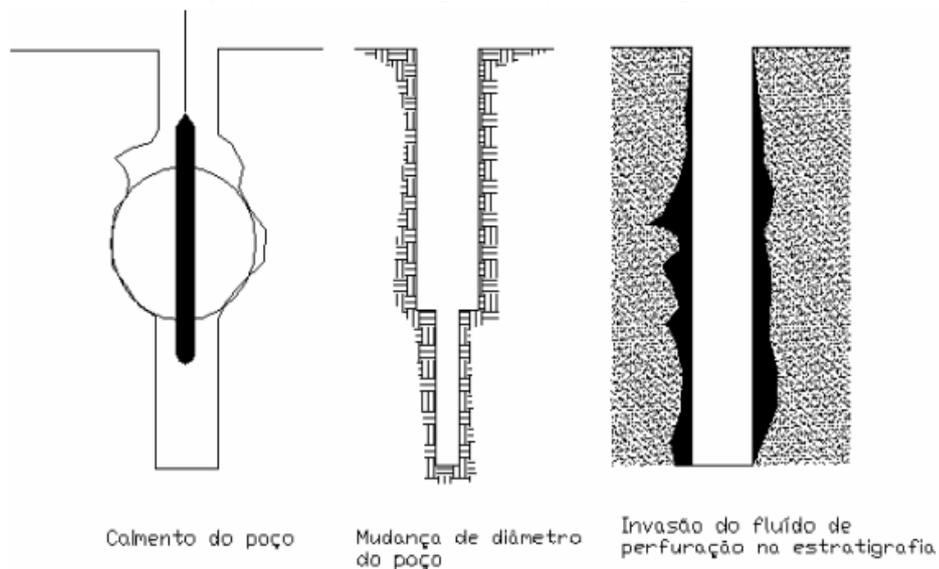
### 3.2.3.5 Efeito do Poço

Para a obtenção de uma medida representativa acerca do parâmetro de interesse, além do equipamento de perfilagem geofísica estar adequadamente calibrado e em boas condições de uso, o furo de perfilagem também deve apresentar condições favoráveis para a aplicação do método, já que problemas estruturais nas

paredes poço podem ocasionar danos ao equipamento utilizado e inviabilizar a medida do parâmetro de interesse. Além disso, a verificação da integridade do poço deve ser realizada de forma a avaliar se não existem feições na parede que possam inviabilizar uma coleta de dados confiável, tais como caimentos, formação de cavernas nas paredes e mudança no diâmetro do poço (Webber, 2008), como é exemplificado através da Figura 6.

Ademais, a penetração de fluido de perfuração nos vazios das paredes do poço pode gerar leituras errôneas em relação aos parâmetros de interesse, já que a infiltração de água pode alterar as propriedades físico-químicas das litologias perfiladas (Oliveira, 2005).

Figura 6 - Três efeitos de poço que alteram o registro do parâmetro geofísico de interesse.



Fonte: Oliveira (2005).

### 3.2.4 Física Nuclear Básica para a Aplicação da Perfilagem Geofísica Gama-gama

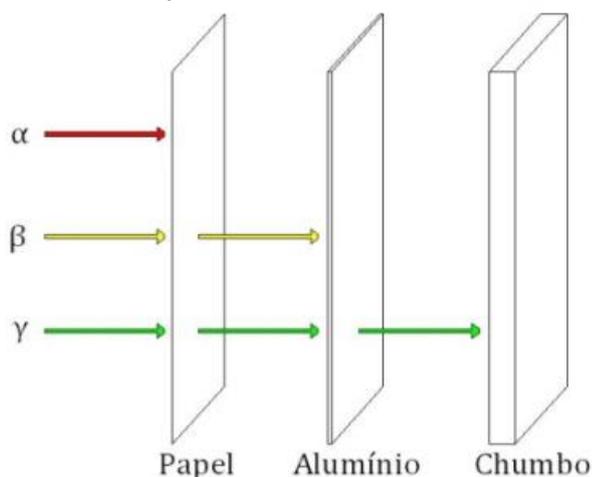
Neste item serão discutidos alguns aspectos básicos de física nuclear, para a melhor compreensão do método de perfilagem de densidade.

#### 3.2.4.1 Radiação Nuclear

Segundo Webber (2008), as primeiras investigações sobre materiais radioativos mostraram que existem três tipos de radiação ionizante, que nada mais são do que todo o tipo de radiação que tem energia o suficiente para arrancar os elétrons dos átomos. Essas radiações são nomeadas como: alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) e gama ( $\gamma$ ).

Esses três tipos de radiação consistem em partículas carregadas com energia emitida por uma determinada fonte e a partir disso, essas partículas interagem com os elétrons dos materiais envolvidos. No entanto, no que tange ao método de gama-gama, as radiações alfa e beta não são utilizadas, pois possuem pouco alcance de penetração em relação aos materiais do meio. No entanto, os raios gama tem como característica serem extremamente penetrantes e possuem um bom alcance. Na Figura 7 é ilustrada a capacidade dos três tipos de radiação ionizante de penetrar diferentes meios, com diferentes densidades, sendo que apenas a radiação gama consegue penetrar o material mais denso, no caso da imagem, o chumbo (Webber, 2008).

Figura 7 - Exemplo da capacidade das radiações ionizantes de penetrar diferentes materiais: em vermelho  $\alpha$ , em amarelo  $\beta$  e em verde,  $\gamma$ .



Fonte: Webber (2008).

### 3.2.4.2 Radiação Gama

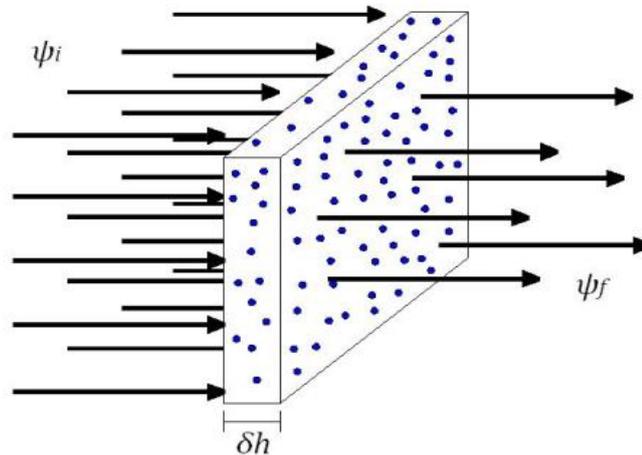
Radiação gama ou raios gama são ondas eletromagnéticas com frequências muito elevadas. A sua emissão pode ocorrer quando um núcleo instável absorve um dos elétrons que orbita o átomo ou quando um elétron orbitante muda de nível de energia, de um estado excitado para um menos excitado. Devido a suas altíssimas

frequências, os raios gama são considerados formados de partículas conhecidas como fótons.

### 3.2.4.3 Interação de Feixe Radioativo

Conforme ilustrado na Figura 8, um feixe de radiação gama com intensidade  $\Psi_i$  quando penetra em um material e posteriormente o atravessa, sai com uma intensidade  $\Psi_f$  (Webber, 2008).

Figura 8 - Radiação penetrando e posteriormente atravessando um determinado meio.



Fonte: Webber (2008).

Ainda, observando a Figura 8, define-se  $\Psi$  como a intensidade da radiação. Esse fluxo nada mais é do que a dimensão de radiação definida através do fluxo de partículas que transcorrem por uma unidade de área em uma determinada unidade de tempo. De forma a exemplificar essa situação, presume-se que um bloco de um determinado material é constituído por um determinado número de partículas por unidade de volume, representado aqui como,  $N_p$ , com o qual o feixe radioativo interage. Quando o fluxo de radiação penetra o bloco de espessura  $\delta h$  e o atravessa, uma porção das partículas que incidem no material, interagem com o meio. Sendo que a porção de partículas que sofreram interações são condicionadas em função da espessura do bloco, número de núcleos e fluxo incidente. Isso pode ser expresso através da seguinte Equação 1:

$$\delta\psi = \Psi_i - \Psi_f = \delta \cdot \psi \cdot N_p \cdot \delta h$$

Equação (1)

onde  $\delta$  é uma constante de proporcionalidade chamada de *cross section*. A *cross section*, representa a área aparente que cada núcleo apresenta para o fluxo incidente. A unidade prática do *cross section* é chamada de *barn* e é definida como  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>.

A *cross section* macroscópica,  $\Sigma$ , é o produto entre  $\delta$  e  $N_p$  e sua dimensão é o inverso da distância. Partindo de  $\delta$ ,  $\Sigma$  pode ser facilmente calculada, pois  $N_p$  (Equação 2) é relacionado ao número de Avogadro,  $N_{AV}$ , e à densidade do material  $\rho_b$  pela da Equação 2 (Ellis & Singer, 2007):

$$N_p = \frac{N_{AV}}{M} \cdot \rho_b \quad \text{Equação (2)}$$

onde,  $M$  é o peso molecular do material para uma partícula de molécula.

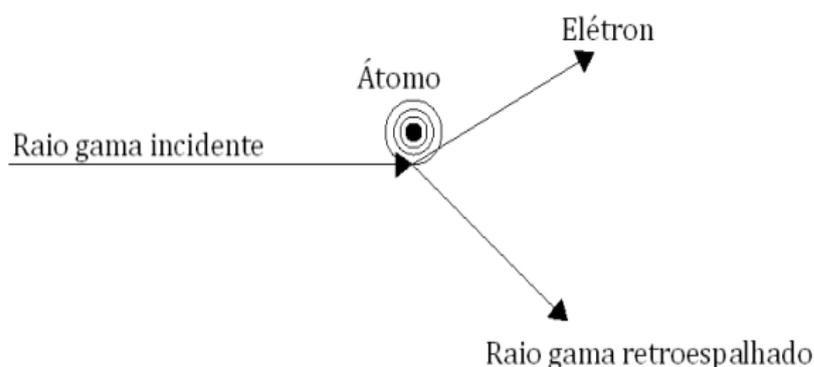
#### **3.2.4.4 Interação dos Raios Gama com o Meio – Espalhamento de Compton**

Existem três formas de interação dos raios gama com o meio: efeito fotoelétrico, produção de pares e Espalhamento de Compton. No entanto, o tipo de interação que rege o método de perfilagem gama-gama é o de Espalhamento.

O Espalhamento de Compton ou Efeito Compton resume-se a um tipo de interação onde, em qualquer direção de observação que não seja a do feixe de raios gama incidente, o espectro de raios espalhados irá gerar duas ondas com comprimentos distintos: uma onda de comprimento igual ao dos raios incidentes e uma segunda, com um comprimento maior. Sendo que, a diferença de comprimento entre as duas dependerá diretamente do aumento do ângulo de espalhamento (Halliday & Resnick, 2012).

Conforme Hoffman *et al.* (1982), no caso da radiação gama, essa incidirá sobre um objeto com átomos de massa  $A$  e gerará dois tipos de interações. Uma será o espalhamento através de um elétron de energia desprezível e a outra interação resultará no retroespalhamento dos raios gama (Figura 9).

Figura 9 – Representação esquemática do Espalhamento de Compton.



Fonte: Webber (2008).

### 3.2.5 Perfilagem Geofísica Nuclear

A perfilagem geofísica é um método indireto para obter-se informações petrofísicas utilizadas em exploração mineral. Nas aplicações relacionadas à coleta de dados de estratos carboníferos, os parâmetros usualmente medidos são a resistividade elétrica, a emissão de radiação gama natural, a velocidade sônica, a resposta à emissão de nêutrons e o retroespalhamento de radiação gama (também chamado de perfilagem de densidade ou gama-gama). Combinando informações destes parâmetros é possível diferenciar as camadas de carvão das litologias adjacentes normalmente associadas a ele, tal como siltitos e arenitos (Hofmann *et al.*, 1982; Kayal, 1979; Kayal & Christoffel, 1989).

Dentre os parâmetros anteriormente mencionados, provavelmente o mais importante para aplicações em carvão mineral, é o retroespalhamento gama obtido através da aplicação do método de perfilagem gama-gama, pois trata-se de um registro fortemente correlacionado com a massa específica (densidade) das litologias investigadas (Hearst *et al.*, 2000). Os demais métodos são frequentemente usados para determinar a posição dos contatos litológicos e assim estimar a espessura das camadas de carvão. No entanto, através do método de gama-gama também é possível identificar com uma boa precisão a espessura das camadas de carvão e de estéril através da diferença de densidade entre as litologias. O perfil de densidade é considerado um método geofísico nuclear ativo pois usa uma fonte auxiliar de radiação gama no processo de medida.

A perfilagem geofísica nuclear baseia-se no emprego de sondas nucleares na identificação de estratigrafias e litologias das rochas a serem pesquisadas e avaliadas para posterior decisão de explorar ou não estes recursos. A perfilagem nuclear pode ser subdividida em dois ramos: **(1)** a perfilagem passiva, ou gama-natural, que tem como princípio registrar através de detectores na sonda içada ao longo do poço, a radiação natural emanada pelas litologias ao longo do furo. O uso do perfil de gama natural é adequado para ambientes sedimentares e também para a avaliação de minerais radioativos, tais como tório e urânio; e **(2)** a perfilagem ativa, de densidade ou gama-gama, em que se utiliza uma fonte radioativa presa à sonda, a qual emana uma radiação que interage com as litologias existentes ao longo do furo. Apesar de ser um método que possui preocupações ambientais intrínsecas, devido às fontes radioativas envolvidas (por exemplo Césio-137) e situações que possam ocorrer durante a coleta de dados, como a embalagem transportadora da fonte ficar retida no furo, ainda é um método amplamente utilizado na indústria petrolífera e de minério de ferro, além de se mostrar eficaz na pesquisa e avaliação de depósitos carboníferos.

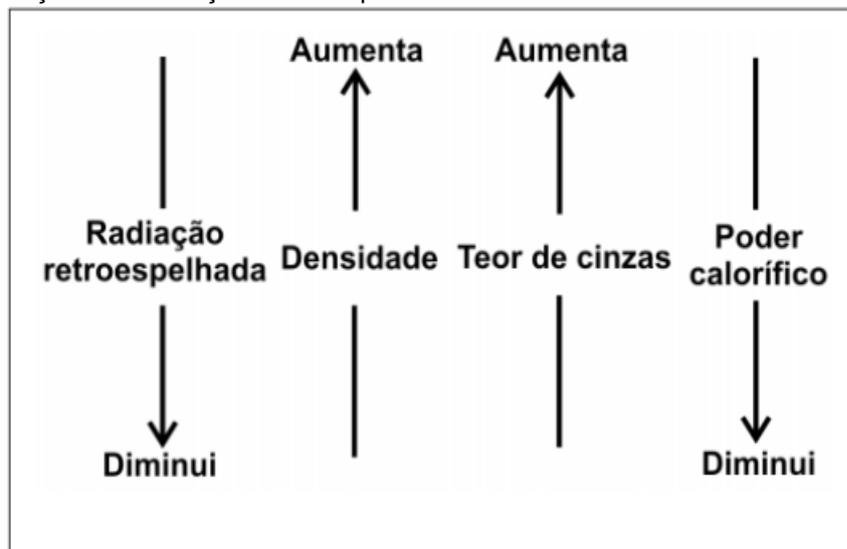
### **3.2.5.1 Princípio de Funcionamento da Perfilagem gama-gama**

O perfil de densidade, ou gama-gama, é um dos tipos de perfilagem geofísica ativa e quando aplicado em áreas onde há carvão, permite uma melhor visualização dos estratos existentes, bem como o dimensionamento da espessura das camadas. Nestes jazimentos, estratos de carvão estão frequentemente associados a estratos de outras rochas sedimentares e o carvão possui menor densidade, ou menor massa específica se comparado com as litologias com as quais encontra-se associado. Além disso, através do emprego da técnica de densidade, é possível se obter dados que são de grande valia para a indústria carbonífera, tais como: teor de cinzas e poder calorífico (Hoffman *et al.*, 1982; Webber, 2012; Gorelik 2014).

Quanto menor for a massa específica das camadas de carvão, menor seu teor de cinzas, logo, maior seu poder calorífico e quanto maior o poder calorífico deste material, conseqüentemente, maior será seu valor econômico associado (Webber *et al.*, 2012) (Figura 10). Nos ensaios gama-gama, percebe-se baixas leituras em locais de alta densidade e altas leituras em locais onde a densidade é baixa. Isso ocorre porque quanto menor for a densidade de uma camada de carvão, maior será a

radiação retroespalhada, ou seja, maior será a contagem por segundo da radiação recebida pelo receptor. De maneira inversa, quanto mais densa é uma camada de carvão, menor será a radiação retroespalhada e por consequência, menor será a radiação recebida pelo receptor.

Figura 10 - Ilustração da correlação entre os parâmetros de interesse.

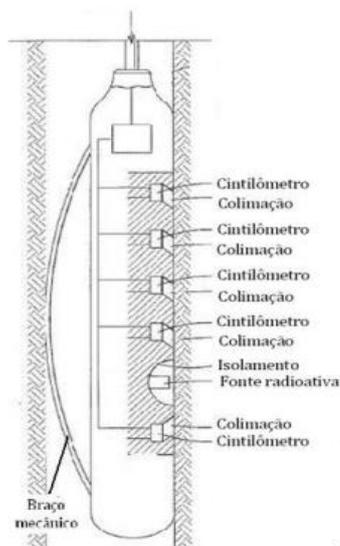


Fonte: extraído de Webber (2009) adaptado de (Hoffman et al., 1982).

A sonda de perfilagem gama-gama é constituída por dois importantes itens, que são: uma fonte radioativa, geralmente composta por sais de Césio 137 e cintilômetros. A fonte radioativa de Césio emite uma radiação gama com energia de 662 KeV.

O tipo de sonda atualmente comercializada é composto por uma fonte radioativa, cinco cintilômetros e um braço mecânico (Figura 11). O braço mecânico tem uma importante função no momento da coleta de dados, já que a radiação captada pelos cintilômetros deve interagir somente com as litologias na parede do furo, de forma que não haja nenhuma interação do material entre a sonda e a parede, tal como lama ou água. Dessa forma, o braço providencia esse contato pressionando a sonda contra a parede do furo (Hoffman *et al.*, 1982).

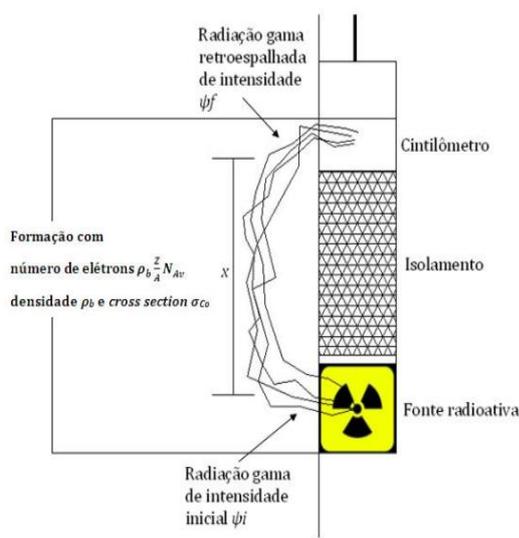
Figura 11 – Sonda composta de fonte radioativa, cinco cintilômetros e braço mecânico.



Fonte: extraído de Webber (2008) e adaptado de (Hoffman *et al.*, 1982).

De forma simplificada, os sensores utilizados são construídos com o intuito de captar a radiação gama retroespalhada e originada através da fonte de Césio, conforme o princípio do Espalhamento de Compton (Figuras 9 e 12). Logo, em litologias que apresentam baixa densidade, o receptor na sonda irá medir altas taxas de radiação retroespalhada. De forma contrária, em litologias onde a densidade eletrônica e natural é alta, o receptor irá informar baixas taxas de radiação gama retroespalhada.

Figura 12 - Imagem ilustrando o fenômeno de medida de radiação retroespalhada na perfilagem geofísica de densidade.

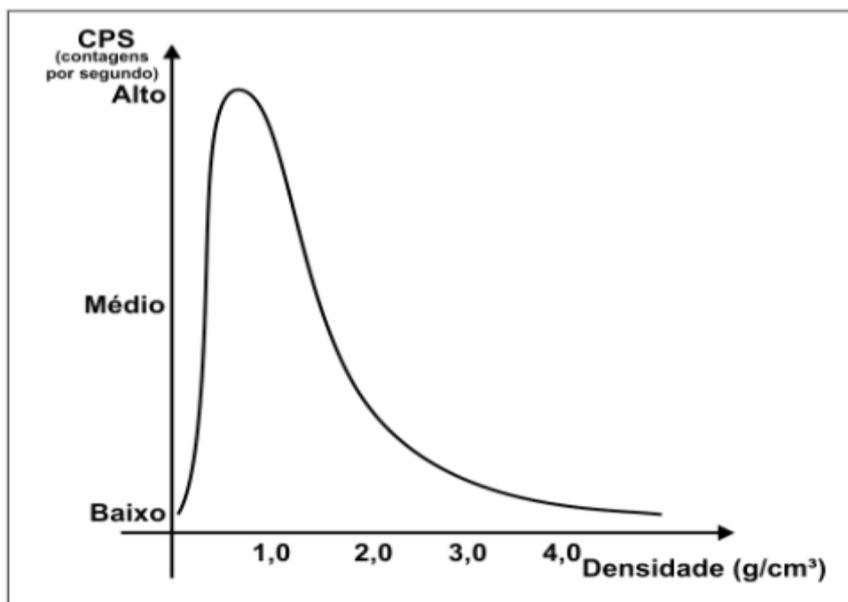


Fonte: extraído de Webber (2008) adaptado de (Hoffman *et al.*, 1982).

A Figura 13 mostra o gráfico da função de resposta da sonda de perfil de gama-gama para materiais de diversas densidades (Hoffman *et al.*, 1982). Quando observado o gráfico, é possível entender melhor o funcionamento do método. Por exemplo: em um primeiro momento, a taxa de radiação retroespalhada medida é nula, devido à ausência total de matéria, ou seja, a sonda encontra-se em um meio onde a densidade natural é  $0 \text{ g/cm}^3$  e não há radiação para a fonte interagir. Em um segundo momento, a densidade sobe até  $1 \text{ g/cm}^3$ , o que mostra que existe um material interagindo com a radiação emitida pela fonte, nesse momento observa-se que a taxa de retroespalhamento atinge um ponto de inflexão, a partir do qual a curva apresenta um comportamento de uma função exponencial negativa. Esse comportamento decrescente e contínuo, exemplificado graficamente na Figura 13, mostra que se o meio é muito denso, praticamente toda a radiação emitida pela fonte será absorvida.

Do ponto de vista das diferentes litologias presentes em estudos geológicos, o objeto de interesse costuma estar na faixa de densidades acima de  $1 \text{ g/cm}^3$ , já que a maioria das rochas apresenta valores de densidade superiores a este valor, incluindo o carvão.

Figura 13 - Função da resposta característica para sondas de perfil de radiação gama retroespalhada para materiais de diversas densidades.



Fonte: extraído de Webber *et al.*, (2009) e adaptado de (Hoffman *et al.*, 1982).

Em relação à perfilagem de densidade, na maioria das situações não é de interesse determinar a *cross section* dos materiais geológicos ou o fluxo de radiação

inicial de uma fonte. Devido a isto, campanhas de perfilagem geofísica gama-gama são realizadas com o intuito de obter-se a estimativa das densidades de certos materiais e são baseadas em funções calibradas. Por meio dos perfis geofísicos executados em blocos de calibração (preparados em laboratório) e em poços que possuem recuperação de testemunhos, é possível construir um gráfico de dispersão do tipo densidade natural *versus* taxas de radiação retroespalhada (obtidas por perfilagem geofísica) e sobre ele, com o auxílio de modelos matemáticos, ajustar uma função do tipo:

$$x=(1/-B_0)*\ln(y/A_0) \quad \text{Equação (3)}$$

onde,  $y$  é a variável dependente representando as taxas de radiação retroespalhada,  $x$  é a variável independente que representa as densidades e  $A_0$  e  $B_0$  são constantes obtidas através do ajuste da equação. Então, através da Equação (3), é possível perfilar furos feitos sem recuperação de testemunhos e inferir valores de densidade (Webber, 2008).

### **3.2.5.2 Vantagens e Limitações na Aplicação do Método de Perfilagem Gama-gama**

Além das já mencionadas vantagens e desvantagens relacionadas ao método, tais como, ser um modo barato de obter uma grande gama de dados por meio da perfilagem geofísica, no entanto oferecer um risco intrínseco ao meio ambiente por ser um método onde acoplado à sonda está uma fonte radioativa. Existem outras vantagens e limitações relacionadas a aplicação da perfilagem de densidade na indústria carbonífera, que serão abordadas neste tópico.

As vantagens de acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (2024) são: (1) a aquisição de dados gama-gama podem ser realizadas em furos de sondagem preenchidos com ar, água ou lama, que estejam abertos ou revestidos com PVC ou aço, devido aos fótons gama serem altamente penetrantes; (2) através dos parâmetros obtidos por meio do método é possível calcular valores de porosidade em função da profundidade, determinação das propriedades mecânicas do carvão, bem como propriedades relacionadas a matriz do carvão, tal como *cleats*, *face cleats* e *butt cleats*.

Já os fatores que podem interferir na aquisição de dados, segundo a *United States Environmental Protections Agency* (2024) estão intrinsecamente relacionados às propriedades do carvão e dos furos de sondagem, tais como: (1) a leitura da densidade das camadas pode ser afetada pela espessura de lama no furo, a densidade de fluido no furo e o contato destes com o braço mecânico, bem como a quantidade de fluido nos poros; (2) segundo Hoffman (1979), a leitura das densidades das camadas de carvão podem ser afetadas devido à combinação entre as características físicas e químicas do carvão e das litologias associadas, de forma a interferir no registro de espessura para as camadas de carvão, fornecendo assim um registro de espessura que pode estar subestimado ou superestimado.

### **3.3 Determinação da Densidade ( $\rho$ ) de Carvão em Laboratório - Método Afunda-Flutua**

Segundo Campos *et al.*, (2018) o processo de separação em meio denso abrange uma gama de aplicações na avaliação de uma amostra mineral. Um dos ensaios mais utilizados tanto para a caracterização mineralógica, bem como para a caracterização de carvões minerais e na obtenção de pré concentrados de diamante e óxidos metálicos é o Método Afunda-Flutua. Este ensaio foi o utilizado para quantificar a densidade das amostras de carvão utilizadas neste estudo.

Em linhas gerais o ensaio é realizado em uma amostra de carvão, utilizando diferentes densidades de corte. Essas densidades são obtidas por meio da mistura de líquidos densos (bromofórmio e outros) com um solvente. Também são utilizadas soluções de sais inorgânicos, como cloreto de zinco e água, na preparação das diferentes densidades que se deseja utilizar.

A preparação de meios densos distintos tem como objetivo a determinação das melhores condições de separabilidade de diferentes tipos de carvões em uma determinada amostra.

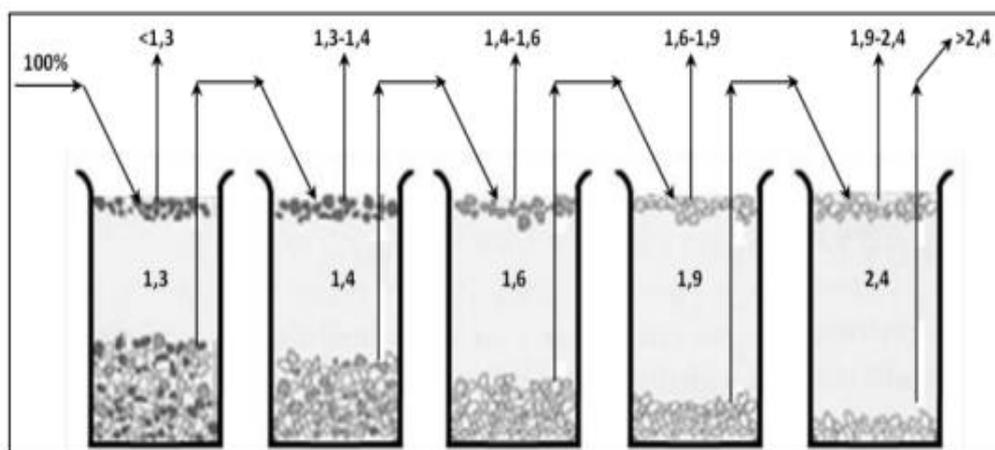
O ensaio é realizado com uma amostra considerada como representativa, que é pesada e classificada em diferentes faixas granulométricas. Cada faixa granulométrica também é pesada e submetida a ensaios de afunda – flutua, conduzidos em recipientes contendo, cada um, um líquido denso ou uma solução de sal inorgânico de densidade conhecida. Dependendo da constituição da amostra a ser

estudada, a sequência de densidades pode ser crescente ou decrescente. A Figura 14 exemplifica o procedimento realizado em laboratório, onde cinco meios com densidades entre 1,3 g/cm<sup>3</sup> a 2,4 g/cm<sup>3</sup> são utilizados.

Conforme a Figura 14, a fração flutuada no primeiro recipiente é retirada e a fração afundada no mesmo é passada para o próximo recipiente, e assim sucessivamente. Ao fim do ensaio, serão obtidas as massas do material flutuado em cada uma das densidades de corte, bem como na última fração afundada que corresponde a última densidade de separação utilizada.

No entanto, neste trabalho apesar do emprego do termo '*hard data*' ao referir-se aos dados de densidade obtidos pelo método afunda-flutua, os valores obtidos são considerado uma aproximação do valor da densidade real das camadas de carvão, pois, não representam a densidade do material *in-situ*, com os poros contendo fluidos, já que as amostras submetidas ao ensaio passam por diversos processos, tal como moagem e secagem.

Figura 14 – Ilustração do procedimento sequencial do ensaio afunda-flutua. As densidades estão em g/cm<sup>3</sup>.



Fonte: Campos *et al.*, (2018).

### 3.4 Revisão da Literatura

Ao fim dos anos 90, novas formas de se executar a perfilagem gama-gama de maneira a evitar potenciais riscos ao meio ambiente e também à saúde dos operadores do equipamento foram desenvolvidas. Um dos exemplos mais notáveis foi a concepção do método *Log While Drilling* (LWD), combinado a sondas que usam fontes radioativas de pequeno porte e que, por consequência, possuem menor

radioatividade. O LWD é executado por meio de ferramentas acopladas à broca de perfuração, ou seja, enquanto o furo de sondagem é executado, concomitantemente é realizada a aquisição de dados geofísicos relacionados às litologias de interesse.

No método LWD as sondas são equipadas com sensores que coletam uma ampla gama de dados geológicos relacionados ao alvo de interesse. Esse conjunto de dados é transmitido em tempo real para a superfície através de um cabo de fibra ótica.

Os estudos mais recentes que envolvem o método gama-gama utilizam os dados obtidos através deste tipo de perfilagem com enfoque na estimativa, avaliação e modelagem de depósitos minerais, sejam eles de carvão, ferro ou até mesmo de reservatórios de petróleo e gás. No entanto, o método de perfilagem tradicional, gama-gama ainda é amplamente utilizado, incluindo na aquisição de dados geofísicos utilizados neste trabalho.

Dentre os estudos que devem ser destacados está o de Webber (2009), onde analisou-se através da aquisição de dados de camadas de carvão por meio de perfilagem gama-gama, uma possível correlação entre a radiação retroespalhada e o teor de cinzas existentes. Como conclusão, observou-se que a correlação entre a radiação e o teor de cinzas é inversamente proporcional, ou seja, conforme as taxas de radiação retroespalhada diminuem, maior será o conteúdo de cinzas em uma camada de carvão.

Em 2016, Pereira *et al.*, conduziram testes de aferição no Campo de Teste de Perfilagem Geofísica da Vale. Neste estudo, foram recriadas, através de blocos de concreto, densidades que correspondem às litologias de minério de ferro exploradas por aquela empresa em uma de suas minas. O estudo demonstrou que os valores de densidade obtidos através da perfilagem gama-gama neste ambiente simulado são correspondentes com àquelas observadas na análise das litologias obtidas através da recuperação de testemunhos de sondagem.

Recentemente, Zhang *et al.* (2019), conduziram um estudo simulatório, onde compararam a aquisição de dados via perfilagem gama-gama e gama-natural, a fim de verificar a eficácia destes dois métodos geofísicos e com a justificativa de que atualmente existe uma demanda por operações que sejam livres de fontes radioativas. O estudo demonstrou que apesar da perfilagem via método gama natural ser eficaz, a capacidade desta em adquirir dados em relação à densidade e espessura de

litologias é duas vezes menor do que aquela apresentada quando o método gama-gama é aplicado sobre as mesmas condições.

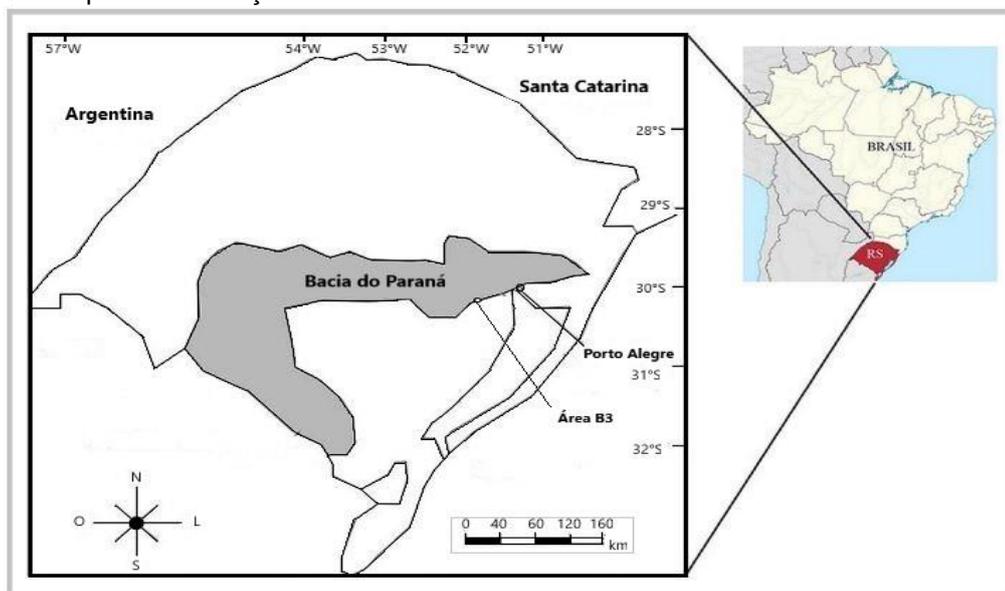
Em 2020, Dyke *et al.*, realizaram um estudo onde sugerem uma nova abordagem de avaliação geotécnica, de forma a prever e mitigar riscos de desabamento em minas subterrâneas de carvão. A avaliação proposta, consiste em três linhas principais de coleta de dados, de forma a construir um banco de dados de análise de riscos, que são: descrição e testes laboratoriais em testemunhos recuperados, perfilagem geofísica (através dos métodos gama-gama e gama natural) e observações *in-situ* das galerias (como a descrição e análise de *roof* e *top* das camadas de carvão e feições de fraturamento). A partir deste compilado de análises e informações, concluiu-se que, para a segurança de uma mina de carvão, será essencial a base de dados estar constantemente sendo atualizada, tanto com dados materiais, quanto com dados geofísicos, já que estes últimos possuem menor custo operacional do que a recuperação de testemunhos de sondagem.

Por fim, apesar da perfilagem gama-gama utilizar uma fonte radioativa que oferece potencial risco ambiental e à saúde de quem opera a sonda, ainda sim é considerada um método seguro, pois desde o início do emprego do método, apenas um registro na literatura aparece como o principal acidente envolvendo a fonte radioativa para estes fins e data de janeiro de 2023. De acordo com a CNN (2023) uma capsula de Césio-137 utilizada em uma sonda de densidade foi perdida em um trajeto entre as cidades de Newman e Perth no Oeste da Austrália, a cápsula, que pertence a Mineração Rio Tinto caiu de um dos caminhões da empresa durante seu transporte, sendo encontrada intacta dezoito dias após seu desaparecimento.

## 4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

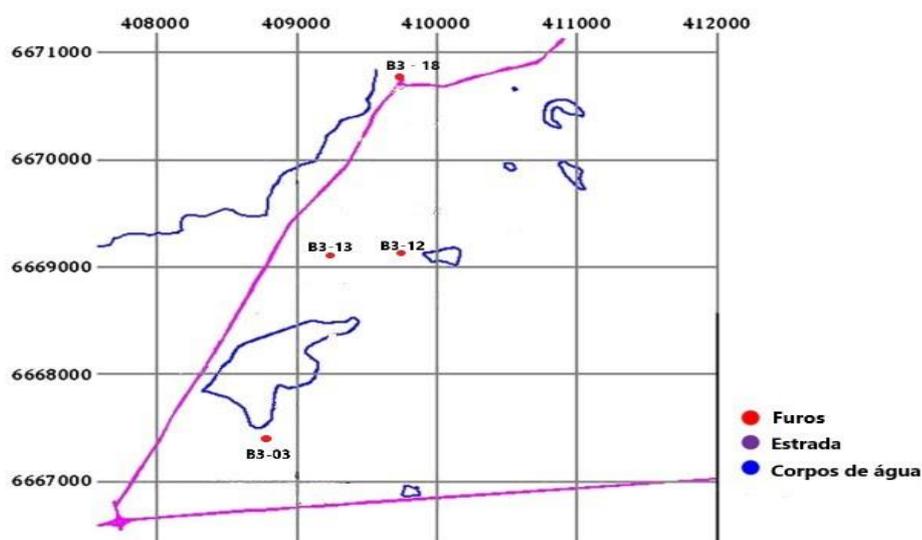
A área de estudo, denominada B3, está localizada no município de Butiá e encontra-se a 86 km de distância da capital do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (Figura 15). O local pertence à empresa Copelmi Mineração Ltda. e abrange uma área de aproximadamente 221 hectares. As localizações dos 4 (quatro) furos de sondagem estudados neste trabalho são observadas na Figura 16.

Figura 15 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: autora (adaptado de Webber et al., 2012).

Figura 16 – Localização geográfica dos furos estudados na Área B3.



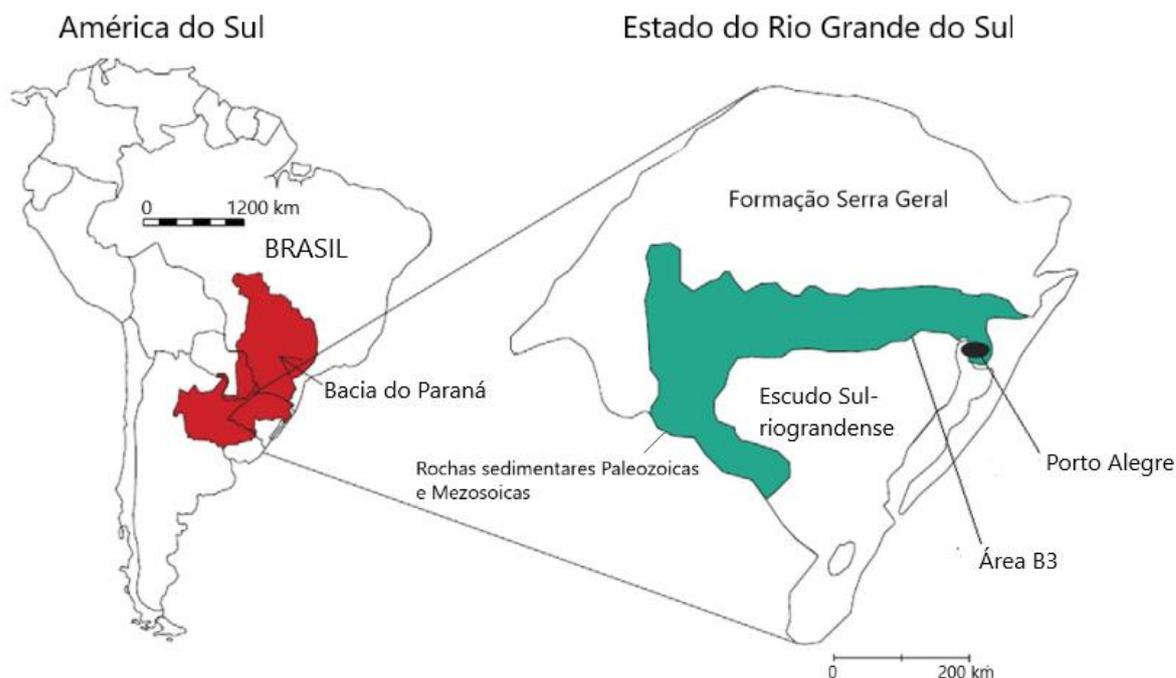
Fonte: autora (adaptado de Webber et al., 2012).

## 5 GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia do Paraná é uma província sedimentar com área aproximada de 1.500000 km<sup>2</sup>, que se estende por quatro países: Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai. Essa bacia tem formato elíptico, direção NNE-SSW e é constituída por pacotes sedimentares com espessuras aproximadas de 7 km de profundidade (Milani *et al.*, 2007). Acredita-se que os estratos carboníferos, bem como as demais formações sedimentares existentes na bacia, tenham sua deposição e origem vinculadas a quatro ciclos de subsidência que ocorreram no Ordoviciano–Siluriano, Devoniano, Eotriássico e foram até o Triássico Médio a Superior (Milani *et al.*, 2007).

No que se refere à geologia regional, a Área B3 situa-se em uma zona de transição entre as rochas do Escudo Cristalino Sul-rio-grandense e a Bacia do Paraná (Figura 17). A geologia da Área B3, de forma resumida, é caracterizada por afloramentos de rochas sedimentares originadas prioritariamente durante as eras Paleozóica e Mesozóica, sendo limitadas ao sul pelo escudo Sul-rio-grandense e ao norte, pelas escarpas dos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral (Gorelik, 2012).

Figura 17 – Mapa da geologia regional da Área B3, onde a cor vermelha representa as localidades onde são observadas rochas da Bacia do Paraná no Brasil, Uruguai e Argentina e a cor verde representa onde estão localizadas as rochas da Bacia no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.



Fonte: autora (adaptado de Webber *et al.*, 2012).

## 6 GEOLOGIA LOCAL

A bacia carbonífera de Butiá constitui uma porção da Bacia Sedimentar do Paraná. Na região estudada, as rochas sedimentares têm o seu processo deposicional datado das eras Paleozóica e Mesozóica e sobreposta a elas está uma cobertura de sedimentos quaternários.

A Área B3 é constituída por sete unidades geológicas distintas: Granito Butiá, Formação Rio Bonito, Formação Palermo, Formação Irati, Formação Serra Geral e sedimentos recentes. Neste tópico serão contempladas as principais características destas unidades estratigráficas, bem como será descrito o perfil estratigráfico da Área B3.

O Granito Butiá está localizado ao sul da Área B3. Segundo Lyra (2016), trata-se de um corpo magmático de origem plutônica, com formato alongado de orientação Norte-Sul e que possui uma área aflorante de cerca de 63 km<sup>2</sup>. Em relação às suas características, este é classificado como um leucogranito peraluminoso, de direção preferencial NNE-SSE, com textura que varia de equigranular fina à grossa, coloração avermelhada em afloramentos intensamente intemperizados e com mineralogia composta predominantemente por biotita, muscovita e quartzo e que tem como mineral acessório a silimanita.

A Formação Rio Bonito, que compõe uma das unidades do Grupo Guatá, da Bacia do Paraná, é a principal unidade estratigráfica aflorante na Área B3, sendo que é nesta unidade em que estão inseridos os pacotes carboníferos analisados neste estudo. Segundo Webber (2012), essa formação é caracterizada por ser uma unidade lito estratigráfica de idade Permiana. Os pacotes carbonosos na área são associados a intercalações com outras rochas sedimentares.

Em relação aos pacotes carboníferos, estes tiveram sua gênese vinculada a um ambiente deposicional lacustre não-oxidante. Sendo que os estratos de carvão na área encontram-se associados a intercalações com os seguintes litotipos: siltitos, argilitos, folhelos e/ou paraconglomerados. A presença destes litotipos são indicadores de um ambiente deposicional costeiro, associado a um sistema do tipo laguna-barreira, marcado por episódios transgressivos e regressivos (Oliveira, 2017).

A Formação Palermo, também pertencente à Bacia do Paraná, segundo Milani (2007) é composta predominantemente por siltitos e siltitos arenosos e localmente,

nas áreas carboníferas do município de Butiá, são observados arenitos finos e conglomerados. As características litológicas dessa formação indicam que sua gênese esteve vinculada a uma deposição em um ambiente marinho, transgressivo e de águas rasas, abaixo do nível de ação de ondas.

A Formação Irati é uma das unidades que compõe o Grupo Passa Dois, este também pertencente à Bacia do Paraná. Essa formação, ainda segundo Milani (2007), é constituída por uma sequência sedimentar de pelitos que possuem colorações que variam do cinza escuro ao preto, além de folhelhos, folhelhos betuminosos e arenitos. Esses tipos litológicos foram originados em um ambiente deposicional do tipo mar restrito.

A Formação Serra Geral pertence ao Grupo São Bento e é mais uma das unidades da Bacia do Paraná. Essa formação é caracterizada por ser constituída por duas sequências vulcânicas distintas: uma básica, que deu origem à formação dos basaltos dessa unidade e uma composta por rochas vulcânicas ácidas em seu topo, como diabásios e andesitos, estes que também aparecem em formas de diques e sills, intercortando rochas sedimentares da Formação Botucatu. O evento vulcânico que originou essa formação é datado do Juro-Cretáceo (Milani, 2007)

Em relação à estratigrafia da Formação Rio Bonito na Área B3, esta é composta em sua base por rochas sedimentares de granulometria maior, arenitos compostos por uma granulometria do tipo areia grossa e paraconglomerados. Já no topo do pacote pode ser observada a cobertura composta por sedimentos quaternários, sotopostos por siltitos, argilitos e/ou folhelhos intercalados com as camadas de carvão.

De acordo com Webber (2012) e Gorelik (2014) a coluna estratigráfica da Área B3 é composta pelas seguintes camadas: cobertura, A, S, M1, M2, M3 e I1 e suas respectivas variações faciológicas (Figura 18).

- **cobertura:** é composta em seu topo por cerca de 1(um) metro de solo argiloso, seguido por 10 m de siltitos intercalados com arenitos de granulometria fina pertencentes à Formação Palermo. Abaixo encontra-se uma camada de espessura entre 15 a 20 m constituída por folhelhos de coloração cinza médio a escuro pertencentes à sequência deposicional pelítica da Formação Rio Bonito;

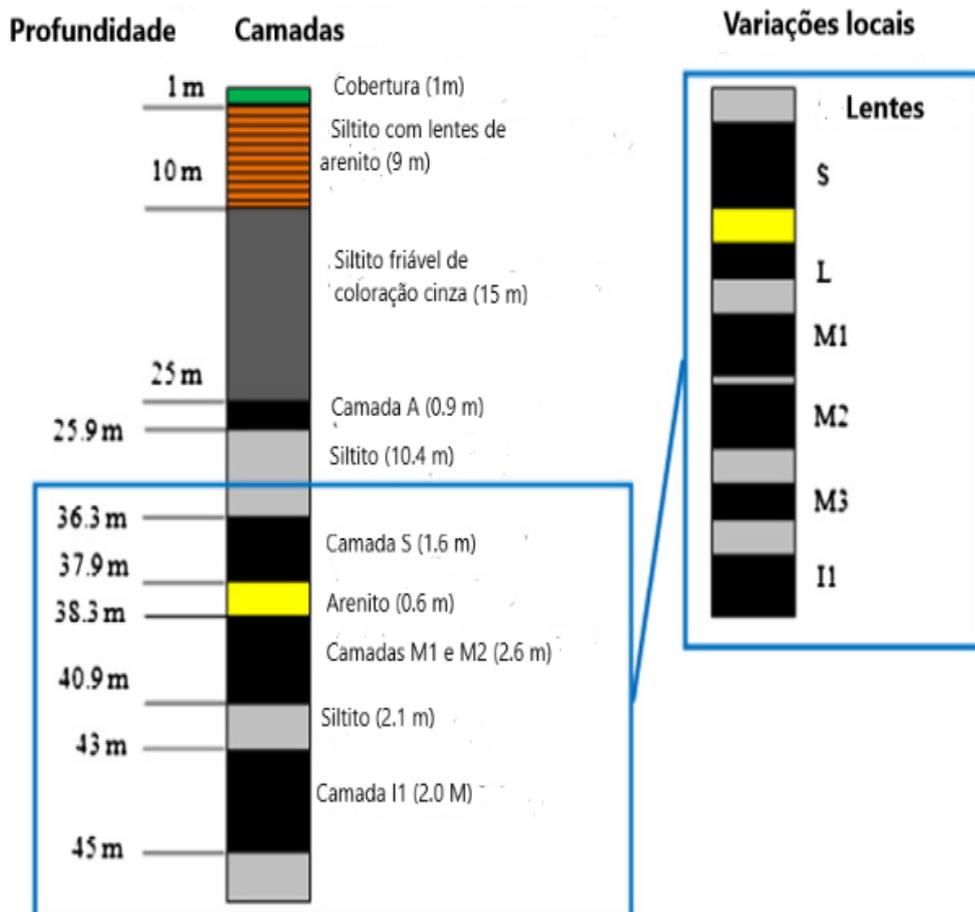
- **camada A:** sotoposta à cobertura, é observado o primeiro pacote carbonífero, denominado Camada A. Esta camada tem espessura média de 0,9 m. É facilmente identificável em alguns locais da Área B3, onde devido à ação intempélica e erosiva, a cobertura é pouco espessa, o que favorece a descobertura para a lavra a céu aberto sem a necessidade de desmonte através de explosivos em sua maior parte. Essa camada ocorre na área meramente como registro estratigráfico e é composta por alternância de lentes de vitrênio e de siltito carbonoso. Ainda são características dessa camada, a grande quantidade de nódulos de pirita e *cleats* com carbonato. A camada A na porção norte da área, ao qual não foram utilizados dados geofísicos e geológicos para a realização deste estudo possui continuidade maior e devido à campanha de sondagens é possível constatar que naquela porção os estratos carboníferos possuem uma melhor qualidade. O estéril que separa as camadas A e S possui uma espessura média de 10,4 m e é composto por siltitos de cor cinza e comportamento que varia de friável a fragmentado;
- **camada S:** camada carbonífera que apresenta uma espessura média de 0,98 m e é caracterizada por um carvão brilhante com alta concentração de vitrinita, intercalado com raras camadas de material estéril, composto por lentes de siltito (0,11 m no total). Nesta camada é comum a observação de vitrênio e grandes nódulos de pirita. O estéril que separa as Camadas S e M1/M2 é constituído por paraconglomerados, denominados de Pedra-areia, com espessura média de 0,84 m;
- **camada M1 e M2:** são camadas carboníferas espaçadas pela intercalação de *partings* de siltito. Essas camadas possuem uma espessura média de 1,58 m. A camada M1 é caracterizada por ser constituída por carvões com alto conteúdo de vitrinita intercalados com lentes de siltito carbonoso. Já M2 é uma camada também composta por carvões com relativo conteúdo de vitrinita e no geral não apresenta uma significativa intercalação com material estéril. O estéril intermediário

entre as Camadas M1, M2 e I1 é composto por siltitos cinza e por vezes paraconglomerados;

- **camada I1:** é a última camada da sequência litológica e é predominantemente composta por carvões foscos com concentração de vitrinita que variam de média à baixa. Na base do pacote carbonífero ocorrem intercalações de silito e paraconglomerados, junto a um tipo faciológico pertencente à camada de carvão I1, denominada I2, que é constituído predominantemente por siltitos e pagaconglomerados, possuindo espessura média de 1,20 m.

As camadas de interesse econômico para a lavra em geral são: S, M1 e M2 e a camada I1.

Figura 18 - Coluna estratigráfica da Área B3, mostrando à direita da imagem, as variações faciológicas de cada camada.



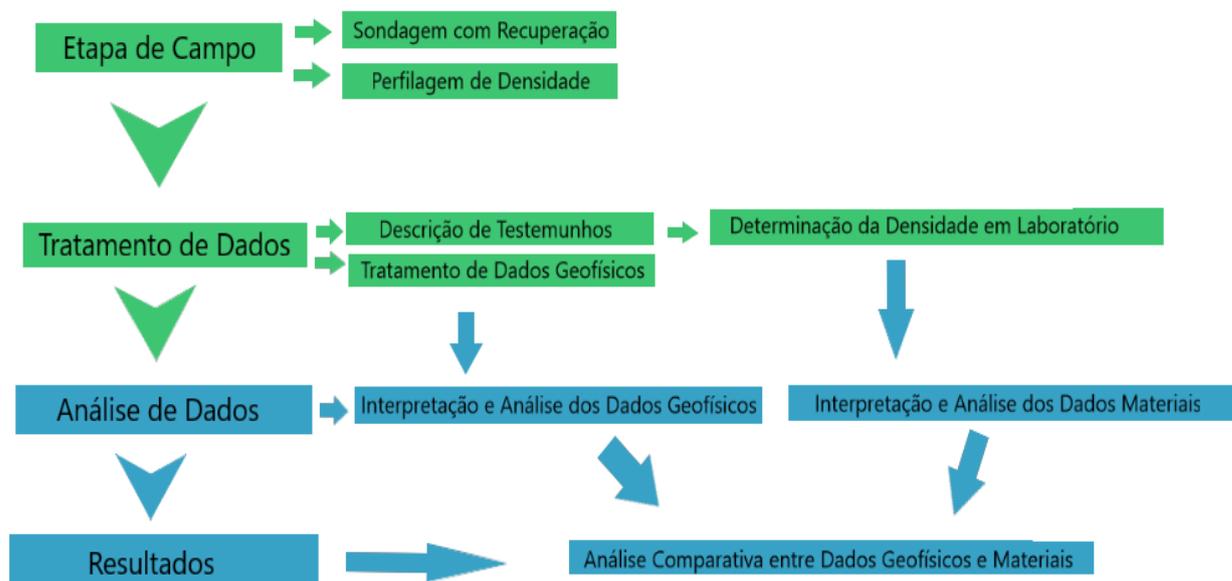
Fonte: adaptado de Webber *et al.*, (2012).

## 7 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi composto por diversas etapas, incluindo a obtenção dos testemunhos de sondagem na Área B3, a aquisição dos dados geofísicos de perfilagem gama-gama e o tratamento dos dados geofísicos, os quais foram realizados em campanhas prévias conduzidas em estudos anteriores.

Este item irá explicar os materiais e métodos utilizados nas diversas etapas, desde a campanha de sondagem, até a análise comparativa realizada neste estudo. De forma simplificada, as etapas realizadas em estudos anteriores por Webber (2008) e Gorelik (2014) e que possibilitaram a realização deste trabalho estão sinalizadas pela cor verde, já as etapas realizadas neste trabalho são representadas pela cor azul no Fluxograma da Figura 19.

Figura 19 – Etapas realizadas ao longo do trabalho, onde no fluxograma a cor verde representa etapas realizadas em estudos anteriores, enquanto a cor azul representa as etapas realizadas ao longo deste trabalho.



Fonte: autora.

### 7.1 Etapa de Campo – Sondagem com Recuperação de Testemunho

A campanha de sondagem realizada na Área B3 foi composta por 30 furos, distribuídos em uma malha não regular. Parte da locação desses furos pode ser observada no trabalho de Webber (2008) e outra no de Gorelik (2014). Do total dos

trinta furos realizados, para este estudo, foram disponibilizados dados referentes às análises laboratoriais dos testemunhos de sondagem de quatro furos.

As sondagens foram realizadas com a utilização da perfuratriz *Sullivan 22* (Figura 20). Após o armazenamento dos testemunhos (Figura 21), o geólogo da empresa realizou a descrição destes em relação às suas características visuais, texturais e mineralógicas, seguindo as recomendações de classificação conforme a Anon (1993) (Tabela 1). Havendo intercalações de material estéril dentro da camada de carvão, o profissional ainda descrevia quais eram os tipos de rochas observadas.

Figura 20 - Foto da perfuratriz Sullivan 22, utilizada durante a execução da campanha de sondagem na Área B3.



Fonte: Webber (2008).

Figura 21 - Foto mostrando o armazenamento de alguns testemunhos de sondagem.



Fonte: Webber (2008).

### 7.1.2 Execução da Perfilagem Geofísica de Densidade

O método de perfilagem geofísica de densidade foi executado em quatro furos na Área B3 e são nomeados como: B3-03, B3-12, B3-13, B3-18. Sendo observadas no mapa da Figura 16. A aquisição dos dados ocorreu através do uso da sonda *Sidewall Density Sonde* (SWDS®) por meio de dois sensores acoplados a mesma, o *Long-Spaced Density* (LSD) e o *High Resolution Density* (HRD).

### 7.1.3 Sidewall Density Sonde (SWDS®)

É o principal tipo de sonda utilizada na perfilagem geofísica de densidade e através dela foram obtidas as informações que foram utilizadas como base para a estimativa dos valores de densidade e espessura das camadas de carvão e estéril.

Em relação às especificações técnicas da sonda: possui 2,89 m de comprimento, 20 kg e 50 mm de diâmetro, o que a torna um equipamento de relativo fácil manuseio.

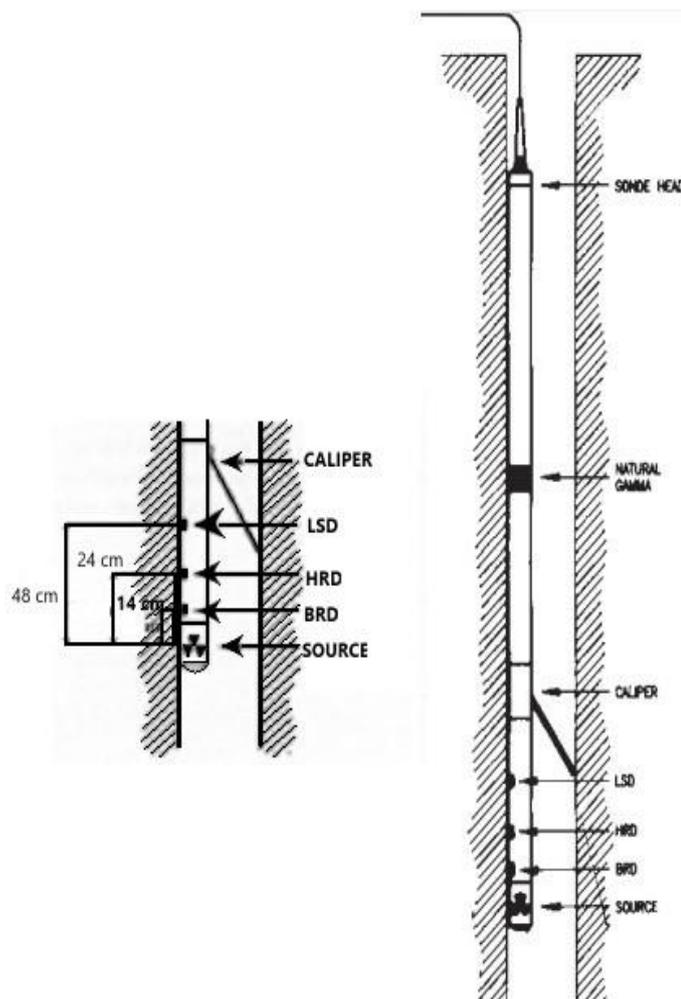
A SWDS® tem uma fonte Césio 137 com 3,7 mCi de atividade que é acoplada na extremidade inferior da sonda. Acima estão localizados os três cintilômetros (sensores) que realizam o registro de radiação retroespalhada. Eles estão posicionados da seguinte maneira: 14 cm acima da fonte, o cintilômetro BRD (*Bed Resolution Density*), a 24 cm localiza-se o cintilômetro HRD (*High Resolution Density*) e a 48 cm o cintilômetro LSD (*Long Space Density*) (Figura 22). Entre a fonte e esses três sensores existe uma blindagem de Chumbo, ao qual evita que os cintilômetros capturem a radiação diretamente da fonte. Os dados deste trabalho foram obtidos tanto para a densidade, quanto para a espessura das camadas de carvão e das camadas de estéril, através dos sensores LSD e HRD.

Na Figura 23, observa-se a tela do software *WellCad*™ durante a utilização da sonda SWDS®. A imagem mostra o registro de três parâmetros através da exibição de cinco linhas, que são os seguintes: (1) à esquerda da coluna central, representado por uma linha azul, tem-se o registro da profundidade, que representa a emissão de radiação gama natural com uma escala em API com valores de 0 a 400; (2) a linha preta, corresponde ao diâmetro do furo em polegadas e fornece o registro do comportamento da parede do furo do poço no trecho apresentado (onde denota-se

que ocorre o registro do caimento da parede do furo em uma profundidade de 70,4 m à 71 m); (3) à direita da coluna central observam-se três linhas que representam o registro de radiação gama retroespalhada, a linha em vermelho é o registro do cintilômetro LSD (mais afastado da fonte radioativa) com escala em CPS variando de 0 a 5000, em azul é observado o registro do cintilômetro HRD (receptor intermediário) com escala em CPS variando de 0 a 10000 e por fim, a linha verde representa o cintilômetro BRD (receptor mais próximo da fonte) com escala em CPS variando de 10000 a 3000.

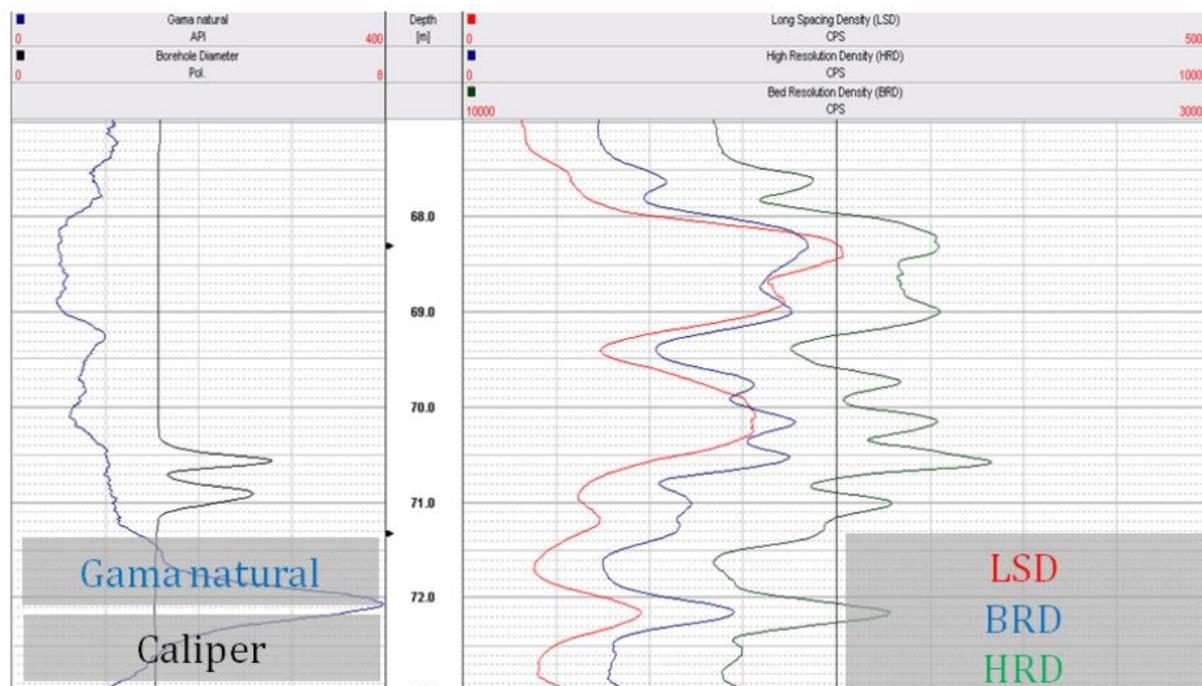
Ademais, a sonda SWDS® também possui um cintilômetro de Iodeto de Sódio ativado com Tálcio, para adquirir a aquisição de dados via perfilagem gama-natural e um braço mecânico (*caliper*) responsável pelo registro do diâmetro do furo e a rugosidade das paredes (Figura 22).

Figura 22 - Sonda SWDS® detalhando seus três tipos de sensores e a fonte radioativa.



Fonte: autora (adaptado de Hoffman *et al.*, 1982).

Figura 23 - Tela do software durante uma leitura de perfil da sonda SWDS®, onde as cores das linhas representam os seguintes parâmetros – (1) linha azul corresponde ao registro da profundidade; (2) linha preta corresponde ao comportamento da parede do poço; (3) linha vermelha, representando o registro da densidade das camadas.



Fonte: Webber (2008).

### 7.1.3.1 Calibração da Sonda SWDS®

Neste estudo, os procedimentos para calibração da sonda e definição da função de resposta do registro de densidade foram realizados através da utilização de diversas amostras retiradas de testemunhos de sondagem. No total, foram 30 amostras utilizadas de forma a representar tanto a densidade das camadas de carvão, bem como as outras litologias intercaladas, tais como, siltitos e arenitos. A densidade destes materiais vai de  $1,4\text{g/cm}^3$  a  $2,4\text{g/cm}^3$ , e foram determinadas por meio de testes laboratoriais, como é descrito de forma detalhada no ítem 7.2.1.1 da dissertação.

As amostras utilizadas no processo de calibração representaram intervalos de profundidade geralmente superiores a 0,4 metros, onde a densidade registrada permaneceu aproximadamente constante. Sendo que, todos os furos possuem o mesmo diâmetro de perfuração e direção (NW). Dessa forma o diâmetro é constante ao longo dos furos (próximo ao diâmetro estabelecido originalmente), característica esta que é facilmente observada nos testemunhos.

O caliper registra simultaneamente as contagens dos sensores (cintilômetros) dos raios gama retroespalhados. Da mesma forma, todas as perfurações foram registradas no mesmo ano, o que elimina variações nas leituras causadas pelo decaimento da fonte Cs-137, que tem meia-vida de aproximadamente 33 anos.

### **7.1.3.2 Características dos Sensores Utilizados**

O sensor *Long-Spaced Density* (LSD) é responsável pela aquisição dos dados relacionados à densidade e espessura dos pacotes carboníferos analisados neste trabalho. A escolha deste como sensor principal para as análises realizadas, deve-se às suas características, já que essas são adequadas aos parâmetros de espessura requisitados pela indústria carbonífera. O sensor possui um volume de investigação maior, pois se encontra mais distante da fonte, sendo assim, capaz de fornecer dados relacionados a diversas camadas e conseguindo capturar informações acerca da densidade e espessura de camadas carboníferas iguais ou maiores que 0,4 m.

Já o sensor *High Resolution Density* (HRD) possui um volume de investigação menor, pois encontra-se mais próximo da fonte. No entanto, esse sensor é capaz de adquirir dados em uma escala de detalhe maior, se comparado com o sensor LSD, de maneira a fornecer dados acerca de camadas de carvão e estéril com 0,2 m de espessura. Segundo Hoffman *et al.*, (1982), para este sensor, as medições são realizadas pressionando-o contra a parede lateral do poço, o que melhora a acuracidade dos dados adquiridos.

A análise dos dados provenientes do sensor HRD neste trabalho é utilizada de maneira a corroborar com os resultados obtidos através do sensor LSD.

## **7.2 Tratamento de Dados**

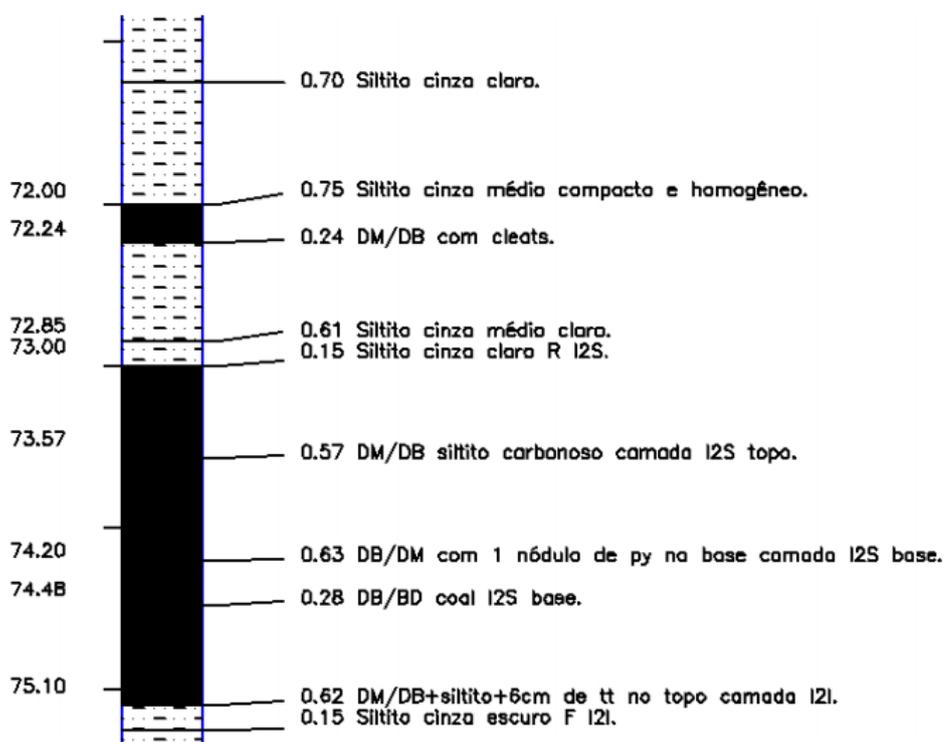
O tratamento de dados, para posterior interpretação, foi dividido em dois grupos: a análise laboratorial dos testemunhos de sondagem da Área B3 e o tratamento dos dados obtidos através da perfilagem geofísica de densidade.

## 7.2.1 Análise dos Testemunhos de Sondagem

Através das informações obtidas durante a etapa de sondagem com recuperação de testemunhos foram realizadas análises expeditas e laboratoriais do material recuperado durante a etapa de campo.

Antes da etapa laboratorial, os testemunhos são descritos de forma tátil e visual, para a elaboração de uma coluna estratigráfica para cada furo de sondagem. As colunas estratigráficas de uma malha são uma das principais fontes de dados utilizadas na avaliação de depósitos minerais. Abaixo, na Figura 24, é possível observar um trecho de uma coluna de um furo da Área B3, confeccionada a partir dessas descrições.

Figura 24 - Trecho de uma coluna estratigráfica correspondente à recuperação de um furo da Área B3.



Fonte: Webber (2008).

Posterior à descrição dos testemunhos de sondagem e à confecção da coluna estratigráfica, foram selecionadas as amostras destinadas à análise laboratorial. As amostras enviadas ao laboratório da Copelmi Ltda. eram constituídas por furos que

tiveram 100% de recuperação, ou seja, toda a massa amostrada ao longo do perfil litológico, incluindo as camadas de carvão, bem como as lentes de estéril.

Foram analisados dois parâmetros durante a etapa laboratorial, a densidade ( $\rho$ ) e o conteúdo de cinzas existente nas mesmas, no entanto, como neste trabalho estamos comparando a densidade obtida via análise laboratorial, com aquela adquirida através da perfilagem de densidade, apenas a metodologia utilizada para a obtenção da massa específica em laboratório será explicada.

#### **7.2.1.1 Determinação da Densidade ( $\rho$ ) em laboratório**

Para determinar a densidade das amostras foi seguida a ISO 7936 – “*Coal Cleaning Tests – General Directions for the Determination and Presentation of Float and Sink Characteristics*”, que descreve quais são os procedimentos e utensílios a serem utilizados para determinar a flutuabilidade de carvões em meios com diferentes densidades relativas.

O procedimento consiste, em um primeiro momento, selecionar as principais e maiores seções de testemunho, parti-las e coletar no mínimo uma amostra de 20 gramas por seção e posteriormente britar cada uma das amostras e espalhá-las sobre um material impermeável para a secagem parcial, a fim de se obter uma homogeneização e fracionamento da amostra de interesse. Através desse procedimento, assegura-se que a densidade da amostra de carvão, se aproxime de sua densidade real.

Posteriormente, utiliza-se uma mistura de água com Bromofórmio ( $\text{CHBr}_3$ ), com densidade aproximada de  $2,76 \text{ g/cm}^3$  e que permite a criação de diversos meios densos.

A partir daquela mistura e conforme a ISO, foram preparados nove meios (Figura 25) com as seguintes densidades:  $1,4 \text{ g/cm}^3$ ;  $1,5 \text{ g/cm}^3$ ;  $1,6 \text{ g/cm}^3$ ;  $1,7 \text{ g/cm}^3$ ;  $1,8 \text{ g/cm}^3$ ;  $1,9 \text{ g/cm}^3$ ;  $2,0 \text{ g/cm}^3$ ;  $2,1 \text{ g/cm}^3$  e  $2,2 \text{ g/cm}^3$ . Após a preparação, as misturas são despejadas em cubas metálicas, para então dar-se início aos testes (Figura 26).

No primeiro teste as amostras de carvão de um perfil estratigráfico são colocadas em um meio com densidade de  $1,4 \text{ g/cm}^3$  e a cuba agitada, então material flutuante será menos denso que o meio e o material que permanecer no fundo da cuba será mais denso. Tanto o material flutuante (Figura 27) como aquele afundado, são

retirados. O material flutuante é lavado, secado e armazenado, já o material afundado é secado e passa para o próximo meio denso (Figura 28). Dessa forma, em cada meio, são retiradas amostras flutuantes e amostras que afundaram.

Figura 25 – Preparação de um dos meios densos contendo água e  $\text{CHBr}_3$ .



Fonte: Webber (2008).

Figura 26 – Despejo de uma das misturas em uma das cubas.



Fonte: Webber (2008).

Figura 27 - Coleta do material flutuante.



Fonte: Webber (2008).

Figura 28 - Material afundado sendo disposto para a secagem.



Fonte: Webber (2008).

Após a finalização do processo descrito, tem-se tanto o peso da massa afundada, quanto da massa flutuada em todos os meios, e através da massa das frações e da massa total da amostra, é calculada uma média ponderada para se estimar a densidade das mesmas, conforme a Equação 4:

$$\rho \equiv \sum_{n=1}^N \rho_{tn} \frac{m_{tn}}{M}, n=1, \dots, N$$

Equação (4)

onde  $\rho$  é a densidade da amostra,  $\rho_{tn}$  é a densidade do meio denso  $n$ ,  $m_{tn}$  é a massa da amostra flutuada no meio denso  $n$  e  $M$  é a massa total da amostra.

Apesar desse ensaio ser comumente aplicado na indústria carbonífera, no entanto o valor de densidade para as amostras medidas em laboratório, não é o mesmo valor que o material possui em *in-situ*, já que sob essas condições ele está sujeito a conteúdo de água e a fraturas por exemplo. Então, pode-se dizer que o ensaio afunda-flutua, fornece uma estimativa da densidade das amostras de carvão, mas não o seu valor real.

Os valores obtidos através desse processo poderão ser observados na sessão de resultados deste trabalho.

### **7.2.2 Tratamento dos Dados Geofísicos**

Os dados obtidos durante a campanha de perfilagem geofísica de densidade foram submetidos a uma transformação para viabilizar sua manipulação. Em um primeiro momento os dados do perfil geológico são salvos de forma automática em formato gráfico, no entanto para melhor visualização e para o carregamento da base de dados no software *Wellcad*<sup>TM</sup>, bem como para a conciliação entre o banco de dados provindos da campanha de sondagem com recuperação de testemunhos e aqueles derivados da aquisição via perfilagem de densidade esses foram convertidos para arquivos de texto (Figura 29).

Esse formato textual pode ser apresentado utilizando escalas distintas de discriminação, podendo apresentar um valor médio a cada 1 cm ou a cada 10 cm de perfil, como observado na Figura 29. Segundo Webber (2008), o cálculo dos dados discriminados em diferentes escalas é feito por uma média móvel que considera os registros contidos dentro da resolução vertical da ferramenta.

Figura 29 - Perfil geofísico em formato de texto usando uma escala de 1 cm.

```

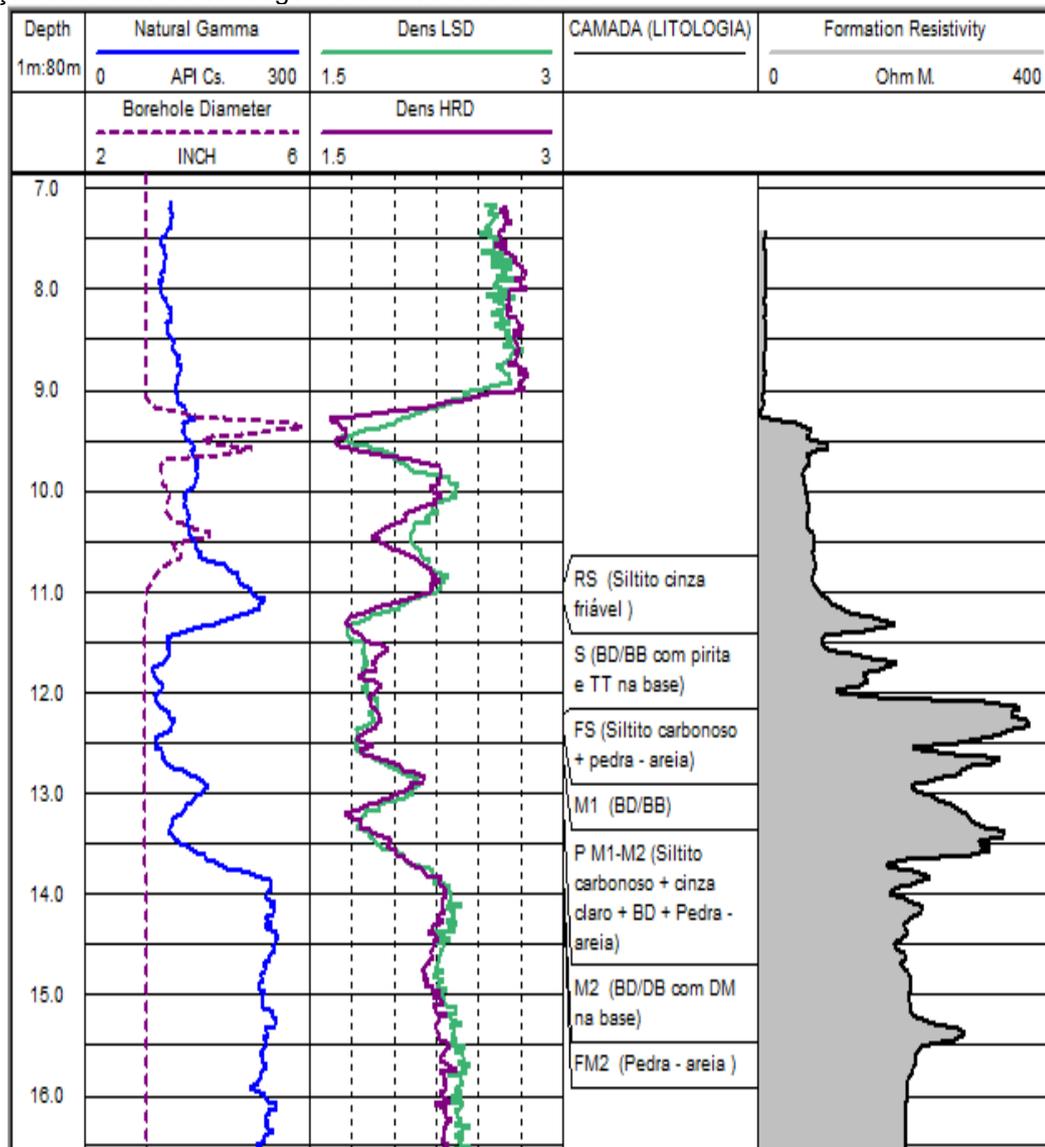
#-----
~CURVE INFORMATION
#MNEMO. UNIT          API CODE          CURVE DESCRIPTION
#-----
DEPTH.M              : 0          Depth
LSD.CPS              : 1          Long Spacing Density
HRD.CPS              : 2          High Resolution Density
BRD.CPS              : 3          Bed Resolution Density
NGAM.CPS             : 4          Natural Gamma
CALP.INCH            : 5          Borehole Diameter
#-----
~A DEPTH      LSD      HRD      BRD      NGAM      CALP
6.77      210.02  1139.36  10354.65  83.60      3.10
6.78      207.29  1140.95  10370.65  83.18      3.10
6.79      209.54  1151.95  10385.48  81.58      3.10
6.80      208.32  1159.95  10390.06  80.50      3.10
6.81      208.65  1160.41  10392.90  79.48      3.10
6.82      207.89  1161.41  10392.73  80.97      3.10
6.83      206.77  1157.56  10400.50  80.48      3.10
6.84      204.81  1157.27  10425.31  81.27      3.10
6.85      206.13  1155.42  10424.54  83.08      3.10
6.86      204.15  1155.59  10416.37  81.59      3.10
6.87      202.33  1155.76  10401.60  80.96      3.10
6.88      197.54  1151.74  10396.06  79.17      3.10
6.89      195.25  1149.58  10376.73  81.77      3.10
6.90      194.58  1147.42  10353.24  82.20      3.10
6.91      195.41  1139.26  10335.13  82.51      3.10
6.92      195.56  1133.94  10314.82  81.92      3.10
6.93      197.71  1126.85  10288.49  81.40      3.10
6.94      194.72  1118.88  10258.82  82.68      3.10
6.95      192.74  1110.22  10245.03  81.69      3.10
6.96      191.14  1109.60  10216.21  81.48      3.10
6.97      188.99  1102.27  10180.36  81.86      3.10
6.98      188.94  1095.77  10127.19  83.14      3.10
6.99      188.11  1087.31  10084.45  82.28      3.10
7.00      187.04  1079.47  10047.93  81.30      3.10
7.01      184.73  1074.64  10015.35  82.58      3.10
7.02      184.07  1068.18  9982.85   81.99      3.10
7.03      183.61  1058.01  9937.00   80.92      3.10
7.04      180.20  1049.13  9897.67   81.92      3.10
7.05      182.03  1037.09  9881.67   83.11      3.10
7.06      178.34  1027.45  9859.67   83.75      3.10
7.07      176.19  1022.95  9844.17   81.61      3.10
7.08      174.36  1016.31  9812.17   82.74      3.10
7.09      174.20  1007.97  9775.55   82.91      3.10
7.10      172.87  1005.21  9780.72   81.96      3.10
7.11      174.17  1001.21  9777.85   83.24      3.10

```

Fonte: Copelmi Mineração Ltda.

Assim, quando se consolida o banco de dados com os valores de densidade obtidos durante a perfilagem e as descrições de testemunhos geológicos, consegue-se interpretar os dados geofísicos através do software *Wellcad*<sup>TM</sup>. Na Figura 30, pode-se observar um trecho do furo B3-03 sobre a perspectiva de diferentes sensores e métodos utilizados durante a etapa de aquisição, onde: na coluna à extrema esquerda da imagem tem-se o registro da profundidade em algarismos numéricos, seguido pela coluna onde tem-se os registros de gama-natural (linha azul) e do diâmetro do furo (linha roxa pontilhada), já na terceira coluna observa-se o registro de dois sensores, um que refere-se à densidade e espessura das camadas obtidas pelo sensor LSD (linha verde) e outro composto pelos dados adquiridos pelo sensor HRD (linha roxa). Na quarta coluna da esquerda para a direita temos a descrição breve dos testemunhos de sondagem de cada camada e por fim, na última coluna o registro da resistividade em cinza.

Figura 30 - Exemplo de trecho do furo B3-03 no software Wellcad™, mostrando os registros de profundidade, sensores contidos na sonda geofísica e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem e análise laboratorial.



Fonte: autora.

### 7.2.3 Análise e Consolidação do Banco de Dados

Para realizar a consolidação do banco de dados e posteriormente a análise comparativa entre os dados de densidade e espessura provindos da análise de testemunhos de sondagem com os mesmos obtidos via método gama-gama, foi necessário, em um primeiro momento, estabelecer limites para a densidade e espessura de camada, os quais refletem as condições mínimas para que haja interesse econômico na exploração destes estratos. Na presente situação e de acordo com os parâmetros utilizados na indústria, um limite máximo considerado adequado

para a densidade dos estratos carboníferos é 2,0 g/cm<sup>3</sup>; para a espessura dos estratos o limite mínimo é 0,40 m (ou seja, há interesse econômico nos estratos com espessura maior ou igual a 0,4 m).

Após o estabelecimento dos referidos limites, os dados contidos em uma tabela primária onde havia informações a respeito da densidade dos estratos e a espessura dos mesmos através dos furos de sondagem, foram comparados com seus pares provindos da campanha gama-gama, ao fim dessa análise preliminar, todos os estratos que não seguiam os limites pré-estabelecidos, eram retirados do banco de dados.

Na Tabela 2, é possível observar a densidade em g/cm<sup>3</sup> para diferentes tipos de carvão mineral, obtidas através do perfil gama-gama.

Tabela 2 - Valores de alguns parâmetros geofísicos para diferentes tipos de carvão, onde deve-se atentar principalmente para a coluna densidade.

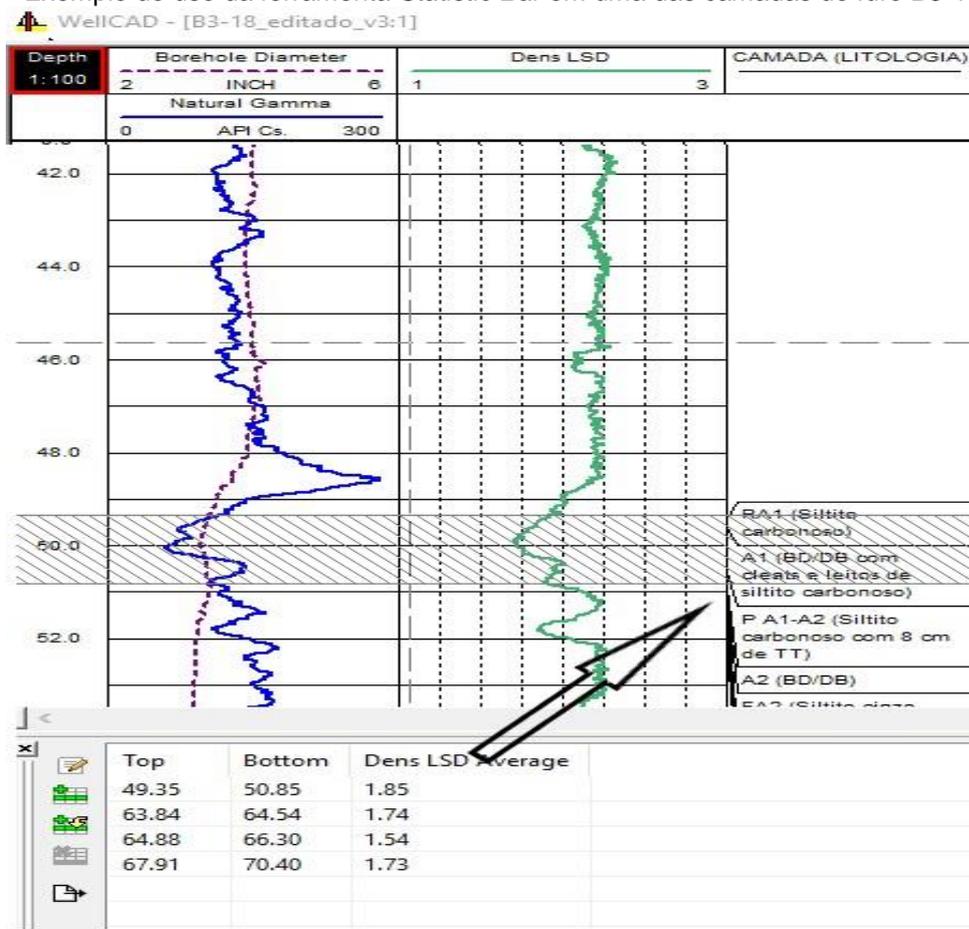
Tipo de carvão	GN (API)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Sônico (µs/ft)	Neutron (Ih)	Resistividade (ohm-m)
Antracito	10-30	1.5-1.7	100-110	0.20-0.35	2-8
Antracito	-	1.4-1.8	-	-	-
Antracito	-	1.51	105	0.41	-
Betuminoso	20-45	1.2-1.4	115-127	0.35-0.45	50-200
Betuminoso	-	1.3-1.5	100-150	-	-
Betuminoso	-	1.24	-	0.5-0.6	-
Sub-betuminoso	20	1.4	128	0.62	-
Linhito	0-25	1.05-1.25	100-110	0.2-0.35	2-10000
Linhito	-	0.7-1.5	140-170	0.47-0.52	-
Linhito	-	1.23	160	0.54	-

Fonte: adaptado de Hearst *et al.*, (2000).

A análise no *Wellcad*<sup>TM</sup>, em relação às camadas de carvão é realizada primariamente de forma visual e a partir da delimitação do estrato é aplicada a ferramenta *Statistics Bar* (Figura 31). Por exemplo, na Figura 31, primeiro delimitou-se onde seria o começo e o fim do pacote carbonífero (área hachurada), e então digitou-se esses valores na ferramenta citada que fornece a estatística relacionada à densidade obtida pelo sensor LSD (indicado pela seta), que neste exemplo é de 1,85 g/cm<sup>3</sup>. Os dados provindos da análise das camadas carboníferas existentes em cada um dos furos e suas informações, tais como: início e fim da camada para o cálculo de

espessura e densidade foram transpostos em uma tabela no *software* Excel®, onde os mesmos dados provindos dos testemunhos de sondagem já se encontravam. Essa operação de análise visual para delimitação de camadas via o *software* citado e a obtenção da densidade de cada estrato de carvão via a ferramenta *Statiscs* e a transposição dos parâmetros para uma tabela no Excel®, foi realizada para todas as camadas de carvão em todos os furos analisados.

Figura 31 - Exemplo do uso da ferramenta *Statistic Bar* em uma das camadas do furo B3-18.



Fonte: autora.

Após a transposição dos dados para a tabela no Excel®, é possível calcular a média das diferenças de espessura a partir da comparação entre os valores provindos de *soft* e *hard data* bem como o a média das diferenças para a densidade em um comparativo entre os dois grupos de dados.

Dentre os aspectos expostos na tabela de dados foram realizados alguns cálculos para verificar a acuracidade do método gama-gama, descritas pelas seguintes equações:

- para o cálculo da diferença entre espessuras e utilizou-se a equação 4, onde  $x$  é a informação assumida como real, ou seja, representada pelos dados de campo (*hard data*) e  $\bar{x}$ , sua aproximação, ou seja, os dados adquiridos através do método gama-gama (*soft data*). A diferença da aproximação é definida como  $\Delta x$ , conforme a Equação (4):

$$\Delta x = (x - \bar{x}) \quad \text{Equação (4)}$$

- para o cálculo da diferença entre densidades utilizou-se a equação 5, onde  $\rho l$  corresponde a densidade da amostra obtida em laboratório e  $\rho g$ , representa a densidade obtida através do método gama-gama. A diferença da aproximação é definida como  $\Delta \rho$ , conforme a Equação (5):

$$\Delta \rho = (\rho l - \rho g) \quad \text{Equação (5)}$$

- em situações em que, devido às características do método gama-gama e da intercalação entre camadas de carvão e estéril, onde não se é possível definir de forma satisfatória o topo e base de cada camada, a densidade entre dois ou mais pacotes de carvão é calculada pela média ponderada através da espessura. Onde se consulta a espessura real de cada camada de carvão e estéril e a respectiva densidade estimada pelo *software Wellcad*<sup>TM</sup>. O cálculo é definido pela equação 6:

$$\Delta \rho = [(\rho_1 x_1) + (\rho_2 x_2) + \dots + (\rho_n x_n)] / (\sum_{i=1}^n x_i) \quad \text{Equação (6)}$$

onde,  $\rho$  representa a densidade estimada de cada uma das camadas através do *software Wellcad*<sup>TM</sup> e  $x$  representa a espessura real de cada camada sendo dividida pelo somatório das espessuras de cada uma das camadas envolvidas. Assim, através deste cálculo temos como resultado  $\Delta \rho$ ;

- para o cálculo da diferença relativa em porcentagem, tanto para espessura e densidade entre *hard data* e *soft data*, utilizou-se a equação

da diferença relativa, onde  $x$  é um número real, ou seja, representado pelos dados de campo (*hard data*) e  $\bar{x}$ , sua aproximação, ou seja, os dados adquiridos através do método gama-gama (*soft data*), divididos por  $x$  e posteriormente multiplicados por 100. O produto da aproximação é definido como  $\Delta r$ , conforme a Equação (7):

$$\Delta r(\%) = \left( \frac{x - \bar{x}}{x} \right) * 100\% \quad \text{Equação (7)}$$

A fim de verificar o comportamento da diferença relativa para espessura e densidade, foram confeccionados histogramas e aplicadas medidas de tendência central, medidas de espalhamento e de forma, tais como:

- a média das diferenças absolutas para espessura e densidade foi calculada através da Equação (8), afim de verificar o ponto médio dentre os valores obtidos. Nesta equação,  $x$  é o produto da subtração entre o número real (*hard data*) e sua aproximação (*soft data*) expressa pela Equação 4 para espessura e pela Equação (5) para densidade, dividido por  $n$ , que representa o número de dados analisados.

$$M = \left( \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \right) \quad \text{Equação (8)}$$

- outra medida de tendência central utilizada nos dados é a mediana. Essa divide os dados ao meio, de forma que número de observações maiores que a mediana, seja igual ao número de observações menores do que ela;
- o desvio padrão foi uma medida de espalhamento utilizada nos dados de diferença de espessura e densidade, bem como de diferença relativa, com o objetivo de verificar o quanto estes dados se afastavam do ponto médio. O desvio padrão é definido pela Equação (9), onde  $x_i$  corresponde a cada valor observado,  $m$  corresponde à média dos valores e  $n$  ao número de dados observados.

$$\delta = \sqrt{\sum \frac{(x_i + m)^2}{n}} \quad \text{Equação (9)}$$

- o coeficiente de espalhamento entre quartis (QS), é considerado uma medida de forma robusta, ou seja, menos influenciável por valores extremos e foi aplicado nos dados de diferença para espessura e densidade. O valor obtido através do cálculo deste coeficiente indica qual é o comportamento da distribuição de frequências observada. Logo, quando:  $QS < 0$ , a distribuição é assimétrica negativa;  $QS > 0$ , a distribuição é assimétrica positiva;  $QS = 0$ , a distribuição é simétrica; A equação para o cálculo do coeficiente de espalhamento entre quartis é dada pela Equação (10), onde Q3 (quartil 3) representa 75% dos dados observados, Q2 (quartil 2) à 50% dos dados, Q1 (quartil 1) à 25% e IQR é a distância interquartil ( $Q3 - Q1$ );

$$QS = \frac{(Q3-Q2)-(Q2-Q1)}{(IQR)} \quad \text{Equação (10)}$$

De forma a correlacionar os dados geológicos (*hard data*) com os dados obtidos através da perfilagem gama-gama via sensores LSD e HRD (*soft data*) para espessura foram confeccionados gráficos de dispersão através do *software GSlib™*. Ademais, foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson e Spearman para espessura e densidade, que são descritos da seguinte forma:

- coeficiente de Correlação de Pearson (p): segundo Isaaks & Srivastava (1989), é a medida estatística mais utilizada para expressar a correlação entre duas variáveis. O valor obtido através do cálculo do coeficiente varia de -1 a 1, onde: (1) -1 representa correlação negativa; (2) 0 (zero) representa ausência de correlação; (3) 1 representa correlação positiva entre as variáveis. Pode ser calculado através da Equação (11).

$$p = \frac{\sum (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{Equação (11)}$$

onde, n é o número de dados,  $x_i$  representa os valores de dados para a primeira variável,  $m_x$  é a média da primeira variável,  $y_i$  são os valores da segunda variável,  $m_y$  é a média da segunda variável e  $\sigma$  são os respectivos valores de desvio padrão para a primeira e segunda variável;

- o Coeficiente de Correlação de Pearson é comumente utilizado para descrever a correlação linear entre duas variáveis. No entanto, quando se denota que a relação entre elas não é de caráter linear utiliza-se o Coeficiente de Correlação de Spearman (*rank*) como forma de complementar as medidas relacionadas à correlação. Na Equação (12)  $R_{xi}$  e  $R_{yi}$  são respectivamente os ranks, ou seja, a classificação dos valores das variáveis x e y.

$$prank = \sum_{i=0}^n \frac{(R_{xi} - mR_x)(R_{yi} - mR_y)}{\sigma_{R_x} \sigma_{R_y}} \quad \text{Equação (12)}$$

Todas as estimativas realizadas ao longo da dissertação foram utilizando o número real obtido através do cálculo e não seu módulo, pois o uso dos números reais permite identificar de forma mais fácil a ocorrência de vieses nas estimativas (por exemplo, se a sonda não está bem calibrada), o que não ocorre quando são utilizados valores absolutos para calcular diferenças.

## 8 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes às comparações realizadas entre os dados provindos da recuperação dos furos de carvão (*hard data*) e seus dados de espessura e densidade com os mesmos dados, porém obtidos através do método gama-gama (*soft data*), através de dois sensores, que são respectivamente o *Long-Spaced Density* (LSD) e *High Resolution Density* (HRD).

Para a análise e interpretação dos dados foram utilizadas técnicas de estatística uni e bivariada, de forma a demonstrar se os dados possuem correlação, bem como demonstrar a distribuição da diferença para espessuras e densidades através de medidas de tendência, espalhamento e forma.

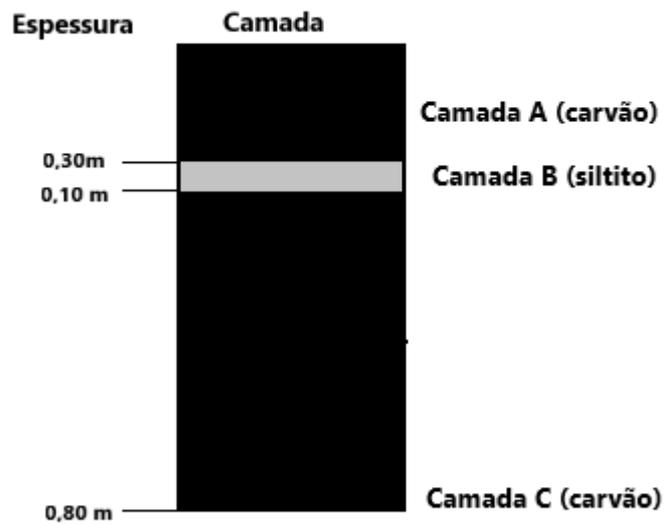
Além disso, deve-se frisar algumas situações comuns e intrínsecas à interpretação de dados carboníferos provindos da aquisição pelo método gama-gama tais como: o conteúdo de lama no furo e o conteúdo de fluido nas camadas de carvão e estéril ou no furo de sondagem podem influenciar nos valores das densidades adquiridas pelo método gama-gama. Ademais, a espessura das camadas pode ser subestimada ou superestimada, mediante condições físicas e químicas do carvão e das camadas de estéril.

A interpretação dos perfis geofísicos também pode ser um fator que inviesa os dados durante a análise dos mesmos.

A interpretação dos perfis contendo as camadas de carvão analisadas através do método de geofísica de densidade são realizadas de forma visual através do software *WellCad*<sup>TM</sup> e através do estabelecimento de um limite, tanto para espessura, quanto para densidade.

i. O limite utilizado para a análise de camadas de carvão de interesse, nesta aplicação da técnica de perfilagem, considera densidades de até 2,0 g/cm<sup>3</sup> e espessuras de camada iguais ou superiores a 0,4 metros. O limite foi aplicado em todas as análises realizadas, com exceção aos casos em que ocorre *interburden* ou seja, a intercalação entre extratos carboníferos e material estéril, como: suponha que em um perfil exista um trecho composto por uma camada carbonífera “A” que possui densidade inferior a 2,0 g/cm<sup>3</sup> e espessura de 0,3 m, seguida por uma camada de estéril “B” com espessura de 0,1 m e ao fim da camada “B” tem-se uma camada de carvão intitulada “C”, que possui densidade e espessura de acordo com o limite estabelecido, por exemplo e 1,7 g/cm<sup>3</sup> e 0,8 m (Figura 32). A presença de todas essas lentes deve ser analisada, pois mesmo a camada “A” não cumprindo os parâmetros limitantes, ela deverá ser retirada para se chegar até a camada “C”. Assim, se a camada “A” possuir uma densidade dentro do limite, isso pode qualificá-la ao aproveitamento, já que a camada de estéril “B” entre os dois pacotes carboníferos é muito fina;

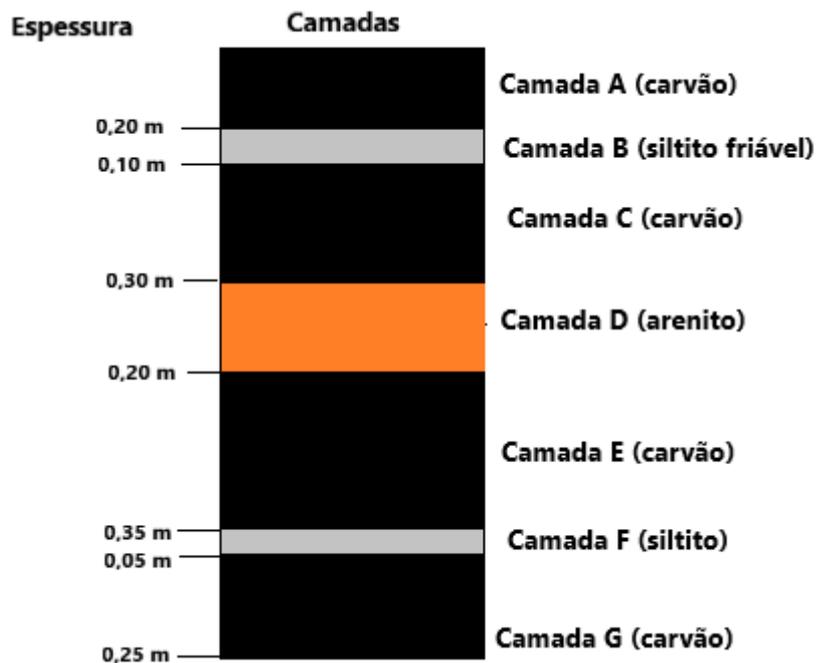
Figura 32 - Trecho hipotético de um perfil litológico, onde tem-se duas camadas de carvão e uma camada de estéril entre elas, onde: Camada A tem densidade dentro do limite estabelecido, mas espessura menor que o limite; B é uma camada de material estéril, tal como um siltito e C é uma camada carbonífera que se enquadra nos parâmetros estabelecidos.



Fonte: autora.

ii. Suponha que a camada que um pacote carbonífero possua quatro camadas de carvão, com espessura total de 1,10 m e uma densidade média de  $1,7\text{g/cm}^3$  para cada camada carbonífera, no entanto, sua espessura com os estratos intercalados é de seja de 1.45 m (Figura 33), já que os 35 centímetros restantes, que correspondem a lentes de siltito e arenito, mesmo assim, após a análise dessa camada, entende-se que, a partir dos dados de densidade, a mesma possui características necessárias para a possível exploração, logo podendo ser lavrada e posteriormente beneficiada.

Figura 33 - Perfil hipotético de uma camada de carvão A, que possui uma espessura total de 1.10 m, porém 35 centímetros dessa camada são compostos por intercalações de siltito.



Fonte: autora.

### 8.1 Sensor Long-Spaced Density (LSD)

Considerando os parâmetros utilizados na indústria do carvão, foram analisados os furos B3-03, B3-12, B3-13 e B3-18, cujas principais feições geológicas se repetem na área de interesse. As Figuras 34, 35, 36 e 37 apresentam os trechos mais importantes dos dados de densidade adquiridos nos furos através do método gama-gama via sensor LSD.

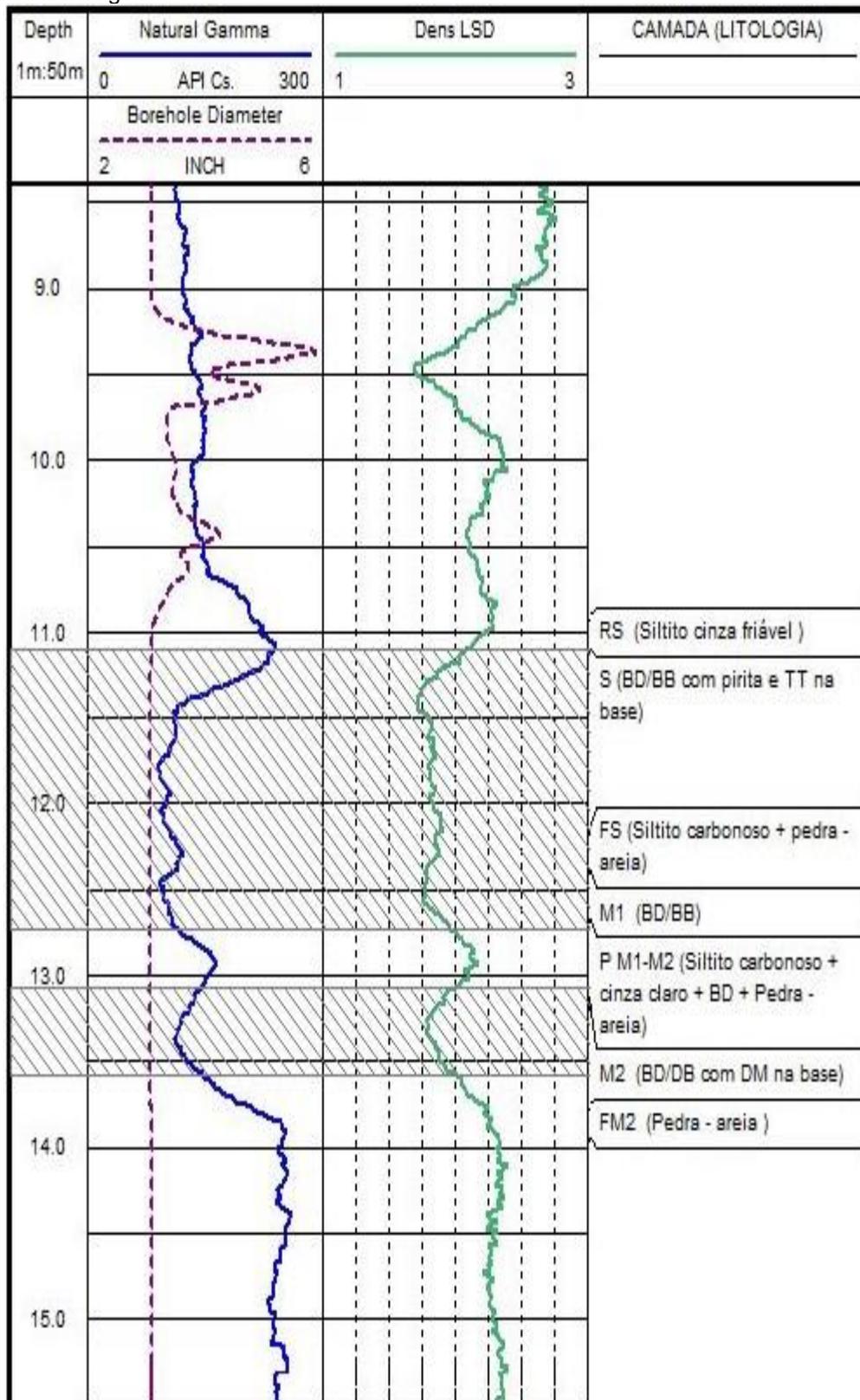
No entanto, neste estudo nem todas as lentes de carvão são suficientemente espessas e possuem boa qualidade (baixa densidade) para serem detectadas através do registro gama-gama ou outros métodos em geral, o que não é algo restrito aos dados atuais, mas sim uma situação usual na indústria carbonífera.

Outra situação ocorrente é que algumas camadas de carvão não cumpriram os parâmetros pré-estabelecidos, algo que também se verifica de maneira corriqueira na indústria carbonífera quando se observa um grupo maior de dados de um jazimento. Por exemplo, em B3-03, a camada M1 não atendeu à espessura necessária exigida (Figura 34), o que foi corroborado pela consulta aos dados de descrição litológica. No entanto, os limites entre as camadas S e M1 não estão claros no perfil de densidade e, numa situação hipotética, a camada S será minerada para atingir a camada M1 e camadas subsequentes. Logo, do ponto de vista geológico e econômico, as duas

camadas podem ser combinadas como um único pacote carbonífero, para ser realizada a decisão de lavrar ou não o mesmo.

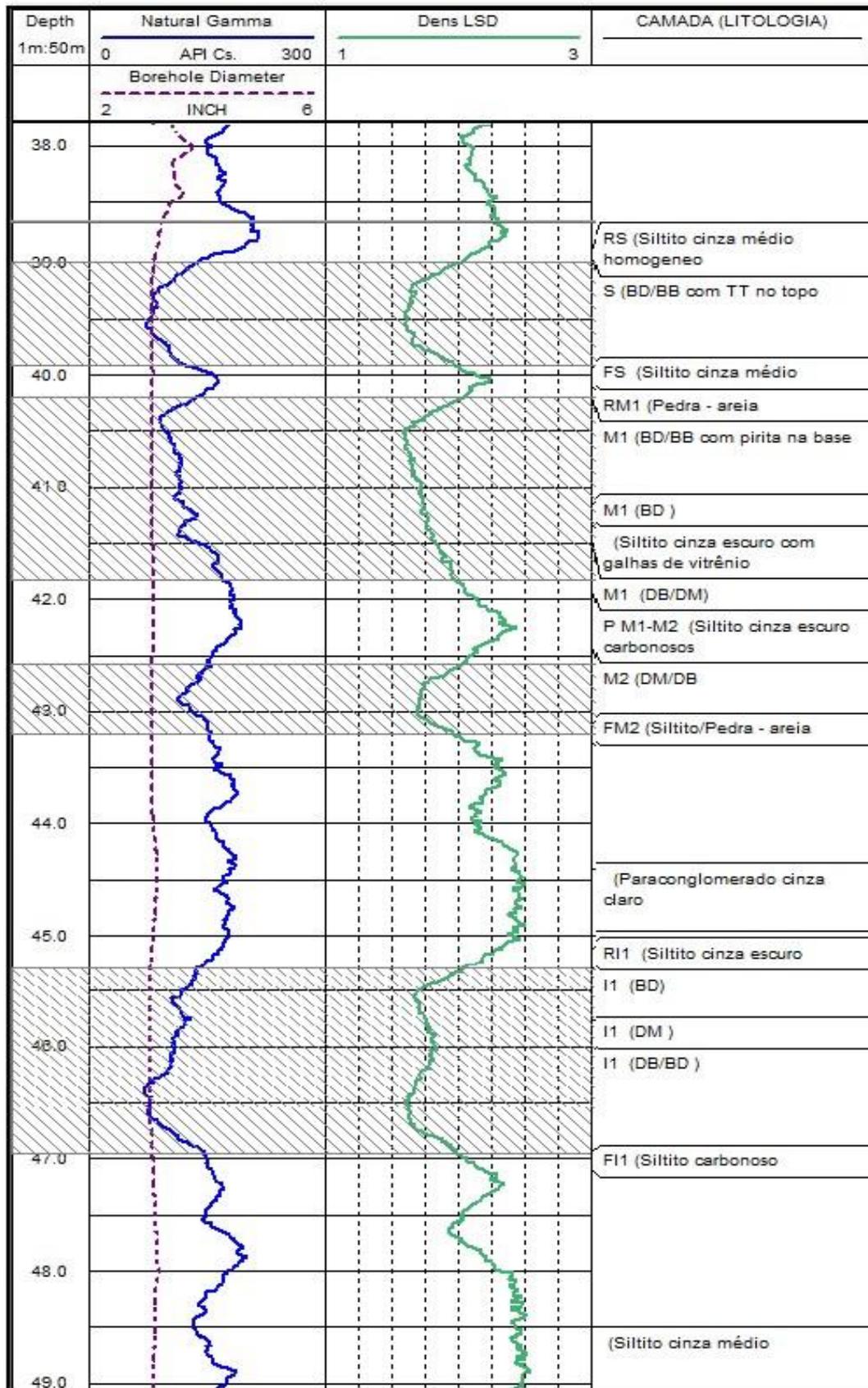
Situações semelhantes são observadas no furo B3-13 (Figura 36), onde as camadas M1 e M2 não podem ser individualizadas devido ao trecho PM1-M2 (siltito carbonáceo com vitrênio) e portanto, seus limites não são claramente observados no perfil de densidade. No furo B3-18 (Figura 37), as camadas I2ST, I2SB e I2I também foram integradas como um único pacote carbonífero, devido à grande quantidade de intercalações com material estéril, o que torna inviável a individualização das mesmas através da observação do registro gama-gama. Nessas situações, a densidade de duas ou mais camadas de carvão é calculada através da média ponderada pelo comprimento dos estratos geológicos (obtidos pelo registro *hard data*), levando em conta a espessura total dos pacotes e as suas densidades registradas pelo método gama-gama, de forma a obter o valor da densidade para o estrato carbonífero como um todo.

Figura 34 - Furo B3-03 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (LSD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem.



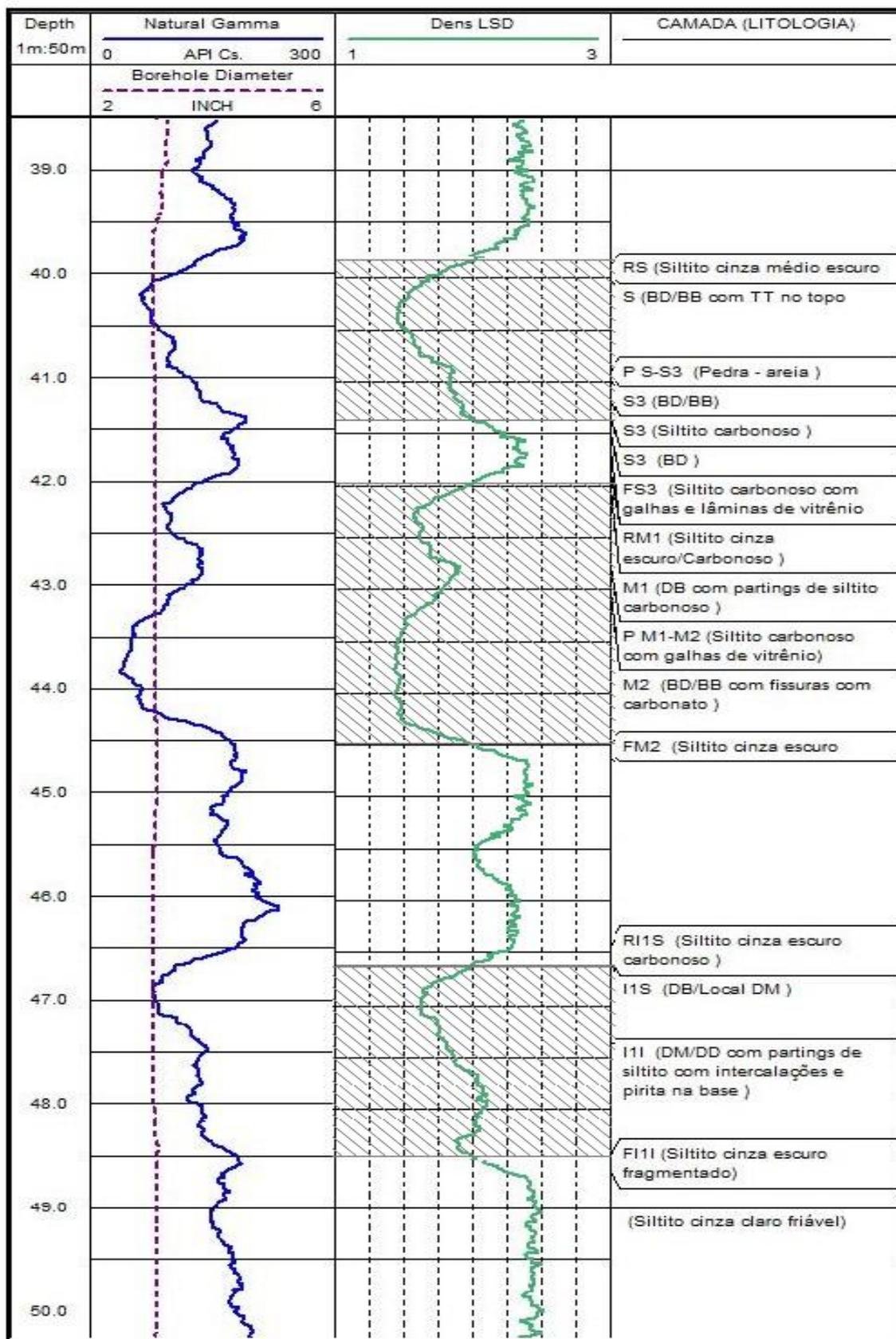
Fonte: autora.

Figura 35 - Furo B3-12 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (LSD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem.



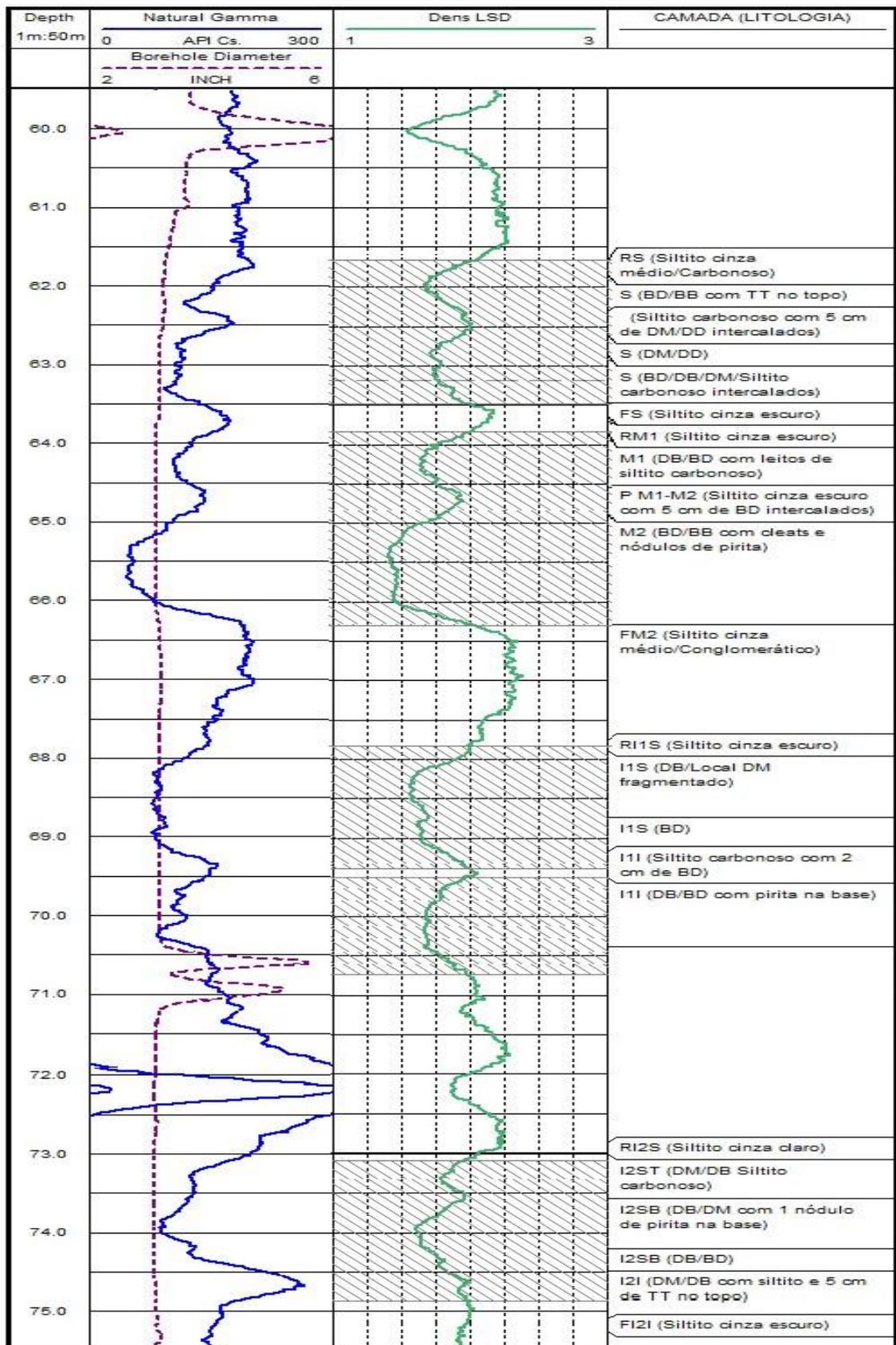
Fonte: autora.

Figura 36 - Furo B3-13 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, gama natural, diâmetro do furo, registro de densidade (LSD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem.



Fonte: autora.

Figura 37 - Furo B3-18 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (LSD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem.



Fonte: autora.

Demais observações podem ser feitas em relação à Área B3. De acordo com os dados analisados e os limites para densidade e espessura pré-estabelecidos, os furos B3-13 e B3-18 (Figuras 36 e 37) apresentam as situações onde a exploração mostra-se economicamente mais viável. O furo B3-13 (Figura 36 e Tabela 3) tem uma espessura total de carvão de 5,84 m (*hard data*) e 5,93 m (*soft data*). Além disso, em B3-13, o pacote de carvão S+S3 possui a densidade média mais baixa entre todos os furos investigados, que é de 1,64 g/cm<sup>3</sup> (*hard data*) e 1,70 g/cm<sup>3</sup> (*soft data*), indicando que esse pacote possui baixo conteúdo de cinzas e alto poder calorífico.

Já o furo B3-18 (Figura 37 e Tabela 3) apresenta uma espessura total de carvão de 8,28 m (*hard data*) e 8,96 m (*soft data*), sendo assim, o pacote carbonífero mais espesso entre todos os furos analisados. Porém, a densidade média das camadas de carvão deste furo é maior quando comparada com as observadas nas camadas de carvão em B3-13 (Figura 36), como observa-se na Tabela 3.

No furo B3-03 (Figura 34 e Tabela 3), a camada S+M1 pode ser vista como o pacote com maior potencial de exploração naquele furo, pois tem uma espessura de 1,54 m de acordo com o levantamento geológico ou 1,64 m de acordo com o registro gama-gama e valores de densidade abaixo do limite. Nesta situação, a diferença relativa entre as densidades é de 2,79% para S+M1 (Tabela 3).

Em B3-12 (Figura 35 e Tabela 3) as camadas S, M1, M2 e I1 formam outros pacotes carboníferos com possíveis potenciais econômicos, apresentando camadas mais espessas e com densidades mais baixas, que são facilmente visíveis nos *logs*. No entanto, o material estéril entre essas camadas faz com que a diferença de densidade aumente conforme observado na Tabela 3. Em termos de diferença relativa para a densidade e espessura, neste caso, a camada I1 é mais confiável e de maior potencial para a exploração em comparação com todos os furos analisados pois apresenta a menor diferença de densidade relativa entre todos os dados observados, que é de -0,60 (espessura) e 0,57% (densidade). Isso pode ser atribuído ao fato de que I1 é uma camada espessa e onde há poucas intercalações de material estéril. Além disso, os limites superior e inferior desta camada foram capturados com maior precisão pelo sensor LSD, sendo assim facilmente identificáveis.

No caso do furo B3-13 (Figura 36 e Tabela 3), a configuração de alguns estratos de carvão contidos no pacote de maior interesse econômico (camadas S, M e I), encontram-se separados por camadas finas de estéril, o que não permite uma melhor

individualização dos estratos. Como pode ser visto na Figura 36, as camadas S e S3 são separadas por uma fina lente de material estéril (separação S – S3 com aproximadamente 0,10 m de espessura), o que não é claramente observado na perfilagem. Situação semelhante também observada nas camadas M1 e M2, que são separadas por lentes de siltito carbonáceo, e em I1S e I1I (Figura 37).

No furo B3-18 (Figura 37 e Tabela 3) as lentes de estéril são tão finas entre M1 e M2 e entre I2ST, I2SB, I2I que as camadas de carvão não podem ser individualizadas de forma satisfatória através do registro do sensor LSD, de forma em que se possa delimitar o topo e base destas. Dessa maneira, a densidade foi obtida pela média ponderada pelas espessuras, fazendo com que tanto M1 e M2 fossem considerados como um único pacote de carvão, situação que ocorre também com a combinação de I2ST+I2SB+I2I. Atribui-se inclusive o aumento considerável da densidade nas camadas I1S, I1I e I2ST+I2SB+I2I às intercalações dos estratos carboníferos com as lentes de estéril.

Com base nas análises e comparações realizadas, o sensor LSD parece ser uma opção satisfatória para ser utilizado nas leituras adquiridas pelo método gama-gama, tanto no apoio para pesquisas de avaliação e exploração de depósitos carboníferos, tanto quanto para a obtenção de dados onde não é possível a recuperação de testemunhos.

As análises realizadas na Tabela 3 envolvem os dados de espessura e densidade dos pacotes carboníferos obtidos pelo método gama-gama (*soft data*) comparados aos mesmos valores dos estratos observados na descrição geológica (*hard data*). A média das diferenças absolutas (0,03 m) mostra que o método gama-gama via sensor LSD mede a espessura dos estratos de forma satisfatória. Para os dados de densidade, a diferença média absoluta é de  $-0,01 \text{ g/cm}^3$ , o que também é um resultado satisfatório para a finalidade deste estudo, já que quanto mais próximas as diferenças médias são de zero, maior é a capacidade do método de fornecer dados imparciais e sem viés, o que acontece nesta situação tanto para a densidade quanto para espessura dos estratos carboníferos.

Tabela 3 - Tabela comparativa entre os dados provenientes da descrição litológica e os dados adquiridos através do método gama-gama via sensor LSD.

Furo	Camada	HARD DATA				DENSIDADE GAMA-GAMA (LSD)				Diferença		Diferença Relativa	
		De	Para	Espessura	Densidade	De	Para	Espessura	Densidade	Espessura	Densidade	Espessura	Densidade
		(m)	(m)	(m)	(g/cm <sup>3</sup> )	(m)	(m)	(m)	(g/cm <sup>3</sup> )	(m)	(g/cm <sup>3</sup> )	%	%
B3-03	S+M1	11,10	12,64	1,54	1,79	11,10	12,74	1,64	1,84	0,10	0,05	6,49	2,79
B3-03	M2	13,08	13,78	0,70	1,92	13,07	13,60	0,53	1,87	-0,17	-0,05	-24,29	-2,60
B3-12	S	38,95	39,95	1,00	1,78	38,99	39,93	0,94	1,73	-0,06	-0,05	-6,00	-2,81
B3-12	M1	40,20	41,92	1,72	1,79	40,20	41,84	1,64	1,76	-0,08	-0,03	-4,65	-1,68
B3-12	M2	42,42	43,12	0,70	1,76	42,58	43,21	0,63	1,80	-0,07	0,04	-10,00	2,27
B3-12	I1	45,27	46,94	1,67	1,75	45,30	46,96	1,66	1,76	-0,01	0,01	-0,60	0,57
B3-13	S+S3	40,02	41,48	1,46	1,64	39,83	41,38	1,55	1,70	0,09	0,06	6,16	3,66
B3-13	M1+M2	42,00	44,48	2,48	1,67	41,97	44,50	2,53	1,62	0,05	-0,05	2,02	-2,99
B3-13	I1S+ I1I	46,60	48,50	1,90	1,83	46,62	48,47	1,85	1,88	-0,05	0,05	-2,63	2,73
B3-18	S	61,87	63,47	1,60	1,87	61,65	63,50	1,85	1,83	0,25	-0,04	15,62	-2,14
B3-18	M1+M2	63,86	66,30	2,44	1,82	63,83	66,31	2,48	1,65	0,04	-0,17	1,64	-9,34
B3-18	I1S	67,91	69,20	1,29	1,66	67,83	69,40	1,57	1,72	0,28	0,06	21,71	3,61
B3-18	I1I	69,52	70,42	0,90	1,79	69,50	70,75	1,25	1,77	0,35	-0,02	38,89	-1,12
B3-18	I2ST+I2SB+I2I	73,05	75,10	2,05	1,84	73,08	74,89	1,81	1,81	-0,24	-0,03	-11,71	-1,63
Média das Diferenças									0,03	-0,01	2,33	-0,62	
Mediana									0,02	-0,03	0,52	-1,37	
Desvio Padrão									0,16	0,06	14,95	3,42	

Fonte: autora.

Ainda, na Tabela 3, observa-se que os resultados de diferenças de espessuras e densidades oscilam com pequena amplitude entre valores positivos e negativos, sinalizando que o processo de calibração da sonda, bem como a aquisição dos dados foi realizado de maneira correta. Se estas diferenças seguissem uma tendência de valores sempre negativos ou positivos, haveria um indicativo de viés na aquisição de dados.

Considerando todos os estratos observados na Tabela 3, em aproximadamente 93% das situações, o valor absoluto da diferença relativa (%) entre a densidade laboratorial e a densidade obtida pelo método gama-gama (sensor LSD) é inferior 5%. Uma diferença inferior a 5% entre os valores de densidade para *hard* e *soft data*, na maioria das situações, mostra-se satisfatória para uso em operações de mina na indústria carbonífera. De forma análoga, considerando os dados da Tabela 3, aproximadamente 71% das situações mostraram que o valor absoluto da diferença entre a espessura das amostras de rocha e a espessura obtida pela perfilagem é inferior a 0,2 m, o que também é um valor satisfatório para a indústria carbonífera.

As diferenças médias entre os registros geológicos e os registros de gama-gama para espessura e densidade são, respectivamente de 0,03 m e é de -0,01 g/cm<sup>3</sup>. Já as médias das diferenças relativas para espessura e densidade são, respectivamente, 2,33% e -0,62%.

Através da observação da diferença relativa de espessuras na Tabela (3) observa-se que seis camadas de carvão em diferentes furos analisados apresentam um erro igual ou superior a 10%, o que é significativo. Esse erro, pode estar vinculado a diversos fatores, tais como: uma interpretação equivocada dos limites de cada camada, características do próprio sensor e também relacionada a propriedades físicas e químicas das camadas carboníferas e do material estéril intercalado, o que é mencionado no item 3.2.5.2 deste trabalho.

As camadas que apresentaram um erro de espessura igual ou acima de 10% são (Tabela 3): B3-03/M2, B3-12/M2, B3-18/S, B3-18/I1S, B3-18/I1I e B3-18/I2ST+I2SB+I2I. Através da observação dos dados de espessura, em conformidade com a análise dos perfis geofísicos via sensor LSD (Figuras 34, 35 e 37) constatou-se o seguinte:

- B3-03/M2 - a camada M2 possui um erro relativo de -24,29% e a espessura da camada no registro geofísico é de 0,53 m, em contrapartida na perfuração com recuperação de testemunho a mesma camada tem espessura de 0,70 m (Tabela 3). Ao analisar a Figura 34, nota-se que a delimitação da camada não é de fácil distinção visual, já que o ponto de inflexão é suave (quando o ponto de inflexão é pontiagudo, os limites de uma camada são de fácil identificação). A falta de nitidez em encontrar os limites da camada pode ser atribuída a intercalação da camada M2 com material estéril, o que faz com que o ponto de inflexão seja suave, quando comparado a camadas com pouca intercalação entre materiais, já que não existe uma mudança brusca no registro de densidade, mas sim gradual, o que influencia diretamente na leitura dos dados de espessura;
- B3-12/M2 – a camada M2 possui um erro relativo de -10,00% e a espessura da camada em *hard data* é de 0,60 m, enquanto em *soft data* é de 0,70 m (Tabela 3). Na análise do perfil geofísico via sensor LSD (Figura 35), observa-se que o topo e base da camada são de difícil distinção, pois apresentam um padrão de sinal geofísico mais arredondado e por consequência suave. Isso, possivelmente está correlacionado com os contatos existentes entre as lentes que compõem

a camada, que é constituída por uma intercalação entre carvões do tipo DM/DB e siltito;

- B3-18/S – a camada I1S possui um erro relativo de 15,62% para a espessura, ademais, no registro geofísico a mesma possui 1,85 m, em contrapartida no registro geológico tem extensão de 1,60 m. No perfil gama-gama (Figura 37), tanto o topo quanto a base da camada podem ser observados com nitidez, no entanto, a intercalação com lentes de siltito, siltito carbonoso junto de estratos de carvão do tipo BD/BD, DM e DD sinalizam heterogeneidade em suas propriedades físicas e químicas, podendo assim influenciar no valor do registro de densidade e por consequência no registro da leitura de espessura;
- B3-18/I1S – a camada possui um erro relativo vinculado a espessura de 21,71%, ademais apresenta uma extensão de 1,57 m (*soft data*), e de 1,29 m no registro *hard data*, (Tabela 3). No perfil geofísico (Figura 37), o topo da camada não é observado com nitidez, no entanto a base é claramente visível. O topo da camada não ser identificado com tanta facilidade, possivelmente está relacionado a intercalações entre carvão DB e siltito, no entanto a base visível pode estar vinculada a presença de um estrato carbonífero BD próximo do fim daquela, o que faz com que o registro de densidade decaia;
- B3-18/I1I – a camada I1I possui um erro relativo de 38,89% e a espessura da camada no registro geofísico é de 1,25 m, enquanto no registro geológico é de 0,90 m (Tabela 3). Na interpretação do perfil geofísico (Figura 37), observa-se que o topo da camada é nítido e bem delimitado, enquanto a base possui uma inflexão suave e pouco nitida, atribui-se isso ao fato de que próximo a base da camada a densidade aumenta devido a presença de uma lente de carvão DB/BD com pirita, influenciando assim no registro de espessura;
- B3 -18/I2ST+I2SB+I2I – a camada possui um erro relativo vinculado a espessura de -11,71%. Sua espessura em *soft data* é de 1,81 m, enquanto em *hard data* é de 2,05 m. Ao analisar a Figura 37, observa-se que, a camada é bastante heterogênea, possuindo diversas intercalações entre carvões de diferentes qualidades com lentes de

silito. Também constata-se, (Figura 37) que o topo da camada é melhor delimitado que a base, o que por sua vez é uma possível consequência da intercalação de diferentes tipos de carvão com maior densidade e estéril, tornando o registro gradual e suave, o que atribui a falta de nitidez na interpretação de onde é a base.

O erro relativo igual ou superior a 10% para as camadas descritas, não está vinculado ao colapso de paredes do poço ou a mudanças no diâmetro do mesmo, pois o registro caliper e gama-natural (Figuras 34, 35 e 37) segue em confirmadade com registro gama-gama ao longo do perfil. Através das análises realizadas, indica-se que estes valores de erros estejam vinculados a dificuldade em dinstinguir o começo ou o fim de uma camada devido a características relacionadas a litologia das mesmas, tais como as intercalações entre diferentes tipos de carvão e material estéril, o que influi no registro de densidade.

### **8.1.2 Estatística Univariada do Sensor *Long-Spaced Density* (LSD)**

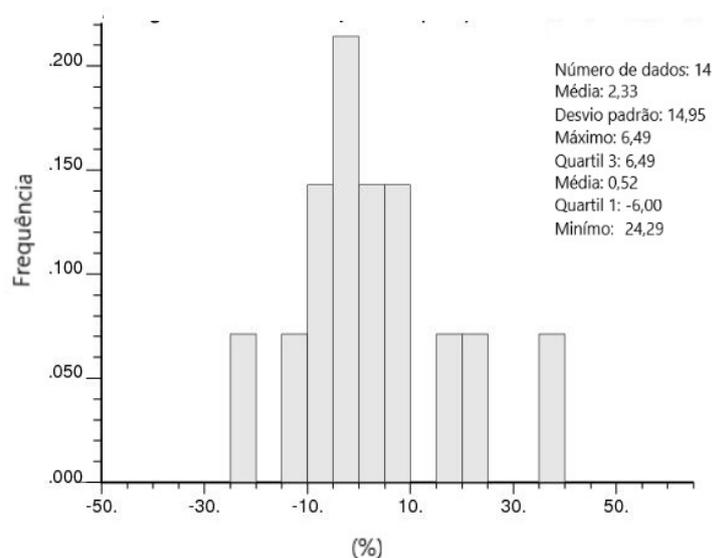
Além do observado na Tabela 3, também foram implementadas medidas de estatística univariada de forma a observar o espalhamento das diferenças relativas, tanto para espessura quanto para densidade.

Ao analisarmos na Tabela 3, o desvio padrão para a diferença relativa das espessuras e sua média, bem como os histograma da Figura 38 e os coeficiente de espalhamento de quartis da Tabela 4, constata-se que:

- i. em relação à diferença relativa das espessuras, a média é 2,33% e o desvio padrão é 14,95% (Tabela 3).
- ii. a média da diferença relativa para as espessuras é de 2,33%, e a mediana é 0,52%. Como os dados são amodais, não é possível classificar a distribuição através desta medida. No entanto, ao analisarmos o histograma da diferença relativa para espessuras entre os dois grupos de dados (Figura 38) e o coeficiente de espalhamento de quartis (Tabela 4) que é de 0,56%, classifica-se a distribuição das diferenças como assimétrica positiva leve, pois o valor do coeficiente é muito próximo de zero.

Figura 38 – Histograma de diferenças relativas de espessura em porcentagem quando comparados os dados geológicos aos dados gama-gama via sensor LSD.

**Histograma Diferenças Relativas entre Espessuras (Hard Data e Soft Data - LSD)**



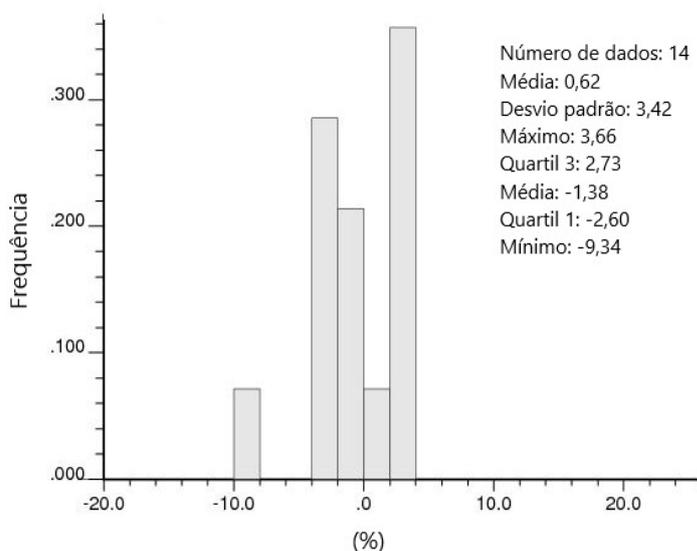
Fonte: autora.

Ao analisar-se na Tabela 3, o desvio padrão para a média relativa das diferenças de densidade, bem como o histograma da Figura 39 e os coeficientes de espalhamento de quartis da Tabela 4, pode-se constatar que:

- i. em relação a média das diferenças das densidades, esta é de -0,62% e o desvio padrão de 3,42% (Tabela 3).
- ii. ao analisar a média das diferenças relativas para as densidades (-0,62%) e sua mediana (-1,37%), obtemos um indicativo de que a distribuição das diferenças para adensidade é assimétrica positiva, pois o valor da mediana. Entretanto, ao observar tanto o histograma da Figura 39, quanto o coeficiente de espalhamento de quartis que é de -0,02%, ou seja, menor que zero. Dessa forma, pode-se classificar a distribuição da diferença relativa para as densidades como assimétrica negativa leve e sendo potencialmente influenciada por características como as diferenças entre as densidades obtidas através do método gama-gama e das amostras analisadas em laboratório. Já que *in-situ*, na análise geofísica o conteúdo de água pode influenciar nos valores obtidos.

Figura 39 – Histograma de diferenças relativas de densidade em porcentagem quando comparados os dados geológicos aos dados gama-gama via sensor LSD.

**Histograma Diferenças Relativas entre Densidades (Hard Data e Soft Data - LSD)**



Fonte: autora.

Tabela 4 – Tabela com os valores de coeficiente de espalhamento de quartis para as a diferença relativa de espessura e densidade entre *hard data* e *soft data* via sensor LSD.

<b>HARD DATA X SOFT DATA (LSD)</b>	
<b>Coeficiente de espalhamento de quartis espessura %</b>	<b>0,56</b>
<b>Coeficiente de espalhamento de quartis densidade %</b>	<b>-0,02</b>

Fonte: autora.

### 8.1.3 Correlação entre *Hard Data* e Dados Adquiridos via Sensor LSD para a Espessura e Densidade das Camadas de Carvão

Para a determinação da correlação entre estas variáveis, não foi levada em consideração apenas a observação das representações gráficas das figuras 40 e 41, mas também, o sumário estatístico que as acompanha. Estes fornecem informações a respeito do grau de correlação existente entre os dois grupos de dados, através dos valores dos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman (*Rank*).

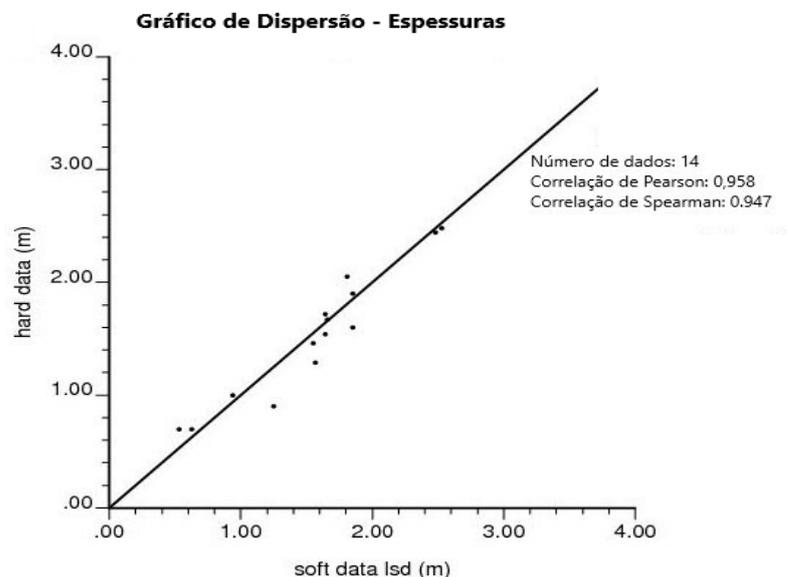
Na Figura 40, é observado o gráfico de correlação para a espessura entre *hard data* e *soft data* via sensor LSD, acompanhada do sumário estatístico.

Analisando a correlação entre as espessuras, observando o gráfico da Figura 40, pode-se dizer que essa é positiva. Além disso, o valor de Coeficiente de Correlação de Pearson que é de 0,958 e o Coeficiente de Correlação de Spearman

que é de 0,947 indicam uma correlação positiva forte entre as variáveis, já que os valores dos coeficientes estão próximos a 1.

A correlação entre as densidades obtidas via *hard data* e *soft data* não foi realizada de maneira gráfica, pois a relação entre os dois grupos de dados é significativamente influenciada no presente caso pelo intervalo de valores entre densidades ser bastante reduzido. No entanto, os valores de Coeficiente de Pearson e Spearman para a densidade são respectivamente de, 0,679 e 0,662. Para a indústria carbonífera essa é uma boa correlação, já que o esperado é a partir de 0,5.

Figura 40 – Gráfico de dispersão comparando dados geológicos e dados obtidos via método gama-gama via sensor LSD, para espessura.



Fonte: autora.

## 8.2 Sensor High Resolution Density (HRD)

As análises e comparações realizadas por meio da aquisição de dados com o sensor HRD foram feitas com o objetivo de demonstrar não só a eficácia do método gama-gama, bem como corroborar com os resultados obtidos através do sensor LSD.

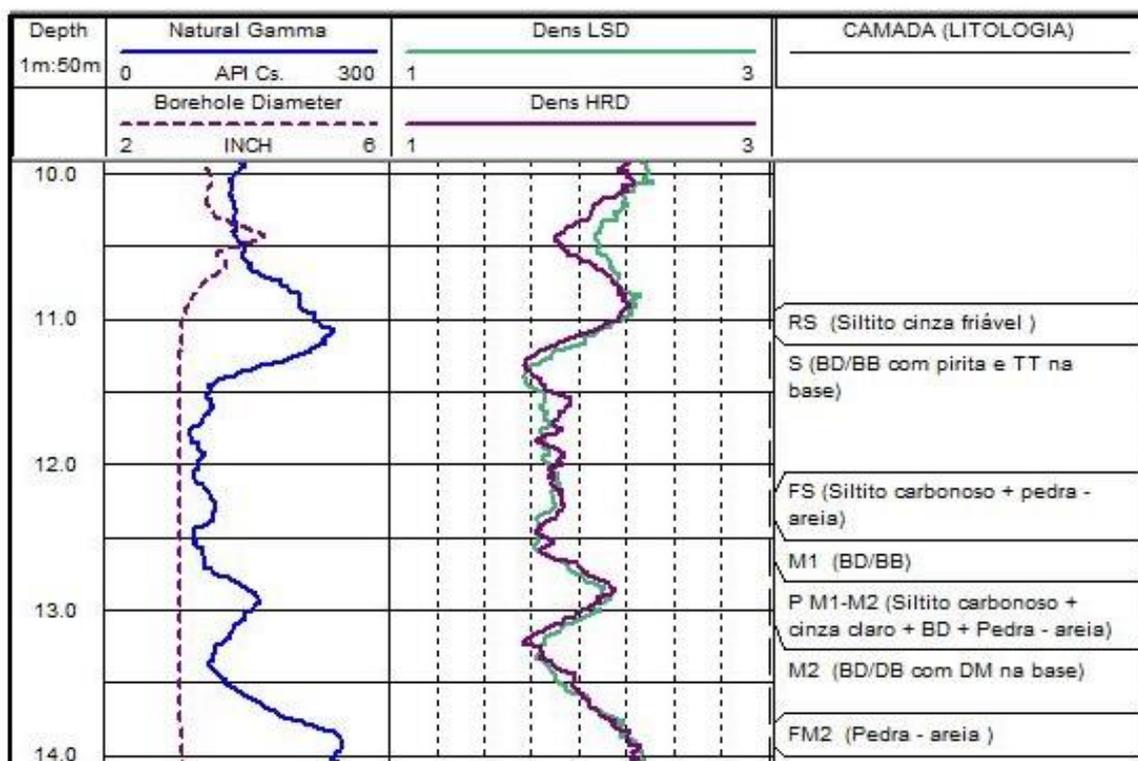
O sensor HRD tem um menor volume de investigação se comparado ao sensor LSD, ou seja, é capaz de realizar a discriminação de estratos de menor espessura (aproximadamente 0,2 metros) como por exemplo, em intercalações muito finas entre camadas de carvão e estéril.

No intuito de demonstrar a eficácia do método gama-gama, são analisadas as imagens obtidas pelos dois sensores, bem como a respectiva comparação numérica entre os dois conjuntos de dados (*soft data* via sensor HRD e via sensor LSD).

Observando as representações visuais da sobreposição entre os dois sensores, pode-se verificar algumas variações sutis em alguns furos.

No *log* do furo B3-03 (Figura 41) observa-se que ambos os sensores apresentam um comportamento de resposta semelhante no que tange às camadas de interesse, no entanto, algumas variações são percebidas. Ao observar isoladamente a camada S na Figura 41, a uma profundidade de 11,5 m visualiza-se uma variação no padrão entre os sensores, onde o sensor HRD mostra um aumento localizado na densidade, o que não ocorre no sensor LSD (Figura 41). Essa mudança de padrão pode ser eventualmente interpretada como um aumento da densidade devido à presença de pirita, que é um mineral de densidade mais alta e que reduz o poder calorífico do carvão. Por tratar-se de uma variação pontual, a mesma não pode ser captada pelo sensor LSD.

Figura 41 - Furo B3-03 no *software* Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (sensores LSD e HRD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem.



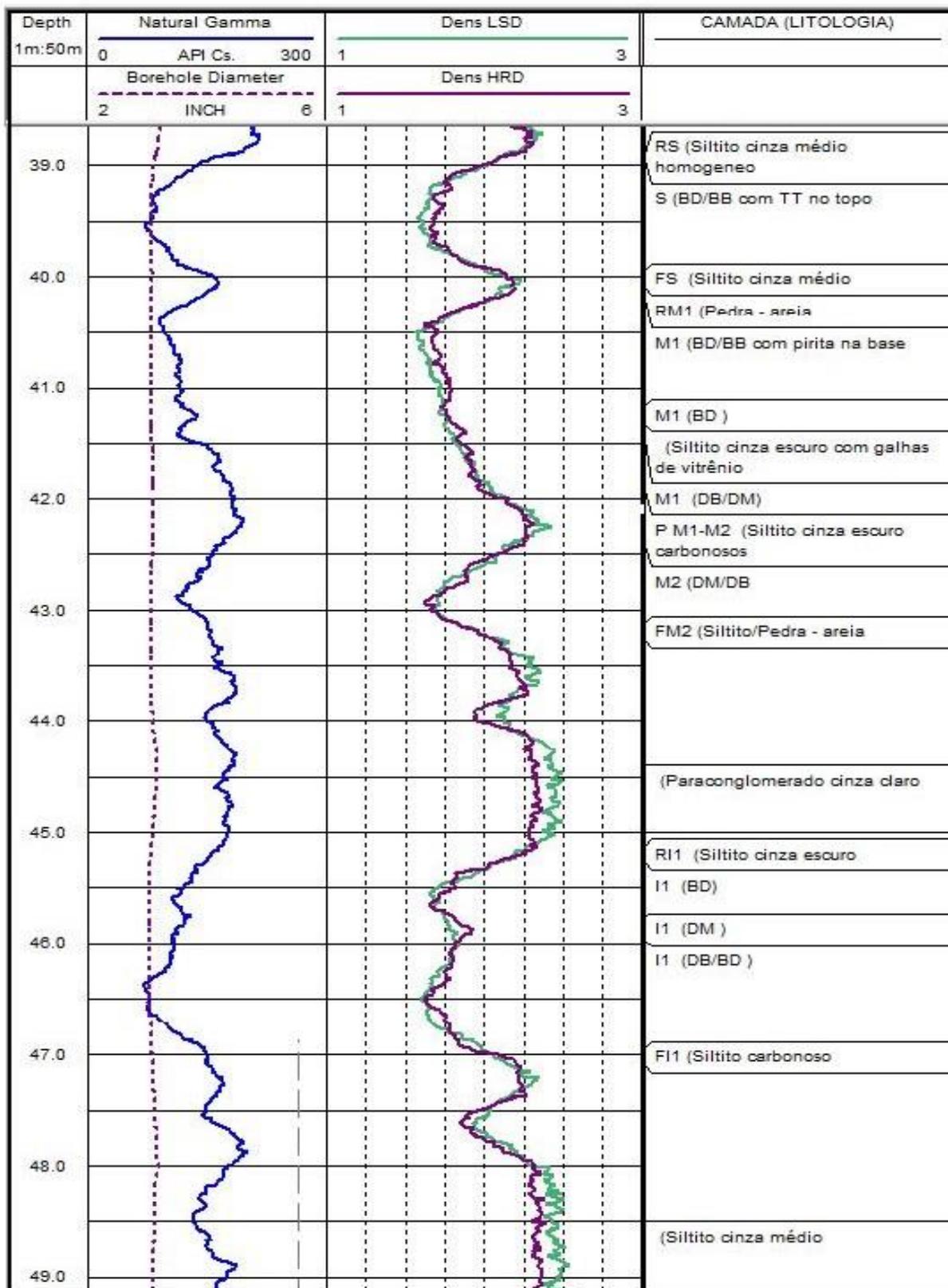
Fonte: autora.

Ao observar a Figura 42, correspondente aos registros dos sensores HRD e LSD nos trechos de interesse do furo B3-12, pode-se dizer que as variações entre os dois sensores também são sutis e localizadas.

Porém, para esta situação, o sensor HRD é capaz de delimitar o *floor* de uma camada de carvão e o início de uma camada de estéril. Em uma profundidade que vai de 43,84 m à aproximadamente 44,08 m, podemos denotar que o sensor HRD registra uma curva negativa, ou seja, caracterizando assim o decréscimo da densidade e posteriormente o aumento dela. A curva provavelmente indica uma lente de aproximadamente 0,2 m de carvão, que delimita a base da camada M2 e a transição deste estrato carbonífero para uma camada de estéril (paraconglomerado cinza claro), onde é observado o aumento da densidade. Essa transição entre carvão e estéril não é possível de ser visualizada de forma satisfatória com o uso do sensor LSD.

Ademais, no furo B3-12 também pode-se observar através do registro HRD uma maior variação de densidade quando analisados os estratos carboníferos que compõem a camada I1. Quando é observado o registro dos dois sensores junto à litologia (Figura 42), observa-se que a uma profundidade de 45,8 m à 46 m ocorre um aumento da densidade que é capturado pelo sensor HRD e expresso por uma curva positiva. Quando se é analisado o aumento pontual da densidade nessa profundidade pode-se observar que este possivelmente está vinculado à mudança de litologia no pacote I. Pois, onde ocorre o aumento da densidade existe um estrato de carvão classificado como DM, ou seja, que possui de 1% à 10% de vitrênio. Posteriormente, a densidade diminui entre 46 m à 46,94 m e esse decaimento possivelmente está relacionado à presença de uma lente de carvão de melhor qualidade, que é marcada pela intercalação entre os tipos de carvão DB e BD, que possuem um maior conteúdo de vitrênio se comparado a lente DM.

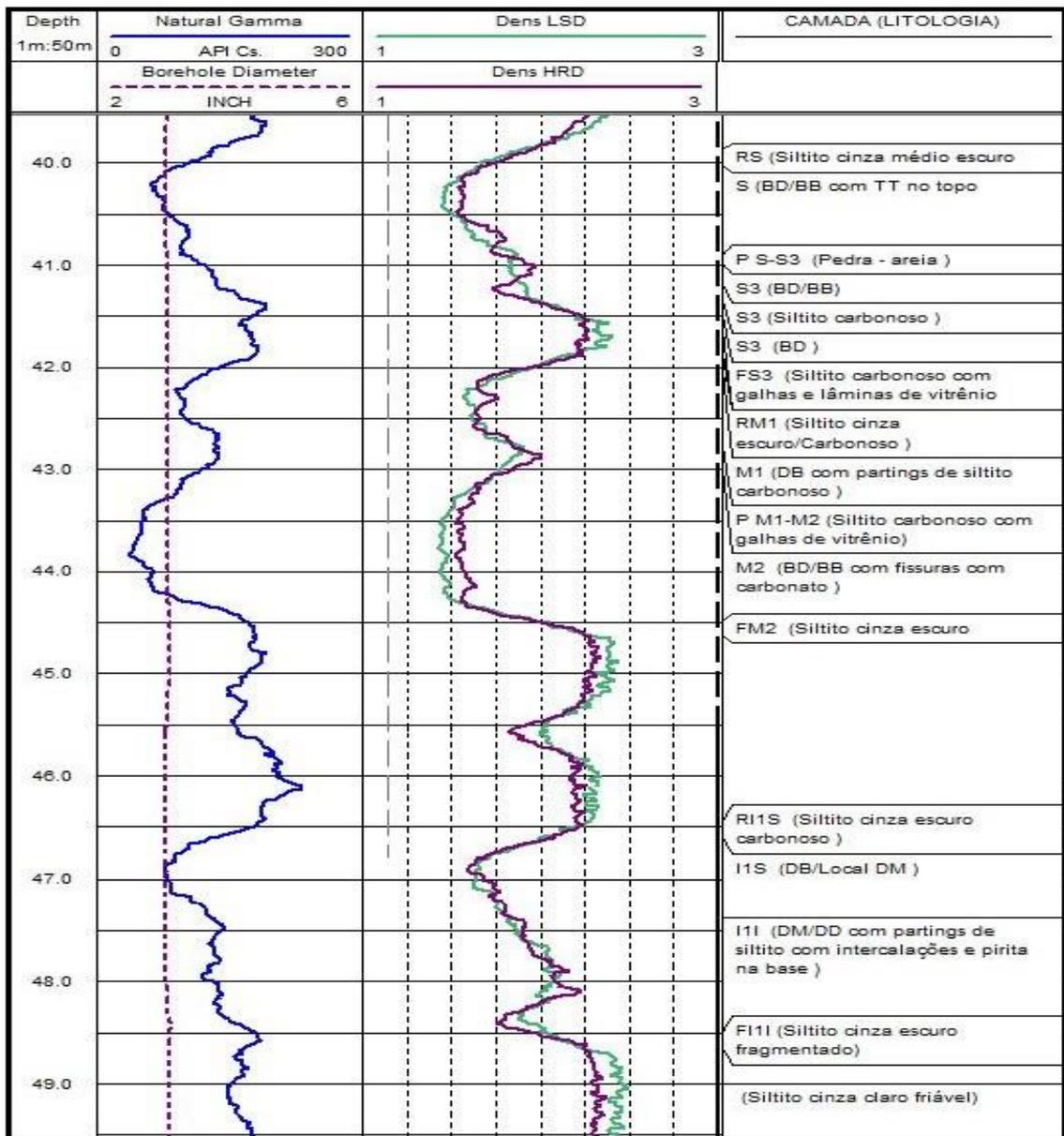
Figura 42 - Furo B3-12 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (sensores LSD e HRD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem.



Fonte: autora.

Através da análise do registro obtido pelos sensores HRD e LSD para o furo B3-13 (Figura 43), nota-se que o sensor HRD é capaz de capturar o intervalo que separa as camadas M1 e M2 de forma mais satisfatória se comparada ao sensor LSD não é capaz de realizar em seu registro. A transição entre as camadas ocorre a uma profundidade de 42,8 m à 42,9 m e é espessa por uma por uma curva positiva, indicando um aumento da densidade. Com excessão da delimitação entre as camadas M1 e M2 que é capturada pelo sensor HRD, não nota-se diferenças significativas entre os dois sensores para este caso.

Figura 43 - Furo B3-13 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (sensores LSD e HRD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem.



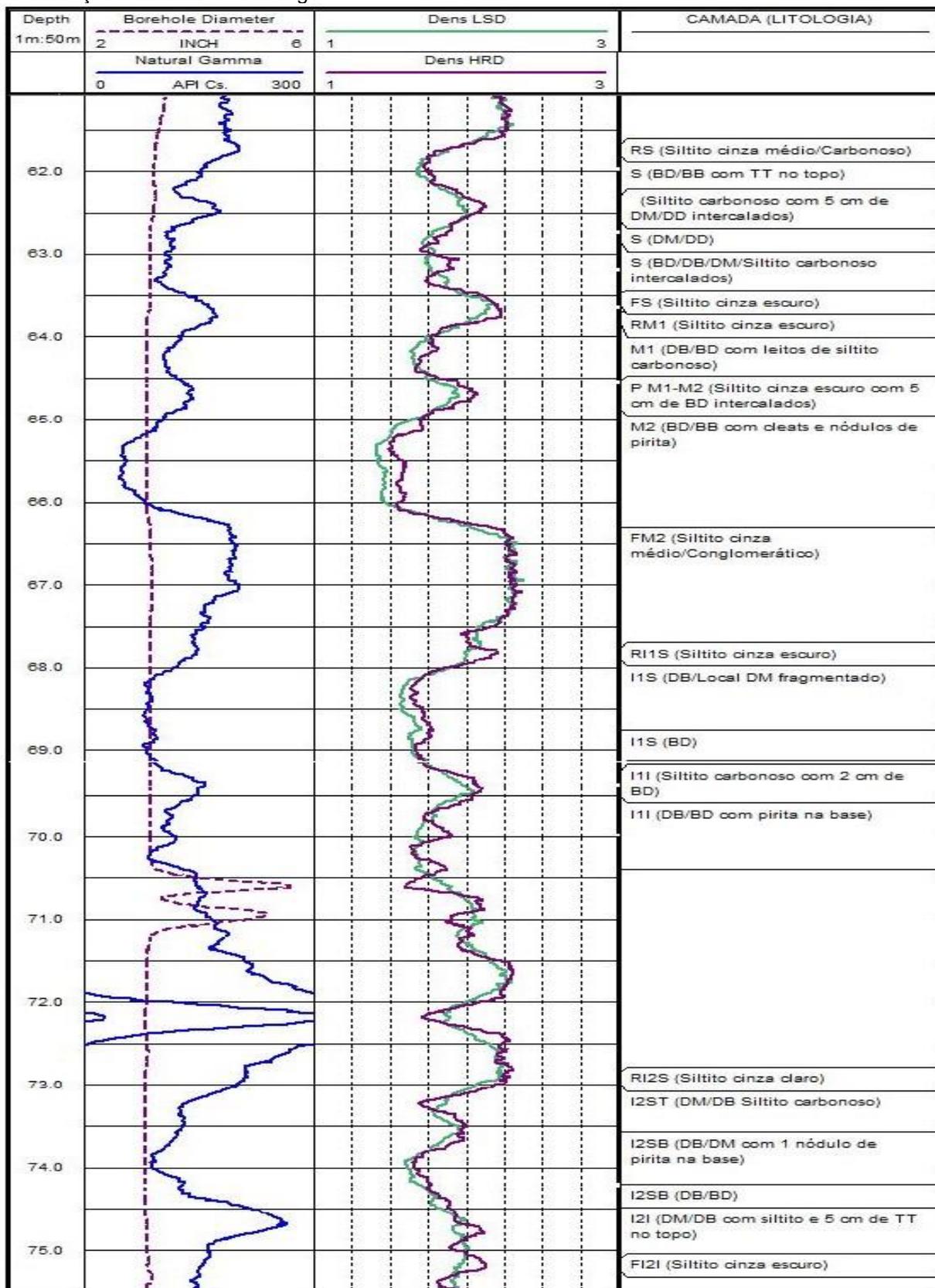
Fonte: autora.

Uma situação semelhante a do furo B3-13 (Figura 43) também é observada quando compara-se os *logs* dos sensores HRD e LSD para o furo B3-18 (Figura 44). Neste furo, é possível perceber o limite de forma mais eficaz entre a base da camada S e o topo da camada M, que ocorre no intervalo de profundidade que vai de 63,84 m à 64,69 m. De maneira análoga também observa-se que o intervalo entre as camadas M1 e M2 no sensor HRD ocorre de forma mais perceptível, sendo marcado por uma curva indicando o aumento de densidade em uma profundidade que vai de 69,6 à 69,9 m.

Ainda em relação ao furo B3-18 (Figura 44), observa-se que o sensor HRD consegue captar o registro do *roof* da camada I1S com maior nitidez em comparação ao sensor LSD. O teto da camada é espesso por uma curva positiva, indicando o aumento de densidade entre uma profundidade de 71,6 m à 72 m.

Salvo as situações anteriormente citadas, não são observadas demais diferenças entre os dois sensores utilizados na análise do furo B3-18.

Figura 44 - Furo B3-18 no software Wellcad™ mostrando os registros de profundidade, natural gama, diâmetro do furo, registro de densidade (sensores LSD e HRD) e descrição breve das camadas através da descrição dos furos de sondagem.



Fonte: autora.

As comparações observadas na Tabela 5 envolvem os dados de espessura e densidade dos pacotes carboníferos obtidos pelo método gama-gama via sensor HRD, em relação aos valores correspondentes dos estratos observados na descrição geológica (*hard data*). A média das diferenças de espessuras mostra valor zero. Para os dados de densidades, a diferença média absoluta é de 0,03 g/cm<sup>3</sup>. Tanto as médias das diferenças para espessura quanto para densidade são consideradas satisfatórias, pois apresentam valores próximos de zero, sem significativo viés, portanto.

Além disso, ao analisar a Tabela 5, observa-se que:

- i. em aproximadamente 79% das situações, o valor absoluto da diferença relativa (%) entre a densidade laboratorial e a densidade obtida pelo método gama-gama, utilizando o sensor HRD, é inferior ou igual a 5%. Esta diferença inferior a 5% entre os valores de densidade para *hard* e *soft data* na maioria das situações, mostra-se satisfatória para aplicações na indústria carbonífera;
- ii. aproximadamente 79% das situações mostraram que o valor absoluto da diferença entre a espessura das amostras de rocha e a espessura obtida pela perfilagem é inferior a 0,2 m;
- iii. A diferença média relativa da densidade entre *hard data* e *soft data* via sensor HRD é de 1,93%. A diferença média relativa da espessura (%) entre os registros geológicos e os registros provenientes da aquisição de dados via sensor HRD é igual a -0,06%.

Tabela 5 - Tabela comparativa entre os dados provenientes da descrição litológica e os dados adquiridos através do método gama-gama via sensor HRD.

Furo	Camada	HARD DATA				DENSIDADE GAMA-GAMA (HRD)				Diferença	Diferença	Diferença Relativa	Diferença Relativa
		De (m)	Para (m)	Espessura (m)	Densidade (g/cm3)	De (m)	Para (m)	Espessura (m)	Densidade (g/cm3)	Espessura (m)	Densidade (g/cm3)	Espessura (%)	Densidade (%)
B3-03	S+M1	11,10	12,64	1,54	1,79	11,10	12,65	1,55	1,85	0,01	0,06	0,65	3,35
B3-03	M2	13,08	13,78	0,70	1,92	13,10	13,69	0,59	1,90	-0,11	-0,02	-15,71	-1,04
B3-12	S	38,95	39,95	1,00	1,78	39,00	39,96	0,96	1,76	-0,04	-0,02	-4,00	-1,12
B3-12	M1	40,20	41,92	1,72	1,79	40,28	41,97	1,69	1,80	-0,03	0,01	-1,74	0,56
B3-12	M2	42,42	43,12	0,70	1,76	42,57	43,19	0,62	1,79	-0,08	0,03	-11,43	1,70
B3-12	I1	45,27	46,94	1,67	1,75	45,38	46,95	1,57	1,77	-0,10	0,02	-5,99	1,14
B3-13	S+S3	40,02	41,48	1,46	1,64	40,02	41,53	1,51	1,77	0,05	0,13	3,42	7,93
B3-13	M1+M2	42,00	44,48	2,48	1,67	42,85	45,53	2,68	1,87	0,20	0,20	8,06	11,98
B3-13	I1S+ I1I	46,60	48,50	1,90	1,83	46,60	48,50	1,90	1,89	0,00	0,06	0,00	3,28
B3-18	S	61,87	63,47	1,60	1,87	61,76	63,50	1,74	1,87	0,14	0,00	8,75	0,00
B3-18	M1+M2	63,86	66,30	2,44	1,82	63,84	66,30	2,46	1,72	0,02	-0,10	0,82	-5,49
B3-18	I1S	67,91	69,20	1,29	1,66	67,97	69,25	1,28	1,73	-0,01	0,07	-0,78	4,22
B3-18	I1I	69,52	70,42	0,90	1,79	69,50	70,76	1,26	1,80	0,36	0,01	40,00	0,56
B3-18	I2ST+I2SB+I2I	73,05	75,10	2,05	1,84	73,07	74,65	1,58	1,84	-0,47	0,00	-22,93	0,00
<b>Média das Diferenças</b>										<b>0,00</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,06</b>	<b>1,93</b>
<b>Mediana</b>										<b>-0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>-0,39</b>	<b>0,85</b>
<b>Desvio Padrão</b>										<b>0,18</b>	<b>0,07</b>	<b>13,92</b>	<b>4,06</b>

Fonte: autora.

Na aquisição de dados via sensor HRD também observou-se nos furos de sondagem camadas que apresentaram um erro de espessura igual ou acima de 10%, que são (Tabela 5): B3-03/M2, B3-12/M2, B3-18/I1I e B3-18/I2ST+I2SB+I2I. Através da observação dos dados de espessura, em conformidade com a análise dos perfis geofísicos via sensor HRD (Figuras 41, 42 e 44) constatou-se que:

- B3-03/M2 - a camada M2 possui um erro relativo de 15,71% e a espessura da camada no registro geofísico é de 0,59 m, em contrapartida na perfuração com recuperação de testemunho a mesma camada tem espessura de 0,70 m (Tabela 5). Ao analisar a Figura 41, nota-se que a delimitação via análise visual do topo da camada é mais nítida se comparada ao mesmo registro via sensor LSD. No entanto, a base não é bem delimitada. Apesar de possuir um limite de topo mais nítido, a intercalação da camada M2 com material estéril, pode influenciar nos valores de densidade adquiridos e por consequência no erro relativo relacionado a espessura;
- B3-12/M2 – a camada M2 possui um erro relativo de -11,43% e a espessura da camada no registro geofísico é de 0,62 m, enquanto no registro geológico é de 0,70 m (Tabela 5). Na análise do perfil geofísico (Figura 42), observa-se que os limites da camada são levemente mais nítidos, em comparação ao registro via sensor LSD;
- B3-18/I1I – a camada I1I possui um erro relativo de 40,00% e a espessura da camada em *soft data* é de 1,26 m, enquanto em *hard data* é de 0,90 m (Tabela 5). Na interpretação do perfil geofísico (Figura 44), observa-se que o topo da camada é nítido e bem delimitado, em concordância com o registro via sensor LSD. No entanto, a base não é bem delimitada, atribui-se isso ao fato de que próximo a base da camada a densidade aumenta devido a presença de uma lente de carvão DB/BD com pirita, o que pode tornar a sua delimitação mais difícil via análise visual, pois influencia no registro de densidade e por consequência no registro de espessura;
- B3 -18/I2ST+I2SB+I2I – a camada possui um erro relativo vinculado a espessura de -22,93% e sua espessura no registro geofísico é de 1,84 m, enquanto no registro geológico é de 2,05 m (Tabela 5). Ao analisar a

Figura 44, constata-se que o topo é melhor delimitado que a base, em concordância com o registro geofísico via sensor LSD. Possivelmente, a delimitação da base também é menos nítida devido a intercalação de diferentes tipos de carvão com maior densidade e estéril em seu *floor*.

Constata-se também neste caso que, o erro relativo igual ou superior a 10% para as camadas descritas, não está vinculado a desmoronamento de paredes do furo ou a mudanças no diâmetro do furo, pois o registro caliper e gama-natural (Figuras 41, 42 e 44) segue em conformidade com o registro gama-gama. Através das análises realizadas, indica-se que estes valores de erros estejam vinculados a dificuldade em distinguir o começo ou o fim de uma camada devido a características relacionadas a litologia das mesmas,

O erro relativo para as espessuras das camadas B3-18/S , B3-18/I1S via sensor HRD, é respectivamente de 8,75% e -0,78 (Tabela 5) e é significativamente menor se comparado aos erros relativos via sensor LSD para o mesmo parâmetro, pois no registro HRD ambas as camadas possuem limites nítidos. Possivelmente, o valor do erro para essas camadas é menor, pois reflete uma das características do sensor HRD que é em certos casos apresentar medidas mais satisfatórias em relação a aquisição de dados.

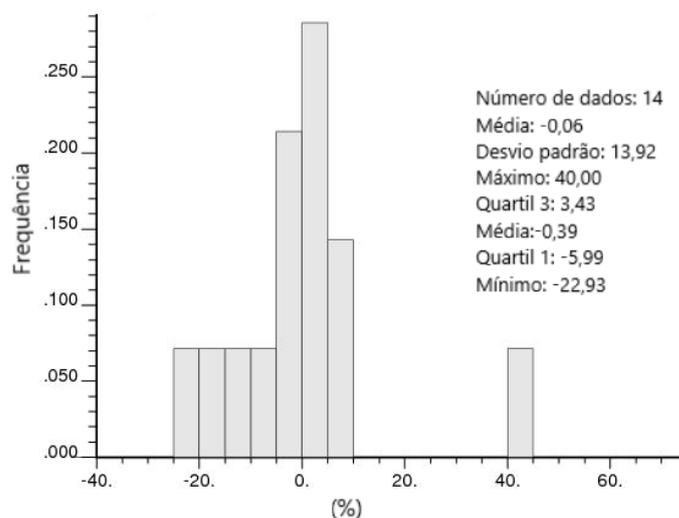
### **8.2.1 Estatística Univariada para o Sensor *High Resolution Density* (HRD)**

Ao analisar a Tabela 5, o desvio padrão da média das diferenças relativas para a espessura, sua média e mediana, bem como o histograma da Figura 45 e os coeficientes de espalhamento de quartis da Tabela 6, pode-se constatar que:

- i. em relação à diferença das espessuras, o desvio padrão amostral é 13,92%;
- ii. a média relativa das diferenças das espessuras é de -0,06% e sua mediana é de -0,39%. Como o grupo de dados é amodal, não é possível classificar a distribuição das diferenças apenas utilizando essas duas medidas. No entanto, a observação do histograma da Figura 45 e o coeficiente de espalhamento de quartis de -0,23% indicam que a distribuição é assimétrica negativa leve;

Figura 45 – Histogramas das diferenças de espessura quando comparados as diferenças entre os dados geológicos aos dados gama-gama via sensor HRD.

**Histograma das Diferenças Relativas entre Espessuras (Hard Data e Soft Data - HRD)**



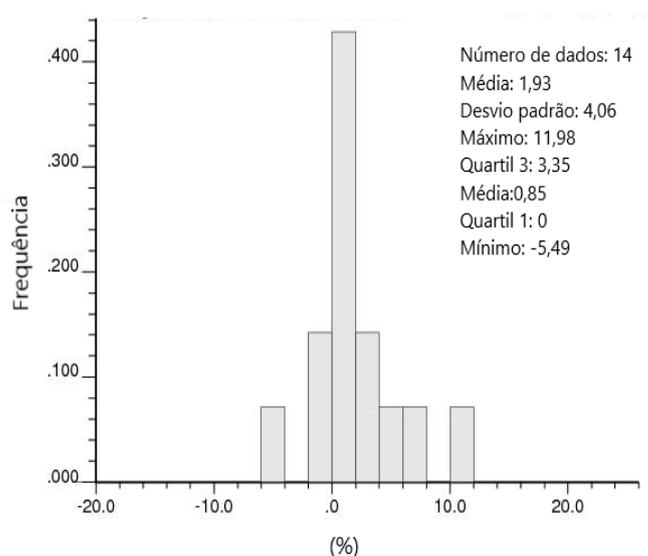
Fonte: autora.

Em relação a densidade, ao analisar-se a Tabela 5, o desvio padrão das diferenças de densidade, sua média, bem como os histograma da Figura 46 e o coeficiente de espalhamento de quartis da Tabela 6, pode se constatar que:

- iii. a diferença média relativa para a densidade é de 1,93% e o desvio padrão de 4,06%;
- iv. analisando a diferença média relativa para a densidade (1,93%) e sua mediana (0,85%) ,observa-se que a média é maior que a mediana, no entanto como os dados são amodais, não se pode analisar a distribuição das diferenças através destas medidas. Porém, o coeficiente de espalhamento de quartis de 0,49%, bem como a observação da Figura 46, indicam que a diferença das densidade relativas possui uma distribuição assimétrica positiva.

Figura 46 – Histogramas das diferenças de densidade quando comparados as diferenças entre os dados geológicos aos dados gama-gama via sensor HRD.

**Histograma das Diferenças Relativas entre as Densidades (Hard data e Soft Data - HRD)**



Fonte: autora.

Tabela 6 – Tabela com os valores de coeficiente de espalhamento de quartis para as diferenças entre espessura e densidade entre hard data e soft data via sensor HRD.

<b>HARD DATA X SOFT DATA (HDR)</b>	
<b>Coeficiente de espalhamento de quartis espessura %</b>	<b>-0,23</b>
<b>Coeficiente de espalhamento de quartis densidade %</b>	<b>0,49</b>

Fonte: autora.

### **8.2.2 Correlação entre *Hard Data* e *Soft Data* via Sensor HRD para a Espessura e Densidade das Camadas de Carvão**

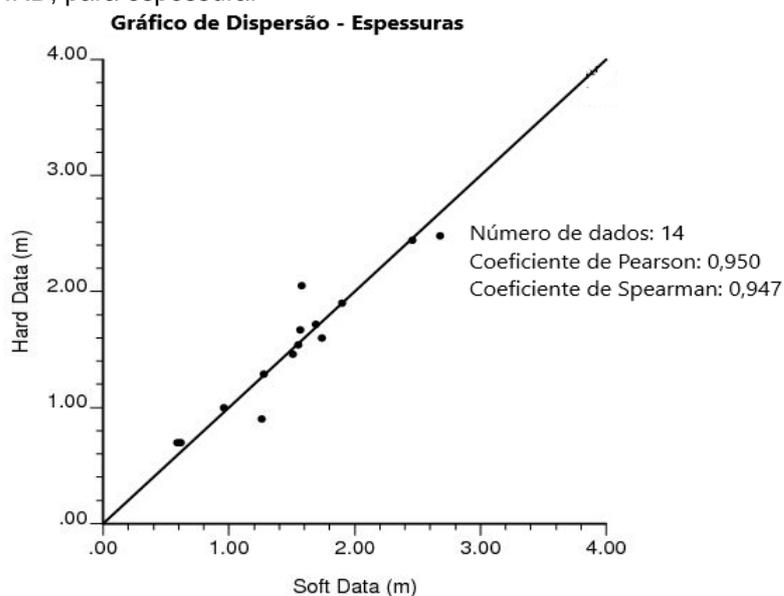
Ao observar a correlação entre os dados de espessuras provindos da análise dos testemunhos geológicos e dos dados gama-gama via sensor HRD para a mesma variável (Figura 46) pode-se dizer que essa é positiva. Além disso, o valor do Coeficiente de Correlação de Pearson (0,950) e o Coeficiente de Correlação de Spearman (0,947) indicam uma correlação forte entre os *hard* e *soft* data para espessuras, pois os mesmos são muito próximos de 1.

Em relação a espessura, os Coeficientes de Correlação de Pearson e Spearman mostram que o sensor HRD é acurado na aquisição de dados referentes às espessuras quando comparados aos dados geológicos.

Enfatiza-se também para essa situação que a correlação entre as densidades obtidas via *hard data* e *soft data* não foi realizada de forma grafica, pois a relação

entre os dois grupos de dados é significativamente influenciada pelo intervalo de valores entre densidades ser bastante reduzido. No entanto, os valores de Coeficiente de Pearson e Spearman para a densidade via sensor HRD são respectivamente de: 0,501 e 0,556. Para indústria carbonífera essa é uma boa correlação, já que o esperado é a partir de 0,5.

Figura 46 – Gráficos de dispersão comparando dados geológicos e dados obtidos via método gama-gama via sensor HRD, para espessura.



Fonte: autora.

### 8.3 Comparações entre os perfis usando os sensores LSD e HRD

Ao comparar-se as tabelas 3 e 5 e as figuras 41 à 44, de forma a analisar o desempenho dos dois sensores em relação às estimativas de densidades e espessuras dos estratos de carvão, verifica-se que não há uma diferença relevante de desempenho entre os mesmos, quando o objetivo é detectar estratos com espessuras maiores ou iguais a 0,4 m. Isto fica claro quando se observa o que já foi mencionado nos parágrafos anteriores deste tópico com relação às distribuições de diferenças de espessuras e densidades nas páginas.66 à 67, para o sensor LSD, e nas páginas. 77 à 79, para o sensor HRD. Nota-se, todavia, que o sensor HRD é capaz de discriminar estratos com espessuras iguais ou maiores que 0,20 m, inclusive apontando a presença de *partings* em estratos de carvão mais espessos. Entretanto, o presente estudo não mostrou situações nas quais, para os propósitos considerados,

a necessidade da utilização do sensor de melhor resolução vertical (HRD) é indispensável.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo, foram realizadas comparações para verificar a acuracidade da técnica de perfilagem geofísica gama-gama na discriminação de estratos carbonosos, em relação às demais litologias existentes ao longo de furos de sondagem executados em uma jazida de carvão localizada na região sul do Brasil.

Os resultados da perfilagem geofísica foram comparados com descrições geológicas de testemunhos de sondagem rotativa, e amostras de sondagem foram analisadas em laboratório para determinação da densidade.

A partir da análise das distribuições de diferenças de valores de espessuras e densidades de amostras de carvão de testemunhos de sondagem em relação aos registros obtidos por perfilagem geofísica, foi possível avaliar a acuracidade desta técnica de investigação geofísica.

Com base nas análises, conclui-se que a perfilagem gama-gama apresenta boa acuracidade na distinção entre as camadas de carvão e as demais litologias presentes na área de estudo (Área B3) no sul do Brasil, conforme os critérios pré-estabelecidos para espessura e densidade dos estratos (igual ou superior à 0,40 m e menor ou igual a 2,0 g/cm<sup>3</sup>).

Como pode ser observado nas tabelas 3 e 5, a comparação entre os dados provindos de análise laboratorial dos testemunhos coletados e os valores obtidos nos *logs* para densidade e espessura, tanto via sensor LSD quanto via sensor HRD apresentam algumas discrepâncias. Contudo, as informações de densidade do método gama-gama podem servir como dados de apoio para pesquisas minerais em locais onde se desejam respostas rápidas e a perfuração rotativa com extração de testemunhos não é viável ou para cenários de baixa recuperação de amostras, como é o caso do carvão, por tratar-se de um material friável. Assim, os valores dos *soft data* (dados de perfilagem geofísica, por exemplo) podem ser importantes para a pesquisa de exploração, quando combinados com os *hard data* (testemunhos de sondagens recuperados), a fim de aplicar técnicas de avaliação de forma a quantificar reservas economicamente explotáveis.

Além disso, conclui-se que o método gama-gama via sensor LSD é acurado na identificação de lentes de carvão homogêneas com espessura iguais ou superiores a 0,4 m, que é a resolução vertical esperada para sensores com esta configuração. Por outro lado, a visualização dos *logs* permite constatar que o sensor HRD é mais sensível na observação de *partings* em algumas situações, quando comparado ao sensor LSD. Adicionalmente, o sensor HRD foi capaz de delimitar alguns estratos com espessura de até 0,2 m que ocorrem intercalados com finas lentes de materiais estéreis. Apesar destas diferenças de desempenho, pode-se dizer que em linhas gerais, para os propósitos considerados, ambos os sensores possuem eficácia e acuracidade equivalentes.

Com base nas análises realizadas usando as distribuições de diferenças de valores de espessuras e densidades de estratos de carvão, verifica-se que ambos os sensores tem boa acuracidade para efetuar o registro destes parâmetros diretamente nos furos de sondagem. Para ilustrar isso, vale citar que, usando o sensor LSD, aproximadamente 71% das camadas (pacotes carbonosos) analisados mostraram que o valor absoluto da diferença entre a espessura do testemunho de rocha e a espessura obtida por perfilagem é inferior a 0,2 m. Em relação ao sensor HRD, obteve-se aproximadamente 79% para a mesma comparação. Já em relação a densidade, também conclui-se que ambos os sensores apresentam resultados satisfatórios, já que 93% das camadas analisadas apresentaram um valor de diferença de densidade inferior a 5%, com o uso do sensor LSD e 79% dos valores de densidade obtidos via sensor HRD apresentam uma diferença de densidade também inferior a 5%.

Em relação a correlação para espessuras de estratos entre *hard* e *soft data*, observa-se que tanto a aquisição via sensor HRD quanto sensor LSD são satisfatórias, já que os valores de coeficientes de correlação são superiores a 0,9, configurando assim, correlações fortes entre os dois grupos de dados.

Finalmente, sugere-se que um estudo mais amplo seja realizado, a fim de analisar um número maior de furos de sondagem, de forma a obter resultados mais abrangentes referentes às estimativas realizadas, onde seja possível realizar a filtragem de *outliers*, já que possivelmente a presença dos mesmos dentro do grupos de dados analisados, influenciaram nas medidas estatísticas aplicadas. Adicionalmente, aconselha-se a realização de um estudo com técnicas de ensaios laboratoriais de densidade que aproximem-se mais do valor da rocha *in-situ* e que

esses dados sejam comparados com os mesmos, porém obtidos através do método gama-gama, afim de contribuir com estimativas futuras.

## REFERÊNCIAS

ANON, 1993. Standards Association of Australia.

AFONSO, J.M.S. **Electrical resistivity measurements in coal: assessment of coal-bed methane content, reserves and coal permeability**. 2015. 282 f. Thesis (Doctorate) - Phd In Geosciences, Department Of Geology, University Of Leincester, Leicester, 2015.

ASFAHANI, J.; BORSARU, M.. Low-activity spectrometric gamma-ray logging technique for delineation of coal/rock interfaces in dry blast holes. **Applied Radiation And Isotopes**, [S.L.], v. 65, n. 6, p. 748-755, jun. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2007.01.019>

BRASIL. Pércio de Moraes Branco. Serviço Geológico Brasileiro. **Carvão Mineral**. 2014. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Carvao-Mineral-2558.html>. Acesso em: 30 out. 2023.

BORSARU, M.; JECNY, Z.. Application of PGNAA for bulk coal samples in a 4π geometry. **Applied Radiation And Isotopes**, [S.L.], v. 54, n. 3, p. 519-526, mar. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0969-8043\(99\)00276-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0969-8043(99)00276-6).

BORSARU, M. *et al.* In situ determination of sulphur in coal seams and overburden rock by PGNAA. **Applied Radiation And Isotopes**, Nova Iorque, v. 64, n. 2, p. 272-283, jul. 2005.

ELLIS, D.V. & SINGER, J.M. 2007. Well logging for earth scientists, 2nd ed. Springer Verlag, New York, 692 pp.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTIONS AGENCY. **Gamma-Gamma Density Logging**. 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/environmental-geophysics/gamma-gamma-density-logging>. Acesso em: 15 mar. 2024.

EVANDOWKI, Janaina Hugo. **Petrologia e Geoquímica das Camadas de Carvão e sua Relação com Gás Natural Determinado no Poço CBM 001 - ST, RS, Bacia do Paraná**. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geociências, Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

HEARST JR, NELSON PH, & PAILLET FL. Well logging for physical properties, 2nd ed. John Wiley & Sons, New Jersey. 483 pp. 2000.

HOFFMAN GI, JORDAN GR & WALLIS GR. 1982. Geophysical borehole logging handbook for coal exploration. The Coal Mining Research Centre, Edmonton. 270 pp.1982.

GORELIK, Breno. **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) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014

INTERNACIONAL COMMITTEE FOR COAL PETROLOGY (Reino Unido). **Internacional Handbook of Coal Petrography.** Newcastle: University Of Newcastle, 1971. 308 p.

KAYAL, J.R. & CHRISTOFFEL, D.A. Coal quality from geophysical logs: Southland lignite region, New Zealand. *The Log Analyst*, v. 30, 343–352, 1989.

LYRA, Diego da Silveira. **CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E ESTRUTURAL DO GRANITO BUTIÁ, ENCRUZILHADA DO SUL, RS.** 2016. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Geologia, Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Milani E.D., Melo J.H.G., Souza P.A., Fernandes L.A., França A.B. 2007; Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 265-287.

PEREIRA, Wanderson Roberto *et al.* EVALUATION OF GAMMA-GAMMA WELL LOGGING DATA APPLIED TO IRON ORE EXPLORATION – VALE GEOPHYSICAL WELL LOGGING TEST FACILITY. *Revista Brasileira de Geofísica*, [s. l.], v. 34, p. 2008-2015, nov. 2016.

SCHLUMBERGER ENTERPRISE (Austrália). **Our History.** Disponível em: <https://www.slb.com/about/who-we-are/our-history>. Acesso em: 20 nov. 2021.

VAN DYKE, Mark; KLEMETTI, Ted; WICKLINE, Joe. Geologic data collection and assessment techniques in coal mining for ground control. **International Journal Of Mining Science And Technology**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 131-139, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.12.003>.

WEBBER, T. Estimativa de Qualidade de Carvão Usando Krigagem dos Indicadores Aplicados a Dados Obtidos por Perfilagem Geofísica. 2008. 233 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

WEBBER, T.; SALVADORETTI, P.; KOPPE, J.C.; COSTA, J.F.L. Estimation of coal quality indicators using borehole logging data. *REM*, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 283-289, set. 2009.

WEBBER, T.; COSTA, J.F.L.; SALVADORETTI, P. **Using borehole geophysical data as soft information in indicator kriging for coal quality estimation.** *International Journal of Coal Geology*, v.112, pp. 67-75, 2013. *Page 10 of 19* <https://mc04.manuscriptcentral.com/remi-scielo> *REM - International Engineering Journal 123456789*

ZHANG, Quanying; ZHANG, Feng; YUAN, Chao; WANG, Xinguang; ZHANG, Xiaoyang. A comparative study on the neutron-gamma density and gamma-gamma

density logging. **Journal Of Petroleum Science And Engineering**, [S.L.], v. 176, p. 792-799, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2019.02.007>.

OLIVEIRA, Leandro José de. **Avaliação do Uso da Perfilagem Geofísica para Obtenção de Informações Secundárias para a Utilização em Co-estimativas de Variáveis Geológico-minerais**. 2005. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

Organization for Standardization ISO 7936: Determinations and presentation of float and sink characteristics , 2022.